

Implementación de una red de sensores inalámbrica: avances y mediciones en accionamiento eléctrico de uso industrial

Ivo F. M. Lory^{a*}, Daniel. H. Refosco^b, Manuel A. Mazzoletti^a,

Oriana M. Simonovets^a, Ángel G. Garcilazo^a

^a *LIDEE—Facultad de Ingeniería, UNaM*

^b *GIDE—Facultad de Ingeniería, UNaM*

e-mails: ivoflory@gmail.com, daniel.refosco@fio.unam.edu.ar, amazzoletti@fio.unam.edu.ar
simonovetsoriana@gmail.com, garcilazofio@gmail.com,

Resumen

En este trabajo se presenta los avances en la implementación de una red de sensores inalámbricos (conocida por sus siglas como WSN, Wireless Sensor Network) para la evaluación del estado de funcionamiento de accionamientos eléctricos (AE) de uso industrial. En primer lugar, se estudiaron los protocolos de comunicación posibles de ser aplicados en una WSN para la Industria 4.0. A partir de la revisión de bibliografía se consideró una primera solución adecuada a los costos/beneficios de los dispositivos de comunicación y la electrónica asociada que se dispone actualmente en el mercado local. La WSN propuesta tiene como objetivo recolectar datos en AE industriales de diferente tecnología para supervisar el estado de operación en tiempo real. Se presentan los primeros resultados de mediciones realizadas sobre un motor eléctrico en dos estados de operación.

Palabras Claves Accionamientos eléctricos, Industria 4.0, Procesamiento de señales, Redes de sensores inalámbrica.

1 Introducción

Para la comunicación de datos entre dispositivos se utilizan las redes de comunicación en distintas configuraciones. Si estos equipos se encuentran ubicados en zonas de difícil acceso, o distantes de una sala de monitoreo y control, se requieren de las redes inalámbricas. El desarrollo tecnológico en la industria está pasando nuevamente por un proceso de revolución, llamado Industria 4.0 o cuarta revolución industrial. La tendencia de este movimiento incita a la automatización y al intercambio de datos entre los diferentes accionamientos eléctricos (AE) basado en el uso de internet de las cosas (IoT) [1]. En este entorno, las redes de sensores inalámbricos, conocida por sus siglas en inglés como Wireless Sensor Network (WSN), son las de mayor aplicación. Las comunicaciones bajo el concepto de IoT han cobrado gran relevancia en la industria para diversos fines, como ser el monitoreo de condiciones de suelo para cultivo, consumo de energía y el uso en sistemas de comunicación [2] [3]

[4]. Estas soluciones utilizan una amplia variedad de protocolos y servicios como Wi-Fi, Bluetooth, MQTT, ESP-NOW, entre otras [5]. También existen trabajos que relacionan la industria 4.0 aplicada en los AE. En ese campo existen sistemas de monitoreo de motores eléctricos con protocolos como Zigbee y Wi-Fi para evaluar los estados de falla mediante el monitoreo de variables eléctricas [6] [7].

Este trabajo describe la implementación de una red de sensores inalámbricos (WSN) para transmitir señales medidas en AE de uso industrial. Esta red permite recolectar datos desde los sensores distribuidos en cada unidad de proceso para luego procesar y analizar las variable medidas. Se describe la unidad de proceso seleccionada, el protocolo de comunicación utilizado en esta implementación y las características de las señales muestreadas. Se presentan los resultados obtenidos a través de las mediciones de señales sobre un AC para su evaluación de condición en tiempo real.

2 Red de sensores inalámbrica, WSN

El sistema propuesto consta de dos nodos de comunicación, uno de ellos colocado sobre la carcasa de un AE que se requiere supervisar, instrumentado con el sensor para la medición y un dispositivo para el registro y la transmisión de señales. El segundo nodo se encuentra ubicado en una central de monitoreo, quien recibe los datos enviados en instantes de tiempos configurables y procesa los datos para el diagnóstico en tiempo real. En la Fig.1 se muestra el esquema de comunicación propuesto.

2.1 Unidad de procesamiento y sensado

Dado que las unidades de sensado que se ubican sobre los AE estarán alimentados por baterías y transmitirán datos en lapsos configurables, el dispositivo de transmisión de señales debe tener el menor consumo de energía posible. Bajo esta premisa, el microcontrolador ESP-32 de la marca Espressif resultó ser una opción viable dado que posee un protocolo de comunicación propietario ESP NOW que cumple con estas características. En este trabajo se midieron señales producidas por las vibraciones mecánicas. El integrado seleccionado para las mediciones de las vibraciones es el sensor MPU6050. Este sensor de bajo costo mide los desplazamientos y giros en el espacio en los ejes x,y,z mediante un acelerómetro y giróscopo, respectivamente. La tasa de muestreo del giróscopo es

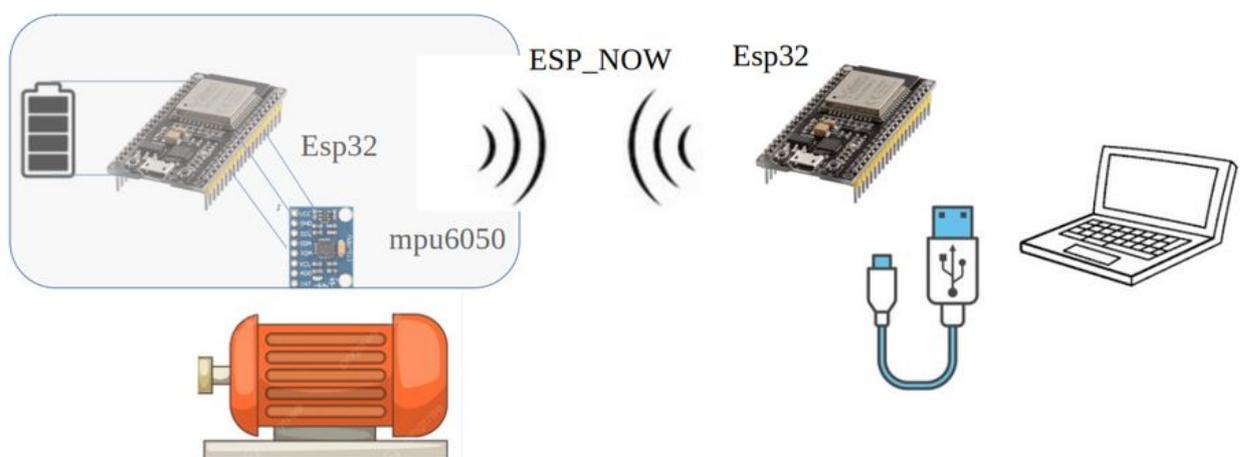


Fig. 1: Esquema del sistema de comunicación propuesto.

programable, no así la del acelerómetro. Los datos de desplazamiento del sensor obtenidos por el acelerómetro se almacenan en un buffer propio del integrado, un buffer del tipo FIFO (por sus siglas en inglés “First In, First Out”, Primero En Entrar, Primero En Salir).

2.2 Protocolo para la comunicación

Para la comunicación inalámbrica entre los nodos distribuidos se seleccionó el protocolo ESP-NOW compatible con sus microcontroladores ESP-32 y ESP-8266. Si bien el protocolo está basado en el protocolo estándar IEEE802.11 1999 [8]. Su mayor beneficio frente a otros protocolos como el Wi-Fi se basa en la interconexión de sistemas abiertos mediante el uso de una simple capa, ahorrando tiempos de conexiones al momento de solicitar autorizaciones y establecer la comunicación entre nodos. Este protocolo permite la comunicación unicast encriptada y sin encriptación, con la posibilidad de transmitir de forma *peer to peer* o *broadcast*. Comparado con Wi-Fi estándar, el ESP-NOW es al menos 10 veces más rápido, y dado que las unidades de procesamiento son portátiles y alimentadas con baterías, se priorizó el ahorro de energía, lo que se logra de manera eficiente con ESP-NOW [9]. Cuenta con la posibilidad de enviar hasta 250 bytes de datos por mensaje y la posibilidad de configurar *callbacks* para informar a la aplicación si la transmisión fue correcta. Presenta buen desempeño para comunicaciones de media distancia, llegando a superar los 60 metros en espacios abiertos [10].

2.3 Transmisión de datos

Para el envío de datos, el nodo transmisor abre un archivo en memoria Flash el cual contiene las muestras almacenadas correspondientes a la última medición e, inmediatamente, comienza el envío de las muestras con los tiempos preestablecidos de 100 milisegundos. En el otro extremo, el nodo receptor inicia su rutina abriendo un archivo de texto vacío y se dispone en “estado de espera” de datos. El receptor recibe un nuevo dato y lo añade al final de la pila en el archivo de texto abierto.

2.4 Características de señales muestreadas

Las señales, tanto eléctricas como mecánicas, pueden ser adquiridas a distintas tasas de muestreos. Esta característica dependerá de las capacidades de las unidades de proceso y los sensores utilizados. A modo de ejemplo, para una tasa de muestreo de f_m muestras por segundos y una señal de frecuencia f_s , se obtiene la siguiente cantidad de muestras:

$$N = \frac{f_m}{f_s} \quad (1)$$

En la Fig. 2 se muestra un ciclo de una señal sinusoidal de $f_s = 50$ Hz con distintas tasas de muestreo. Para un muestreo de 8 kS se obtienen 160 muestras, en la Fig. 2(a). Si la tasa disminuye a 4 kS, en la Fig. 2(b), se obtendrá la mitad de la cantidad de muestras. Para $f_m = 8$ kS y considerando 10 ciclos ($N=1.600$), la resolución en frecuencia Δf viene dado por:

$$\Delta f = \frac{f_m}{N} = 5Hz \quad (2)$$

En la Fig. 3 se muestra una FFT de la señal para 10 ciclos de onda, correspondiente a una ventana de tiempo de 0.2 s, con ambas tasas de muestreos. Se puede apreciar que la resolución en frecuencia

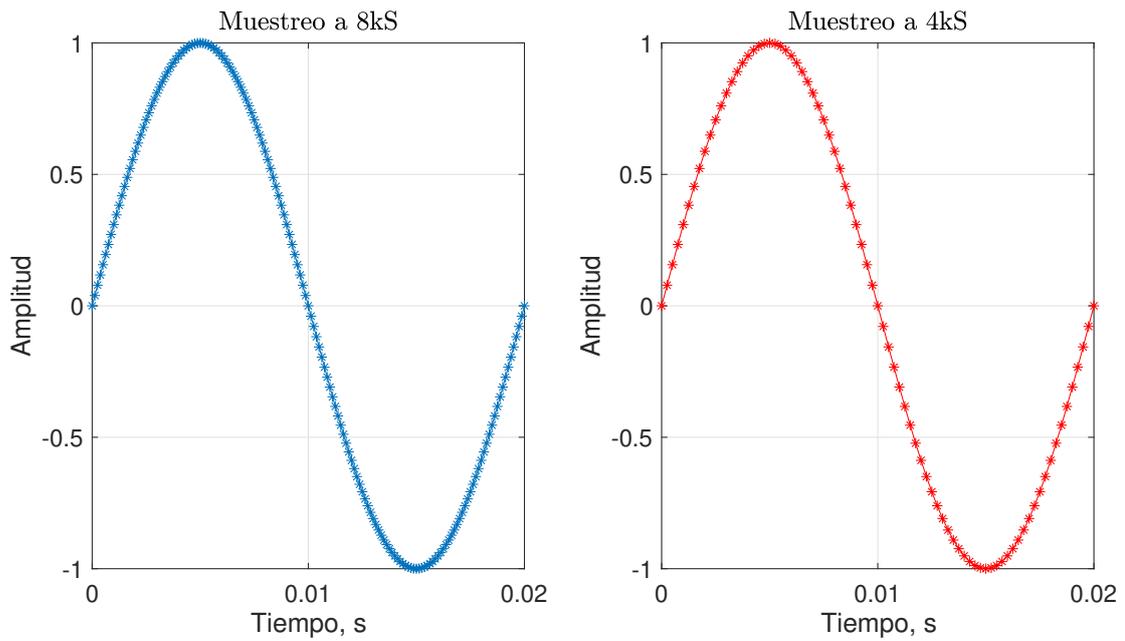


Fig. 2: Muestras de señal para $f_m = 8$ kS (derecha) y para $f_m = 4$ kS (izquierda).

es de 5 Hz en ambos casos. Esta baja resolución en frecuencia podría ser un problema para detectar averías que se manifiestan en el espectro en frecuencias muy cercanas una de otras.

Ahora, si aumentamos la ventana de tiempo a 2 s (100 ciclos de onda) se obtiene una mayor cantidad de muestras ($N=16.000$). En la la Fig. 4 se aprecia la mejora en la resolución en frecuencia de 0.5 Hz. De otra manera se debería aumentar la f_m a 800 kS para mantener la misma resolución.

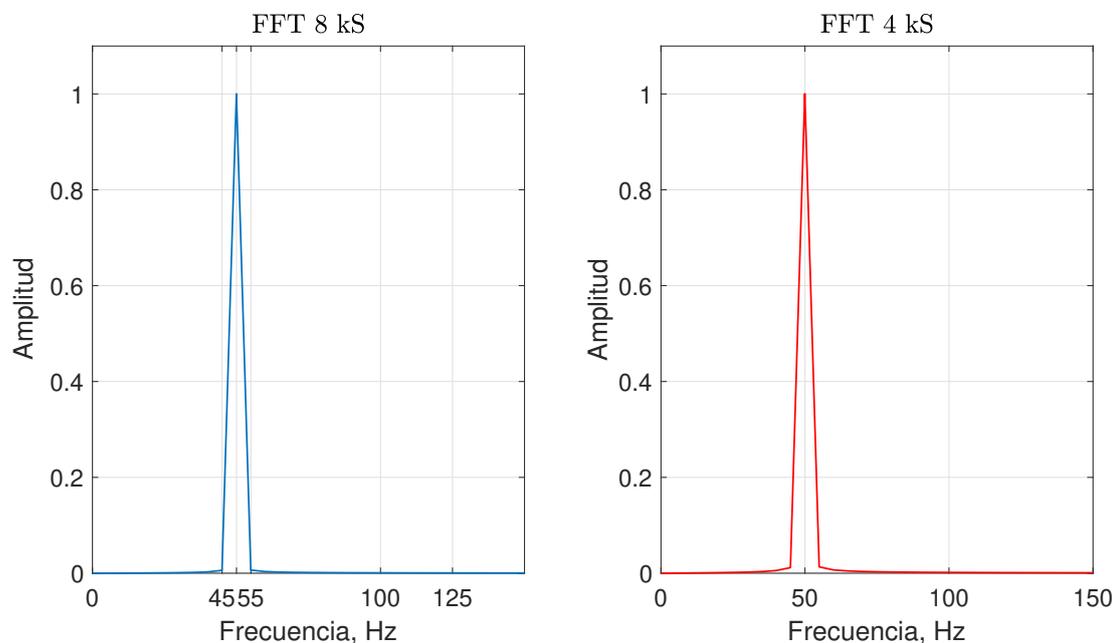


Fig. 3: FFT para la señal muestreada a $f_m = 8$ kS (derecha) y para $f_m = 4$ kS (izquierda).

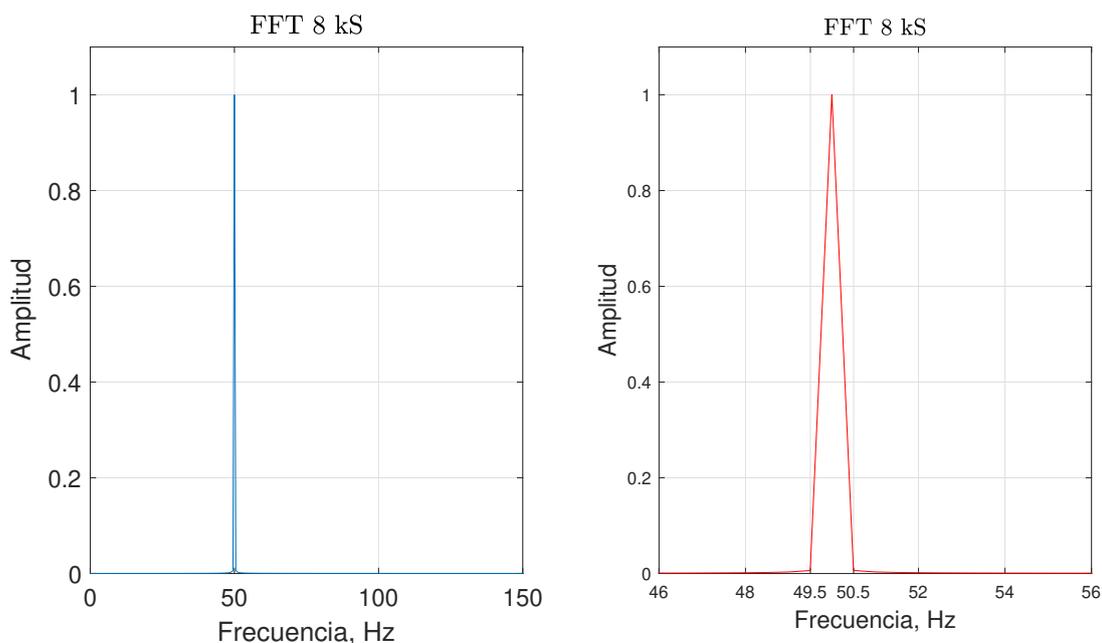


Fig. 4: FFT para la señal muestreada a $f_m = 8$ kS (derecha) y detalle de la resolución (izquierda).

3 Aplicación de la WSN en tiempo real

3.1 Desarrollo de software para procesamiento de señales

Para la programación de los microcontroladores se optó por utilizar Python como lenguaje de programación y Thonny como entorno de desarrollo. Se seleccionó este par dado que el ESP-32 admite la programación del mismo en MicroPython, la versión optimizada del lenguaje para microcontroladores. La ventaja que presenta este lenguaje frente a la alternativa C/C++ es la simplicidad de código que ofrecen a la hora de desarrollar programas sencillos. Python también presenta librerías como Matplotlib y Numpy, las cuales son de utilidad para realizar la transformada rápida de Fourier y crear las gráficas de las mediciones. En el Apéndice A se describe el código ejecutado por el receptor para graficar una FFT a partir de los datos recibidos. En primer lugar se crearon programas separados, cada uno de ellos se desarrolló para cumplir con los siguientes propósitos:

- Obtención de la dirección MAC de los ESP-32
- Lectura de datos de las unidades de sensado
- Creación de un archivo de texto con las muestras
- Transferencia entre nodos mediante ESP-NOW
- Procesamiento de las señales y gráficas
- Visualización de tendencias y diagnóstico

Una vez creados todas las rutinas, se incorporaron a un programa general, destinado a realizar las tareas correspondientes según sea el nodo implementado en la AE o el receptor localizado junto a una PC de escritorio.

3.2 Mediciones en un AE de uso industrial

Las mediciones de vibraciones se realizaron mediante el sensor MPU6050. Los ensayos experimentales se realizaron sobre un motor eléctrico de uso industrial en dos estados de operación, bajo condición de funcionamiento normal y frente a una perturbación realizada de manera intencional. A partir de las mediciones de aceleración registradas por el sensor, puede obtenerse la velocidad en cada uno de los ejes realizando la integral de las variables. De forma numérica, esto se obtiene por el método trapezoidal, sumando las mediciones y multiplicando por el periodo de muestreo para expresarla en mm/s.

En la Fig. 5 se muestran las FFT para la velocidad de las señales de vibraciones en los ejes x, y, z muestreadas a $f_m = 1$ kS. Con dicha tasa de muestreo se consigue un total de 2.000 muestras para un lapso de tiempo de 2 s. Por lo tanto, a partir de (2) puede calcularse la resolución en frecuencia de 0.5 Hz.

En estos primeros resultados, puede observarse que los espectros del eje x, en la Fig. 5(a), y del eje y, en la Fig. 5(b), evidencian mayores cambios de amplitud entre el estado de funcionamiento normal y con falla. Los cambios de amplitud de las componentes espectrales en todos los ejes serán analizadas en trabajos futuros para realizar la detección del estado de falla y el diagnóstico del problema.

4 Conclusiones

Este trabajo presentó la implementación de una WSN de dos nodos con el objetivos de medir, registrar y transmitir señales desde un accionamiento eléctrico (AE) de uso industrial. Para la transmisión de los datos se utilizó el protocolo ESP-NOW, que resultó ser una solución adecuada para la implementación de la red prototipo. Se realizaron mediciones sobre la carcasa de un AE en dos estados de funcionamiento. Con las señales de vibraciones mecánica almacenadas se procesaron los datos mediante una transformada rápida de Fourier (FFT) a fin de visualizar el espectro en frecuencia en los ejes x, y, z.

Durante los ensayos experimentales se realizaron varias pruebas de ajustes para evaluar el rendi-

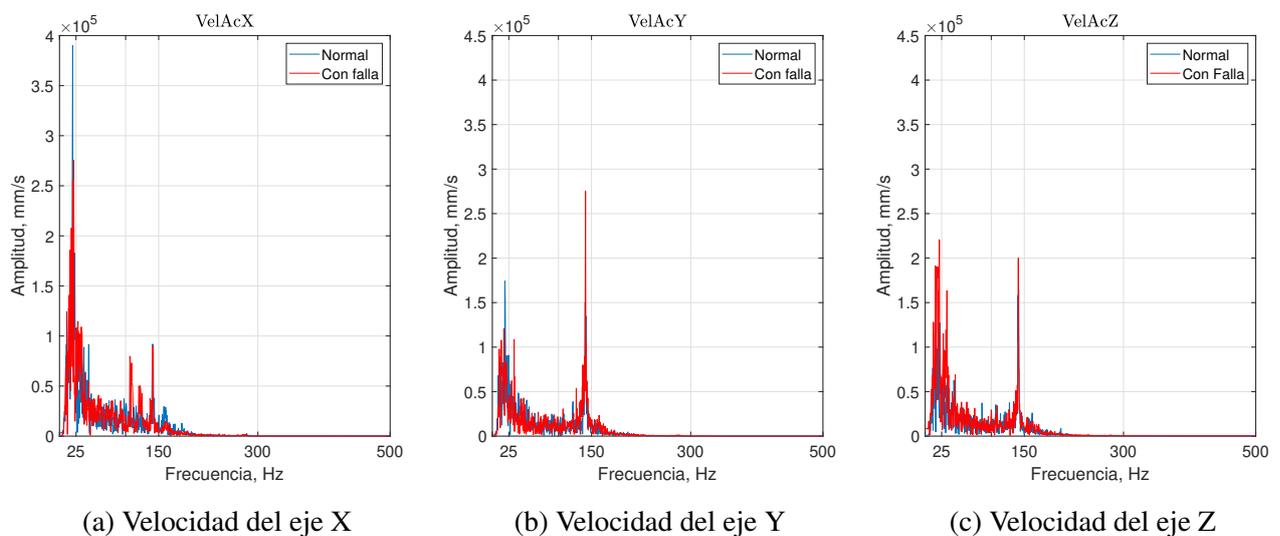


Fig. 5: Señales medidas y registradas por el acelerómetro.

miento de la transmisión de las mediciones y su alcance. En este aspecto se logró un rango máximo de 30 metros en línea de visión entre nodos para lograr una transmisión del 100 % de los datos. Una vez superada esta distancia se manifiestan pérdidas de paquetes de datos. La adición de obstáculos entre los nodos también afectó negativamente la tasa de transmisión de información. Dentro del rango de pruebas exitosas, la red transmite el total de los datos en aproximadamente en tres minutos.

Como futuros trabajos, se realizará la conexión de multi-nodos para medir señales sobre AE de distintas tecnologías. También se plantea la posibilidad de que el nodo receptor se conecte a un ordenador controlado por una Raspberry Pi, a efectos de ampliar la capacidad de almacenamiento de datos para lograr la visualización en tiempo real del funcionamiento de la WSN y la evaluación del estado de funcionamiento de los AE.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación PICT-2021-I-INVI-00681 denominado Desarrollo de estrategias para la detección de averías en accionamientos eléctricos basado en WSN para la industria 4.0, financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y acreditado por la Secretaria General de Ciencia y Tecnología (SGCyT) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM).

Apéndice A. Código en Python del nodo receptor

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
archivo=open("./muestra3_m1.csv", 'r')
t=[]
x=[]
y=[]
z=[]
m=[]
for i in archivo:
    lista=i.split(",")
    x.append(lista[2])
    y.append(lista[1])
    z.append(lista[0])
z_array=np.asarray(z)
y_array=np.asarray(y)
x_array=np.asarray(x)
archivo.close()
m_array=np.asarray(m)
eje_x=np.arange(0,2,0.001)
z_fourier=np.fft.fft(z_array)
```

```

y_fourier=np.fft.fft(y_array)
x_fourier=np.fft.fft(x_array)
frecuencia=np.fft.fftfreq(len(x_fourier),0.005)
plt.subplot(2,1,2)
plt.xlabel('Frecuencia_Hz')
plt.ylabel('Amplitud')
plt.plot(frecuencia, np.abs(x_fourier), "b")
plt.show()

```

Referencias

- [1] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of things IoT communication protocols: Review," *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, pp. 685–690, 2017.
- [2] A. S. Salunkhe, Y. K. Kanse, and S. S. Patil, "Internet of things based smart energy meter with ESP32 real time data monitoring," *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, pp. 446–451, 2022.
- [3] R. Rizal Isnanto, Y. Eko Windarto, J. Imago Dei Gloriawan, and F. Noerdiyan Cesara, "Design of a robot to control agricultural soil conditions using ESP-NOW protocol," *2020 Fifth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, pp. 1–6, 2020.
- [4] M. Koushik, M. Srinivasan, R. Lavanya, S. Alfred, and S. Sreenivasa, "Design and development of wireless sensor network based data logger with ESP-NOW protocol," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, pp. 1–5, 2021.
- [5] H. Cortez, L. Fonseca, H. Florencio, J. Fernandes, V. Pereira, and G. Francisco, "Arquitetura IoT para monitoramento de planta industrial: uma comparação dos protocolos MQTT e ESP-Now," *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, vol. 3, 10 2022.
- [6] R. R. Patil, T. N. Date, and B. E. Kushare, "Zigbee based parameters monitoring system for induction motor," *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, pp. 1–6, 2014.
- [7] M. Şen and B. Kul, "IoT-based wireless induction motor monitoring," *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, pp. 1–5, 2017.
- [8] Expressif, "ESP-NOW FAQ," <https://docs.espressif.com/projects/esp-faq/en/latest/application-solution/esp-now.html>, accedido el: 11/07/2024.
- [9] D. Eridani, A. F. Rochim, and F. N. Cesara, "Comparative performance study of ESP-NOW, wi-fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance," *2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, pp. 322–328, 2021.

- [10] T. N. Hoang, S.-T. Van, and B. D. Nguyen, “ESP-NOW based decentralized low cost voice communication systems for buildings,” *2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, pp. 108–112, 2019.