**Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría**

**Facultad de Ingeniería Informática**



**Desarrollo de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial.**

***Informe de las prácticas profesionales 1***

**Autor: César Fernández García**

**Tutor: Dr. C. Juan C. Sepúlveda Peña**

**Tutor: Ing. Juan Alejandro Baster Jiménez**

**La Habana, Julio 2023**

**Resumen**

Es lo último que se escribe, máximo debe tener 250 palabras, debe incluir problemática, objetivo, resultados y valor de los resultados.

**Palabras claves:**

**Abstract**

Resumen en inglés, máximo debe tener 250 palabras, debe incluir problemática, objetivo, resultados y valor de los resultados.

**Keywords:**

**Anexo A. Plan individual de tareas del estudiante**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tareas** | **Fecha de entrega** | **Rol(es) que desarrolla(n) con la tarea** |
| Reunión de inicio de la práctica | 12/6/2023 | - |
| Asimilación de la plataforma RAD Studio Versión 11.3 | 20/6/2023 | PG |
| Asimilación de la teoría sobre análisis por vibraciones y concepto de la (Transformada rápida de Fourier) FFT. Análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. | 20/6/2023 | AS |
| Análisis y diseño de una plataforma escalable de captura y procesamiento de datos. | 23/6/2023 | AR |
| Programar una aplicación Multiplataforma (Windows, Linux, Android) que sea capaz de seleccionar el *driver* de captura de datos (.dll en Windows, .so en Linux y Android) y usarla para capturar datos, mostrar dichos datos gráficamente en el dominio del tiempo y de la frecuencia (usando la (Transformada rápida de Fourier) FFT) y almacenarlos en una base de datos para futuro post-procesamientos. | 30/6/23 | PG |
| Entrega primera versión del software para revisión | 30/6/23 |  |
| Entrega versión final del software | 15/7/23 |  |
| Elaborar informe de la práctica | 5/7/23 | EE |
| Entregar informe de la práctica al tutor | 5/7/23 | EE |
| Rectificar señalamientos del informe | 10/7/23 | EE |
| Entrega del informe final de la práctica | 17/7/23 | EE |
| Defensa de la práctica | 19-21/7/23 | Todos |

**Índice**

[Introducción 1](#_Toc139579346)

[Capítulo 1: Fundamentación teórica 4](#_Toc139579347)

[Capítulo 2: Solución propuesta 9](#_Toc139579348)

[Capítulo 3: Validación de la solución 10](#_Toc139579349)

[Conclusiones 11](#_Toc139579350)

[Recomendaciones 12](#_Toc139579351)

[Referencias bibliográficas 13](#_Toc139579352)

# Introducción

Los ejes rotatorios se utilizan desde la antigüedad, siendo utilizado para una variedad de aplicaciones, como molinos, ruedas hidráulicas y poleas. Los egipcios, griegos y romanos utilizaban ejes para la transmisión de energía en la construcción de sus edificios y maquinaria. Durante la Revolución Industrial del siglo XVIII, los ejes giratorios se convirtieron en una parte vital de la maquinaria y los motores, y se utilizaron en aplicaciones como la producción de textiles y la fabricación de trenes. Desde entonces, los ejes giratorios se han utilizado en una amplia variedad de aplicaciones industriales y se han convertido en un elemento indispensable en la producción de energía mecánica y eléctrica para muchas industrias y sectores de la economía.

Desde entonces, en la actualidad han surgido máquinas que utilizan estos componentes rotatorios que generan vibraciones, tales como; compresores de alta velocidad, turbinas de vapor y gas, generadores, bombas, etc. Aunque por lo general son resistentes y bien diseñados, los ejes en operación son muchas veces vulnerables a defectos que se desarrollan sin haberlo visto venir. Dada la problemática de no poder detectar de forma prematura estas vibraciones (imperceptibles o no) tan peligrosas, en los equipos ocurren averías o roturas, ejemplo de estas son desalineamiento, desequilibrio, desgaste, y, por transitividad el paro de la producción. [1] [2]

Esta problemática se ha intentado solucionar en el país de una manera a veces inadecuada, ya que estas soluciones no toman en cuenta las restricciones internacionales que presenta el país debido al embargo económico, por ejemplo: falta de presupuesto, falta de piezas de repuesto, la compra de piezas y máquinas a terceros países por un precio mayor, demora en la obtención de estos elementos y complementos. [3]

Teniendo en cuenta lo anterior descrito se puede identificar como problema:

¿Cómo desarrollar un software para el monitoreo y diagnóstico en tiempo real de máquinas rotatorias industriales?

El objeto de estudio está enmarcado en los diferentes aplicaciones existentes que establezcan el monitoreo sobre máquinas generadoras de vibraciones, así como la seguridad y almacenamiento de los datos procesados de señales y del software en sí, y que permitan un análisis de tendencia de los datos procesados, teniendo como campo de acción las aplicaciones de escritorio y móviles que permitan, el procesamiento de señales generadas por máquinas industriales.

Como objetivo general se plantea desarrollarun software multiplataforma para el monitoreo y diagnóstico industrial.

A partir de lo previamente mencionado se trazaron los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar sobre otras aplicaciones que realicen el monitoreo y diagnóstico de procesos industriales.
2. Diseñar un software multiplataforma para el monitoreo de las vibraciones en máquinas rotatorias que realizan algún proceso industrial.
3. Implementar funcionalidad que permita la visualización de los resultados de las señales en tiempo real del equipo transmisor de la señal mediante sensores.
4. Implementar funcionalidad para almacenar en una base de datos las señales y los resultados provenientes de procesar cada señal.
5. Implementar mecanismos de seguridad que aseguren que el software no sea utilizado por personal no autorizado.
6. Validar la solución propuesta.

Para el cumplimiento de dichos objetivos se definieron las siguientes tareas:

1. Investigar y analizar sobre aplicaciones que permitan el monitoreo, visualización de señales, almacenamiento de su procesamiento y análisis de tendencia de esos procesamientos.
2. Asimilar la teoría sobre análisis por vibraciones y concepto de la (Transformada rápida de Fourier) FFT.
3. Asimilar el lenguaje de programación Pascal, así como de la plataforma RAD Studio Versión 11.3 y el sistema gestor de bases de datos SQLite.
4. Analizar y diseñar una plataforma escalable de captura y procesamiento de datos.
5. Programar una aplicación multiplataforma que sea capaz de seleccionar el *driver* de captura de datos y usarla para capturar datos, mostrar dichos datos gráficamente en el dominio del tiempo y de la frecuencia, y almacenarlos en una base de datos para futuro post-procesamientos.
6. Realizar pruebas de software de caja blanca y caja negra, así como pruebas de unidad, integración, aceptación, usabilidad, seguridad y rendimiento.

**Valor práctico**

El valor práctico de este trabajo reside en el desarrollo de una aplicación multiplataforma que permita al usuario el monitoreo y almacenamiento del procesamiento de señales proveniente de máquinas industriales de cualquier tipo que produzcan vibraciones, permitiendo así, un diagnóstico de mayor calidad por parte del usuario de las maquinarias involucradas.

# Capítulo 1: Fundamentación teórica

En este capítulo se presentan los principios teóricos fundamentales para comprender adecuadamente el trabajo realizado. Se abordan temas relacionados con el estado del arte de las aplicaciones para el monitoreo de máquinas industriales y el análisis de vibraciones en procesos industriales, específicamente en máquinas con ejes rotatorios. Además, se explican conceptos como el monitoreo y los sistemas de monitoreo. También se discute la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el mantenimiento predictivo. Finalmente, se hace un estudio y posterior selección de las tecnologías utilizadas para la confección de la propuesta.

* 1. **Estado del arte.**

Existen varias aplicaciones que permiten el monitoreo de señales provenientes de máquinas industriales y que también permiten el análisis espectral de las señales. Algunos ejemplos incluyen **DynaPredict** [4], **BK Connect** [5] y **PRTG** [6]. Estos software ofrecen soluciones para el monitoreo del estado de las máquinas y los componentes, y pueden ser utilizados para el mantenimiento predictivo.

Acerca de DynaPredict:

DynaPredict es una solución de monitoreo de la condición de las máquinas desarrollada por Dynamox. Esta solución se basa en el uso de un DynaLogger, un data logger Bluetooth con sensores de vibración y temperatura para supervisar el estado de la máquina y realizar un análisis espectral triaxial. Los parámetros medidos se muestran instantáneamente en el smartphone y su historial de datos se almacena en la plataforma web para su análisis y toma de decisiones. [4]

DynaPredict permite a los usuarios supervisar el estado de sus máquinas en tiempo real y tomar medidas preventivas para evitar fallas y tiempos de inactividad. La recolección de datos del DynaLogger está automatizada por una pasarela, el DynaGateway, desarrollada por Dynamox. Esto permite una supervisión continua y sin interrupciones del estado de las máquinas. [4]

Acerca de BK Connect:

BK Connect es un software de análisis de sonido y vibraciones creado por la compañía Brüel & Kjær. Este software ofrece una amplia variedad de aplicaciones y opciones diseñadas para tareas generales de sonido y vibraciones. Constituye un conjunto de herramientas flexible, capaz de hacer grabaciones con un solo clic o de resolver problemas complejos, que permiten desde gestionar datos hasta elaborar informes [5].

Las aplicaciones esenciales de BK Connect tienen una estructura modular, orientada a los roles de los distintos usuarios, y forman la base de un sistema flexible de medida de sonido y vibraciones. Cada aplicación puede funcionar como un conjunto de herramientas autónomo o combinarse con otras aplicaciones. Es posible combinar las aplicaciones esenciales y sus opciones con otra funcionalidad avanzada, para crear soluciones optimizadas, a la medida de su flujo de trabajo [5].

Además, BK Connect ofrece applets diseñados para realizar tareas de ensayo muy específicas. Cada applet individual es un módulo de software autónomo, adaptado a las necesidades del usuario y concebido para realizar una tarea específica [5].

Acerca de PRTG:

PRTG es un software de monitoreo que incorpora elementos de todas las áreas, para que pueda supervisar la salud, el estado y la condición de máquinas, sistemas de control, dispositivos y más en entornos de TI y OT. Este software es compatible de fábrica con estándares y protocolos industriales comunes como OPC UA, MQTT, Modbus TCP y más. Además, permite el monitoreo de dispositivos Ethernet industriales en su entorno de OT y la visualización de su entorno en paneles que incluyen elementos de TI, OT e IIoT [6].

PRTG también ofrece la posibilidad de extender la funcionalidad de las soluciones comunes de la industria para proporcionar una funcionalidad ampliada. Proporciona sensores nativos para Modbus TCP y RTU y permite supervisar si los clientes pueden conectarse y suscribirse a su bróker de MQTT y publicar a través de él con el sensor Ida y vuelta MQTT [6].

* 1. **Análisis por vibraciones de procesos industriales.**

El diagnóstico de maquinarias por vibraciones, como una de las tantas técnicas involucradas en el mantenimiento predictivo, se basa en el monitorizado de las vibraciones producidas por las maquinarias en funcionamiento y, debido a las conveniencias de su aplicación, constituye uno de los más preferidos por los especialistas del mantenimiento. Las técnicas de análisis de vibraciones para el diagnóstico que más se aplican son extraídas fundamentalmente del campo del procesamiento de señales [2].

El análisis por vibraciones es una técnica que consiste en medir y analizar las oscilaciones o movimientos alternos de ciertos puntos de una máquina o estructura, para determinar su estado o condición, así como la fuente y la gravedad de posibles fallas. El análisis por vibraciones puede ayudar a prevenir y predecir problemas como desbalance, desgaste, desalineación, defectos en rodamientos, fricción, grietas en engranajes, etc. [2]

Para realizar el análisis por vibraciones se utilizan instrumentos como sensores, analizadores y colectores de datos, que captan y procesan las señales de vibración en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Estas señales pueden ser representadas como formas de onda, espectros o diagramas que contienen información útil para el diagnóstico. Existen diferentes métodos y técnicas para extraer y clasificar las características de las señales de vibración, como el análisis estadístico, la transformada rápida de Fourier (FFT), el análisis de envolvente, el análisis espectral, la transformada wavelet (WT), el análisis cepstral, la transformada de Hilbert-Huang (HHT), entre otros. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y se aplica según el tipo de máquina, la frecuencia de vibración y el tipo de falla que se quiere detectar [2].

En el mantenimiento predictivo, el análisis por vibraciones es una técnica que permite supervisar y diagnosticar la maquinaria rotativa para predecir posibles fallas y planificar el mantenimiento preventivo.

Como resultado del análisis de una vibración en el dominio del tiempo, a partir de la cual se calculan parámetros como RMS o Valor efectivo, Pico y Pico-Pico. De ellos el más utilizado es el RMS que está asociado a la potencia de la vibración y este se determina de forma discreta de la siguiente forma: [7]

El valor PICO es el valor máximo de una magnitud (aceleración, velocidad, desplazamiento) que varía en un intervalo de tiempo [7].

El valor PICO-PICO (de un evento oscilatorio) es la diferencia algebraica entre los valores extremos de una magnitud que varía en un intervalo de tiempo [7].

En la [Figura 1](#Figura1) se observa la representación de los parámetros mencionados anteriormente en el dominio del tiempo [7].



Figura 1 Parámetros característicos de una señal.

La detección del valor PICO-PICO se emplea para mediciones de desplazamiento y los de PICO y RMS se usan para mediciones de velocidad y aceleración.

Los resultados del análisis por vibraciones se utilizan en el mantenimiento predictivo para monitorear el rendimiento y la condición de las máquinas y predecir posibles fallas. Al medir y analizar regularmente las señales de vibración de las máquinas, se pueden detectar cambios en su comportamiento que indiquen la presencia de una falla o un problema potencial. Esto permite a los técnicos de mantenimiento tomar medidas preventivas, como ajustar, reparar o reemplazar componentes antes de que fallen y causen daños mayores o interrupciones en la producción.

* 1. **Monitoreo.**

Monitoreo viene de la palabra monitor, es decir, una pantalla por la cual se pueden ver imágenes en tiempo real [8].

El monitoreo es el acto de supervisar los cambios en el estado y el flujo de datos en un sistema. Hay dos formas de hacerlo: proactiva y reactiva. La forma proactiva implica observar indicadores visuales, como series de tiempo y tableros de información, lo que se conoce como monitoreo. La forma reactiva implica enviar notificaciones automáticas a los operadores para informarles sobre cambios en el sistema, lo que se conoce como alerta [9].

Las alertas son la capacidad de un sistema de monitoreo para detectar y notificar a los operadores sobre un evento importante que provoca un cambio significativo en el estado. Estas notificaciones, conocidas como alertas, pueden adoptar diversas formas, como correo electrónico, SMS, mensajes instantáneos o llamadas telefónicas [9].

En general, el monitoreo consiste en la observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías.

* 1. **Sistemas de monitoreo.**

Un sistema de monitoreo es responsable de hacer un seguimiento del estado del sistema completo, incluyendo la infraestructura y otros subsistemas, para asegurar la fiabilidad y estabilidad de los servicios que provee. Consta de una serie de componentes de software que realizan mediciones y recolectan, almacenan e interpretan los datos monitoreados. El sistema está optimizado para almacenar de manera eficiente y para generar métricas de monitoreo, que posteriormente son mostradas en series de tiempo y cuyos puntos de datos son analizados con la finalidad de emitir alertas. Observa y sigue en el tiempo las operaciones y actividades de los usuarios, aplicaciones y servicios de red, registrando todas las acciones y alertando si identifica alguna violación o brecha que resulte en un comportamiento anormal [9].

La mayoría de los sistemas de monitoreo tienen una estructura parecida. El procedimiento inicia con la recepción de datos, después el cliente recolecta y transmite los datos al sistema de monitoreo mediante una interfaz especializada. El sistema guarda estos datos en métricas y remite los nuevos puntos de datos para valorar las condiciones de los umbrales. Cuando se percibe que un umbral ha sido transgredido, se manda una notificación al operador acerca del fallo. La [Figura 2](#Figura2) ilustra las interacciones entre los componentes de un sistema de monitoreo [9].



Figura 2 Interacciones entre los componentes de la arquitectura de los sistemas de monitoreo.

* 1. **Transformada rápida de Fourier (FFT).**

Las funciones de análisis se pueden calcular mediante las integrales que la definen, pero el núcleo principal del análisis de señales y del análisis de sistemas se realiza por el análisis por Fourier sustentadas por las siguientes ecuaciones conocidas como transformada discreta de Fourier (DFT) [7]:

(1.1)

(1.2)

Para n=0, 1,…, N-1; k=0, 1,…, N-1.

Siendo N el número de muestras discretas de un segmento de las señal vibroacústica. En el caso de las vibraciones como señales a procesar, y(n) es real y Y(k) es compleja. Al aplicar la transformada discreta de Fourier a un número N de muestras se muestra en la [Figura 3](#Figura3) [7].



Figura 3 Representación compleja de la transformada discreta de Fourier (DFT).

Hasta el año 1965 aproximadamente se usó la DFT en computadoras con programas que tenían que ejecutar operaciones de cálculo, siendo N el número de muestras discretas en un bloque de datos. Para ese mismo año se da a conocer la FFT, popularizada por James Willian Cooley de IBM y John W. Turkey de Bell Laboratories requiriendo solamente operaciones para transformar un bloque de N datos por mucha diferencia mejor que la DFT [7].

En resumen la FFT es un algoritmo eficiente para calcular la DFT y su inversa. La DFT es una herramienta matemática para el análisis de señales en el dominio de la frecuencia, pero su cálculo directo puede ser muy costoso en términos de tiempo y recursos computacionales. La FFT reduce significativamente la complejidad computacional del cálculo de la DFT, lo que la hace más adecuada para aplicaciones en tiempo real.

# Capítulo 2: Solución propuesta

# Capítulo 3: Validación de la solución

# Conclusiones

# Recomendaciones

# Referencias bibliográficas

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | A. Zambrano-Reyes, V. R. Nossov y J. C. Gómez-Mancilla, «Análisis de la Respuesta Vibratoria de Ejes Fisurados sobre Chumaceras Lubricadas para Control y Atenuación de Vibraciones en Máquinas Rotatorias». |
| [2] | M. H. Mohd Ghazali y W. Rahiman, «Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: a systematic review,» *Shock and Vibration,* vol. 2021, p. 1–25, 2021. |
| [3] | Ministerio de Relaciones Exteriores de Cuba, «Informe de Cuba en virtud de la resolución 75/289 de la Asamblea General de las Naciones Unidas, titulada “Necesidad de poner fin al bloqueo económico, comercial y financiero impuesto por los Estados Unidos de América contra Cuba”,» Calle Calzada, No. 360, Vedado. Plaza de la Revolución. La Habana, Cuba., 2023. |
| [4] | Dynamox, *Aumente la disponibilidad con Dynamox,* 2023. |
| [5] | Brüel & Kjær, *Software de análisis de señales,* 2023. |
| [6] | PAESSLER, *Supervisión de procesos industriales,* 2023. |
| [7] | E. P. Marín, La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias, D. de Ingeniería de las vibraciones y diagnóstico, Ed., Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, 1997. |