



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE
VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN
MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW**

Carlos Daniel Oxom Coy

Asesorado por el MSc. Ing. Rodrigo Rafael Chang Papa

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE
VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN
MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS DANIEL OXOM COY

ASESORADO POR EL MSC. RODRIGO RAFAEL CHANG PAPA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftali López Orozco
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 1 de febrero de 2022.



Carlos Daniel Oxom Coy



EEPF-

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Internet de las cosas - Internet de las cosas**, presentado por el estudiante **Carlos Daniel Oxom Coy** carné número **200915195**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Ingeniería Para La Industria Con Especialidad En Ciencias De La Computación.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

RODRIGO RAFAEL CHANG PAPA
INGENIERO ELECTRONICO
COL. 14817

Mtro. Rodrigo Rafael Chang Papa
Asesor(a)

Mtro. Mario Renato Escobedo Martinez
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Alvaréz Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0155-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Daniel Oxom Coy**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink is written over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.187.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE UN SISTEMA RECOLECTOR DE DATOS DE VIBRACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE PRECURSORES DE FALLAS MECÁNICAS EN UN MOTOR ELÉCTRICO DE 6.5 KW**, presentado por: **Carlos Daniel Oxom Coy**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia	Por acompañarme y apoyarme durante el proceso de mi formación personal y académica.
Mis abuelos	Marta Caal y Carlos Coy por brindarme todo su apoyo y amor.
Mis padres	Por el don de la vida. Porque con amor y cuidado me mostraron su apoyo incondicional a lo largo de mi formación. Gracias por creer en mí e impulsarme a siempre dar lo mejor, enseñándome a lograr mis propias metas, a que con esfuerzo y dedicación se pueden lograr las metas.
Mis hermanas	Cecilia Oxom y Sofía Morales. Por ser fuente de inspiración y apoyo.
Mis hijos	Por ser fuente de motivación e inspiración para culminar este proceso.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y expandir mis conocimientos a través del esfuerzo de los catedráticos comprometidos con la misión académica.
Mis amigos	Rodrigo Chang, Oscar Ramírez, Jorge Mario Illescas, Diego Dávila, Jorge Top, Carlos Ramírez, Jason Galindo, quienes, con su amistad y valores, han agregado mucho aprendizaje a mi vida el cual ha sido decisivo para superar los distintos retos de este proceso académico y de la vida en general.
Claudia Coy y Sebastián Aguilera	Por su apoyo incondicional, sin el cual no hubiera sido posible culminar este proceso.
Mónica Pineda	Por su apoyo durante este proceso, ser una profesional ejemplar y fuente de inspiración.
Mis colegas	Por apoyarme a continuar mi formación académica, siendo un gran facilitador para cumplir con mis compromisos profesionales y brindarme un espacio para el desarrollo académico y personal, en especial a Félix Guerra, Mynor Pérez y Carolina Marin.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3.1. Contexto general	9
3.2. Descripción del problema	10
3.3. Formulación del problema	11
3.3.1. Pregunta central.....	12
3.3.2. Preguntas auxiliares	12
3.4. Delimitación del problema.....	13
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS.....	19
5.1. General.....	19
5.2. Específicos	19
6. NECESIDADES PARA CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	21

7.	MARCO TEÓRICO	25
7.1.	Sistemas embebidos	25
7.2.	Crecimiento económico de los sistemas embebidos	26
7.3.	Componentes de un sistema embebido	28
7.4.	Unidad de Procesamiento Central (CPU)	29
7.5.	Microprocesador	31
7.6.	Microcontrolador	32
7.7.	SoC (<i>system on chip</i>)	33
7.8.	SbC (<i>single board computer</i>).....	33
7.9.	Periféricos	34
7.10.	Firmware o software	34
7.11.	Internet de las cosas	35
7.12.	Mantenimiento industrial	36
7.13.	Tácticas de mantenimiento.....	37
7.14.	Mantenimiento correctivo	37
7.15.	Mantenimiento preventivo	38
7.16.	Mantenimiento basado en condición	39
7.17.	Monitoreo de condiciones	40
7.18.	Medición de las vibraciones	40
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	43
9.	METODOLOGÍA	45
9.1.	Tipo de investigación.....	45
9.2.	Diseño de la investigación.....	45
9.3.	Técnicas de recolección y análisis de datos	46
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	49
10.1.	Adquisición de datos	49

10.2.	Tratamiento de datos	50
10.3.	Variables	51
11.	CRONOGRAMA.....	53
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	55
12.1.	Análisis del costo – beneficio	56
12.2.	Recursos monetarios.....	57
12.3.	Recursos no monetarios	57
13.	REFERENCIAS.....	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de la solución	23
2.	Sistemas embebidos	25
3.	Mercado de sistemas embebidos	26
4.	CPU	29
5.	Microprocesador intel core i7	30
6.	Microcontrolador PIC16F887 en circuito dedicado	31
7.	ESP32 DevKit 1	32
8.	Comparación SbC, SoC	33

TABLAS

I.	Cronograma	53
II.	Recursos monetarios	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
°C	Grados centígrados
g	Gravedad
KW	Kilowatt
%	Porcentaje
RPM	Revoluciones Por Minuto

GLOSARIO

Bluetooth	Estándar industrial de comunicación inalámbrica en redes personales de corto alcance.
CPU	Unidad de Procesamiento Central, por sus siglas en inglés <i>central processing unit</i> .
Ethernet	Estándar de comunicación para redes de dispositivos de área cercana o local.
ISO	Organización internacional para la estandarización.
IOT	Internet de las cosas, por sus siglas en inglés. Se refiere a la conexión de objetos comunes a una red para obtener o agregar información.
MQTT	Protocolo de intercambio de mensajes desarrollado para redes orientadas al internet de las cosas.
RAM	Memoria de acceso aleatorio, se refiere al tipo de memoria en una computadora, diseñada para ser escrita o leída, a medida que el sistema ejecuta tareas.

Raspberry Pi

Es una computadora desarrollada para la enseñanza, caracterizada por ser de una única placa y de tamaño de una tarjeta de crédito.

RCM

Es una estrategia de mantenimiento basado en la fiabilidad de los componentes.

WiFi

Tecnología de comunicación para establecer redes inalámbricas.

RESUMEN

En la siguiente investigación, se plantea el problema de la falta de monitoreo de vibraciones de un motor eléctrico que acciona un compresor de aire en una llenadora industrial de alimentos, se repasan las principales estrategias de mantenimiento industrial para entender la gestión del mantenimiento actual del motor, y de esta manera conocer sus ventajas y sus desventajas.

Se propone el diseño de la solución desde la perspectiva del uso de técnicas informáticas actuales, tales como la automatización en la recopilación y análisis de los datos, dispositivos embebidos interconectados, de tal forma que sea posible la medición de las vibraciones del motor, como un indicador del estado de salud de este.

Para lograr este resultado, se deben tomar en cuenta las restricciones físicas y lógicas que implica el motor en estudio, ya que opera en un ambiente industrial, de alta temperatura y humedad, condiciones adversas para la electrónica. El procesamiento de datos se dará mediante el uso de técnicas matemáticas para conocer la naturaleza de las vibraciones en el espectro de la frecuencia y así mismo, cómo cambia en el transcurso del tiempo, para este objetivo se deberá proponer un modelo que ayude a automatizar la detección de fallas para evitar que se concreten y tomar una acción oportuna.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria en general, y en especial en la rama de alimentos, se busca extender el ciclo de vida de las máquinas para obtener mayor utilidad de estos activos. Esto se logra gestionando actividades en pro del buen estado del equipo a través de estrategias de mantenimiento definidas, que se basan en reparar las fallas o evitar que ocurran. El monitoreo de condiciones de una máquina es el pilar fundamental para una estrategia de mantenimiento innovadora, ya que se busca observar los síntomas de una falla antes de que ocurra, evitando paros no planificados en la industria, y los costos que estos conllevan. Además, también se evita el cambio de piezas antes de lo necesario. Esta estrategia es comúnmente denominada como mantenimiento proactivo o mantenimiento predictivo.

Este trabajo contiene una propuesta de diseño para un sistema de adquisición y monitoreo de datos de vibración mecánica de un motor trifásico de 6.5 KW de potencia, el cual es típico en máquinas envasadoras de alimentos Tetrapak. Dicho motor acciona un compresor de aire del tipo de anillo líquido en una llenadora aséptica de alta velocidad, siendo este motor, el más grande y crítico para el proceso de envasado. Con el fin de detectar precursores de fallas mecánicas mediante el análisis de su condición en operación, se centran los esfuerzos en el sistema que realizará la captura de datos para realizar posteriormente tareas de monitoreo y análisis de la vibración mecánica.

El diseño de este sistema conlleva el uso de microcontroladores, que permiten la adquisición y transmisión de datos para su oportuno monitoreo. Con

la creciente tendencia del internet de las cosas, los microcontroladores de última generación incluyen características de comunicación inalámbrica.

Por lo tanto, el diseño de sistemas embebidos puede ser dotado con estas ventajas para facilitar la recopilación de datos que puedan ser almacenados en estructuras en la nube de manera que faciliten su registro y recuperación en las tareas análisis de datos. Utilizando esta estrategia, el presente estudio puede ser extendido a cualquier variable que se desee monitorear en un entorno industrial para el propósito de brindar un mantenimiento predictivo.

2. ANTECEDENTES

En el artículo Diseño de un sistema medidor de vibraciones para máquinas rotativas de 9,000 RPM hasta 84,000 RPM de Quezada (2016) se habla de un sistema medidor de vibraciones aplicado a máquinas rotativas. El objetivo de este proyecto fue muestrear los datos de vibración y procesarlos, para luego desplegarlos de manera visualmente fácil de comprender para un experto en análisis de vibración. Este trabajo tiene mucha relevancia para la investigación pues se trata de enfocar la aplicación tecnológica del muestreo de vibraciones a través de microcontroladores usando acelerómetros, con un enfoque basado en internet de las cosas para producir mejoras en el plan de mantenimiento de un motor eléctrico de un compresor de aire estéril.

En la investigación denominada Medición y análisis de vibraciones mecánicas en un bus de transporte de pasajeros y sus efectos en la salud y el confort mediante la norma ISO 2631 de Gualotuña y Patricio (2016), se profundiza sobre la medición de vibraciones por medio de acelerómetros, a través de un trabajo de campo en el cual se utilizaron vehículos reales para medir las vibraciones de distintos medios y rutas en el transporte urbano. Esta investigación pretendía estudiar las condiciones para los ocupantes de los medios de transporte mediante el análisis de vibraciones, y a través de una comparación con una norma ISO, se podría deducir si era un ambiente higiénico o saludable para los pasajeros. El desarrollo y el análisis de los datos del trabajo presentado por los autores es muy cercano al objetivo principal de este proyecto y, abre la puerta a una visión desde la perspectiva de salud y seguridad ocupacional en máquinas industriales. Es decir que se podría determinar sin

mayor esfuerzo si es saludable exponer a los trabajadores a determinados niveles de vibración mecánica.

Por su parte, Tsyarkin (2017), en su artículo *Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique — diagnosis of electromagnetic anomalies*, plantea el análisis de vibraciones como una de las más exitosas técnicas usadas para el monitoreo de condiciones de máquinas rotativas. A través del análisis de las vibraciones, el autor estudia las anomalías electromagnéticas de los motores, es decir, que va más allá de la clásica aplicación para monitorear el estado mecánico del motor y trata de identificar problemas relacionados al estado de los componentes eléctricos del motor, así detectar desbalances eléctricos, condición de los aislantes del motor o la excentricidad de los componentes internos del motor. En sus conclusiones, valida el análisis de vibración como una fuente de importante información acerca del estado del motor, así como problemas relacionados a la calidad de energía y cómo estos pueden repercutir en la vibración mecánica del motor. Así pues, se puede usar el análisis del autor, como un medio de comparación para la presentación de los datos de vibración y su uso en el diagnóstico de fallas.

En el trabajo de Bello, Constanza, García y De Jesús (2018), titulado *Diseño Y Fabricación de un Sistema Experimental para la Medición de Vibraciones Mecánicas: Estudio Analítico*, se realizó un análisis muy básico de un sistema mecánico, a través de la medición directa de vibraciones en una máquina diseñada para este propósito. El objetivo del trabajo fue el de verificar la medición contra el comportamiento teórico que se esperaba. El estudio se enfocaba en modelar matemáticamente el sistema para realizar una simulación basada en datos numéricos, con el objetivo de determinar la distribución de las masas en el eje, y como en toda simulación, su objetivo se centraba en corroborar los resultados con las mediciones físicas. Para este proyecto, es fundamental, ya

que luego de realizar la medición de vibraciones, determinar una calibración específica, y este trabajo es una pauta clara de cómo lograrlo.

Aghenta e Iqbal (2019) en su artículo *Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thinger.IO and ESP32 Thing*, proponen el diseño de un sistema SCADA adaptado a la arquitectura del internet de las cosas. En el artículo se menciona que los sistemas SCADA tradicionales han evolucionado a lo largo del tiempo, y abordan la implementación de la arquitectura de código abierto, utilizando componentes como la computadora de tarjeta simple Raspberry Pi y un microcontrolador ESP32 a través de la plataforma Thinger.IO. Estos dispositivos tienen amplia popularidad para desarrollar soluciones tecnológicas de bajo costo y de código abierto.

El artículo de Aghenta e Iqbal (2019) es relevante para esta investigación porque proporciona otra perspectiva de la implementación de un sistema de monitoreo industrial, aplicando las últimas tendencias en la arquitectura de internet de las cosas y reduciendo el costo al utilizar herramientas de código abierto. La forma en la que solucionan el problema central de su artículo es replicable en el entorno de esta investigación, pues las herramientas como las tarjetas de desarrollo y los microcontroladores están disponibles en el mercado guatemalteco para desarrollar una solución similar.

Babiuch, Folynek y Smutny (2019) en su artículo *Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing*, analizan la utilización del microcontrolador ESP32 como un nodo de procesamiento de datos, enfocado a la medición y procesamiento en una arquitectura IoT. Analizan la plataforma ESP32 como un producto versátil para el rápido desarrollo de aplicaciones conectadas al internet, gracias a su capacidad de conexión WiFi y su potencia de procesamiento en comparativa con sus competidores en el mercado.

El microcontrolador ESP32 es un dispositivo recientemente lanzado al mercado, sucesor del ESP8266, se comercializa como una SoC (Sistema en un chip, por sus siglas en inglés); es relevante dentro de la comunidad investigativa dada las capacidades de conexión y sus prestaciones de procesamiento. Es común ver proyectos con servidores web implementados dentro del microcontrolador, el ESP32 es un microcontrolador de mucho interés para el diseño de la solución en este proyecto.

Calleja y Guasch (2019) en su trabajo de investigación Monitorización de sensores con Arduino utilizando el protocolo MQTT, se enfocaron en documentar cómo se puede implementar el protocolo MQTT con el objetivo de manejar las lecturas de diversos tipos de sensores y salidas, con componentes como LEDs. Una de las principales características fue el enfoque en hacer eficiente la comunicación, es decir, ocupar el menor ancho de banda posible, esto lo lograron a través de la implementación de una estructura M2M, o bien maestro – esclavo, de forma que la información se transmitía de manera periódica, y no constante.

El protocolo MQTT facilita el entendimiento de la estructura del proyecto gracias a los *topics* o temas, a los cuales se publican los datos, que posteriormente son recolectados por los dispositivos que se suscriban a dichos temas. En la etapa final, fue propuesto un diseño para la implementación real de un sensor de temperatura y humedad, adicional a un led, en donde a través de un bróker, que se encuentra en la nube, se pueden leer los datos de los sensores y encender o apagar el led, en ese sentido, la relevancia de este proyecto radica en la utilización del protocolo MQTT para publicar datos de sensores en la nube utilizando una arquitectura de maestro - esclavo.

Lara (2019), en su trabajo final de grado titulado, Utilización de Google Cloud para el procesamiento y almacenamiento de datos, monitorizados

remotamente, plantea la implementación de servicios basados en la nube para el almacenamiento y procesamiento de datos enviados a través de nodos de sensores. El objetivo de su trabajo fue más enfocado en la creación de aplicaciones móviles para la visualización de sensores *IoT* a través de dispositivos microcontroladores como ESP32. El objetivo central de la investigación se relaciona directamente con este proyecto, con la diferencia de que el enfoque de este proyecto sería mostrar una interfaz web para la visualización de los datos, en lugar de desarrollar aplicaciones móviles. Además, en el desarrollo de este proyecto se le dará prioridad al tratamiento de los datos después del muestreo. Este tipo de trabajos toma mucha relevancia para este proyecto dado que se enfocan en aplicar los servicios actuales para el uso de *IoT*, en este caso se utiliza la plataforma de Google.

Díaz (s.f.), presenta en su trabajo Medición y análisis de vibraciones, las bases teóricas sobre esta área de investigación. El objetivo del proyecto fue didáctico y tiene elementos de vital importancia para la práctica en el campo; aborda temas desde la aplicabilidad para la medición de vibraciones en máquinas electromecánicas, pasando por los fundamentos técnicos y científicos detrás de este procedimiento. Así mismo, se habla del procesamiento de señales y culmina con la detección de las fallas mediante el análisis de las mediciones. El actual proyecto toma las mismas bases, pues la teoría es fundamental para la implementación exitosa de una herramienta tan importante como esta.

Konne, Klar y Viitala (2020) en el artículo *IoT connected device for vibration analysis and measurement*, se implementa la utilización de sensores tipo MEMS (Sistemas Micro- Electromecánicos, por sus siglas en inglés) para la medición de vibraciones; según los autores, estos dispositivos cumplen con requisitos de tamaño compacto, precisión y asequibles que los hacen ideales para el desarrollo de proyectos de alto beneficio en relación al costo. Además, presentan este tipo

de acelerómetros como una solución de bajo consumo energético, de esta manera, logran desarrollar un medidor de vibraciones energizado con baterías.

En el artículo detallan la implementación del sensor de vibraciones desde un punto de vista electrónico para luego validarlo, caracterizarlo y finalmente montarlo en una máquina de rollos de papel para validar las condiciones de los componentes mecánicos de dicha máquina. Por último, presentan los datos de vibración que el sensor recolectó y validan la eficiencia energética de la batería, para este proyecto es relevante la metodología que se aplica dado que se diseña el sistema desde cero, aunque consideran otros microcontroladores, se puede observar las consideraciones técnicas y prácticas que se consideraron y de esta forma poder adaptarlas a las necesidades específicas de este proyecto.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Una falla mecánica es parte del día a día en la industria manufacturera, sin embargo, en la industria alimenticia, un paro no planificado, no solo representa pérdida de tiempo; según la complejidad del proceso, implica el desperdicio de materias primas que al no envasarse en el tiempo adecuado caducan.

Históricamente, a medida que se desarrollaron nuevas técnicas de producción y nuevas tecnologías, también se crearon máquinas más complejas, desde las máquinas a vapor, hasta los sistemas automatizados que se observan en la industria moderna. A mayor complejidad de las máquinas, hay más componentes o materiales propensos a sufrir fallas.

Tradicionalmente estas fallas fueron corregidas sobre la marcha, siendo una estrategia cara y poco eficiente, mediante la expansión en el conocimiento de los materiales, los principios físicos de la mecánica y las máquinas, se popularizó la prevención de las fallas a través de estrategias de cambio de partes en intervalos regulares, intentando que fuese antes de que la falla ocurriese. Incluso hoy en día, las partes de las máquinas se cambian mucho antes de lo que se necesita en realidad, generando un desperdicio en cuanto al tiempo de vida útil de las piezas, el sobre cambio de piezas genera un costo importante.

En otro escenario, las piezas se cambian muy tarde, ocasionando daños colaterales por fallos prematuros. La recurrencia de estos escenarios a través del mantenimiento preventivo ha dejado al descubierto la necesidad de una

estrategia más proactiva hacia la conservación de las máquinas y la prevención de fallas, esta estrategia se le conoce como mantenimiento predictivo, el cual se basa en gran medida, en el monitoreo de condiciones de vibración, temperatura, entre otros, no obstante, esta estrategia requiere una inversión importante dentro del presupuesto del mantenimiento de un equipo.

3.2. Descripción del problema

Cuando una máquina está próxima a fallar, presenta cambios en sus condiciones de operación, es decir, puede presentar cambios de temperatura, ruidos o vibraciones. Para este trabajo, la condición de interés es el análisis de la vibración, debido a su versatilidad para detección de fallas mecánicas en máquinas rotativas. Sin embargo, esta técnica aún no está ampliamente extendida en todas las industrias, debido a su alto costo. Las herramientas profesionales para este propósito van desde 15,000 USD en promedio, estos equipos permiten realizar mediciones puntuales, dependiendo mucho de las rutinas de chequeos asignadas.

En Guatemala, hay pocas empresas que brindan el servicio de análisis de vibraciones, en Centroamérica el servicio cuesta alrededor de 1,500 USD adicional a gastos de traslado de técnicos, viáticos, entre otros. Aunque es una solución que se aplica en algunas otras industrias con mayor madurez en el ámbito del mantenimiento, esta realidad limita el número de muestreos realizados y puede afectar la detección oportuna de una potencial falla.

El nivel de madurez en el ámbito del mantenimiento industrial en el sector de alimentos se ha mantenido hasta el nivel de aplicación de estrategias de mantenimiento preventivo, combinada con mantenimiento basado en confiabilidad, RCM por sus siglas en inglés. RCM se utiliza para garantizar que

los equipos se mantengan en producción bajo los estándares de calidad requeridos con el objetivo de maximizar la rentabilidad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos, aplicando el mínimo de mantenimiento para lograr esto. RCM contempla tres tipos de tareas, donde no se hace nada, es decir el equipo corre hasta fallar, donde se realizan tareas basadas en el chequeo de la condición del equipo y la tercera situación es donde se realizan cambios de piezas programados sin previa evaluación del estado de estas.

En este aspecto, el mantenimiento de los motores eléctricos se contempla bajo el esquema de no hacer nada hasta que fallen, y esto funciona bien en motores no críticos, motores pequeños que incluso se pueden comprar de emergencia en el mercado local, sin embargo, en motores que activan procesos clave en la manufactura de alimentos, es donde se pretende el uso de la solución. Se considera crítico un motor en donde la complejidad del cambio se ve aumentada por factores externos como, accesibilidad de la pieza, medidas de seguridad industrial como, por ejemplo, esperar a que una máquina se enfríe para intervenirla, disponibilidad del motor, tiempo de importación, entre otros.

3.3. Formulación del problema

El plan de mantenimiento de una línea envasadora de alimentos contempla la revisión de un motor eléctrico de 6 KW de potencia que impulsa un compresor de aire utilizado en el proceso de producción. Este chequeo se realiza de forma auditiva y depende de la experiencia del técnico que realiza la prueba.

Esta subjetividad en la medición audible del estado del motor ha provocado paros no planificados por la ausencia de una medición objetiva de las vibraciones del motor, para detectar en un estado prematuro, una potencial falla mecánica.

3.3.1. Pregunta central

¿Cómo se pueden aplicar los conceptos del internet de las cosas para la creación de un sistema embebido de recopilación, almacenamiento y despliegue de la condición de vibraciones de un motor eléctrico de 6,5 KW utilizado en un compresor de aire estéril de una llenadora de alta velocidad?

3.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Qué características se deben tomar en consideración para realizar la medición de vibraciones del motor eléctrico del compresor de aire estéril de una llenadora de alta velocidad?
- ¿Qué tipo de componentes se deben considerar para realizar un sistema IOT que se adapte a un entorno industrial?
- ¿Cómo se deben presentar los datos de vibración de un motor eléctrico?
- ¿Cómo se puede realizar un diagnóstico de fallas con los datos de vibración de un motor eléctrico que fueron presentados?
- ¿Cómo generar alarmas automáticamente usando los datos de vibración de un motor eléctrico que fueron registrados?
- ¿Cómo determinar el beneficio obtenido por la implementación de la solución propuesta en este proyecto, en una llenadora aséptica de alta velocidad?

3.4. Delimitación del problema

El problema se delimita a Guatemala, esta región es en donde el autor tiene la experiencia y el conocimiento de las prácticas de mantenimiento en el sector de industria alimenticia, específicamente el envasado de alimentos asépticos.

Dentro de una llenadora aséptica, intervienen distintos elementos que, en conjunto permiten el envasado de un producto inocuo y sin preservantes. El proceso en general necesita producto comercialmente estéril, una transferencia aséptica y material de envase estéril. En el caso de este estudio, la llenadora representa el ambiente estéril, y una de las principales características de este ambiente estéril es que exista un flujo de aire libre de microorganismos, este flujo de aire culmina en una cámara aséptica que queda presurizada por el aire. Para este propósito se utiliza uno de los componentes más importantes de la llenadora, el compresor de aire estéril.

Este componente, hace la compresión del aire a través de un arreglo mecánico y un anillo de agua, para pasar el aire a través de un súper calentador que esteriliza el aire a través de un proceso llamado incineración, el cual consiste en calentar el aire a 400 °C; seguidamente, el aire se distribuye a la cámara aséptica en donde se hace la transferencia del producto hacia el envase.

Este compresor es tan importante para el proceso, que se fija como delimitación del problema; el plan de mantenimiento actual consiste en un chequeo de ruidos y vibraciones que carece de objetividad, dejando a la percepción del técnico, si el equipo necesita alguna intervención de mantenimiento o no.

El marco temporal también es relevante, actualmente para este ramo industrial, se desconoce de una solución consistente para la medición automática de vibraciones en motores eléctricos y los mecanismos rotativos que son impulsados por éstos, la naturaleza de la medición y el análisis espectral tienen como premisa que existe una frecuencia de rotación central, de esta manera se analizan los datos con mayor certeza.

4. JUSTIFICACIÓN

El rápido desarrollo de las tecnologías de la comunicación, en especial el internet, ha permitido conectar una gran diversidad de sistemas físicos a Internet, de tal manera que hoy en día es posible programar la preparación del café antes de llegar a casa. El acceso a estas tecnologías y las propuestas de nuevas técnicas y arquitecturas de interconexión abren la brecha para la innovación en el campo industrial, debido a que los cambios de tecnología son menos frecuentes en este ramo, pero también se obtienen muchos beneficios al implementarlos.

El desarrollo de este proyecto se basa en la línea de investigación de Internet de las cosas, utilizando computación industrial como una solución para la detección de precursores de fallas en motores eléctricos utilizados en máquinas rotativas como compresores, bombas y electromecanismos industriales, utilizando el esquema general de un sistema IoT, para la captura de datos, la transmisión y la detección de fallas a través de la visualización y el planteamiento de un sistema de alarmas basado en parámetros límite.

Los aportes de este trabajo son puntuales; el principal, será la obtención de datos de las máquinas de envasado. Actualmente, las plantas industriales con un nivel alto de madurez en sus sistemas de mantenimiento realizan la toma de estas mediciones manualmente, estas mediciones generalmente están sujetas al error humano, con la toma de datos de vibración de un sistema embebido, se asegura que la medición se realiza siempre en el mismo punto y bajo las mismas condiciones, de esta manera se logra conocer la condición mecánica del equipo, a diferencia de la toma esporádica que se tiene actualmente, el muestreo

automático daría una lectura en tiempo real lo cual es muy conveniente ante una posible falla. El segundo aporte, no menos importante se relaciona con la salud y seguridad ocupacional, permitiendo evitar la interacción cercana del humano con la máquina que, por ubicación, temperatura o por piezas móviles, puedan representar un riesgo laboral para el técnico que realice la medición manualmente. Por último, también se espera que la investigación logre dar una clara guía para que otros investigadores puedan diseñar soluciones similares, como medidores de temperatura, calidad del aire, presión, químicos o cualquier otro dato de importancia en otras industrias, concentrándose más en la aplicación o prueba de concepto, que en los tecnicismos para lograr este objetivo.

Al finalizar este trabajo de investigación, se espera un diseño que permita al lector formar una idea clara de los componentes lógicos y físicos necesarios para integrar la solución a un motor eléctrico de su interés, de manera que pueda integrarse en un plan de mantenimiento que prevenga los paros no planificados por fallos en motores eléctricos considerados críticos. Estos detalles técnicos abarcan las consideraciones de intercomunicación y manejo de los datos obtenidos, que utilizarían las redes y el internet como infraestructura principal.

El proyecto beneficia a las industrias manufactureras y de servicios locales. La industria del envasado de alimentos podrá contar con una solución innovadora para el monitoreo de motores clave en el proceso de procesamiento y envasado de alimentos. Al evitar paros no planificados, se benefician de la reducción de mermas, asimismo, la industria de servicios puede abarcar más equipos en el análisis de mantenimiento predictivo y así brindar más garantías en los contratos de mantenimiento.

Con el desarrollo del diseño se pretende aumentar la confiabilidad de los equipos en una planta a través de una estrategia de mantenimiento predictivo. Al

incrementar la eficiencia de producción hay un aumento en el beneficio para los empleados; se reduce la interacción con las máquinas para hacer mediciones en pleno funcionamiento, disminuyendo el riesgo de accidentes laborales; se atacan los paros no programados del equipo y así se reduce el nivel de estrés en el equipo de mantenimiento industrial; se crea la oportunidad de diseñar nuevos puestos de trabajo especializados dentro de la misma industria al aplicar la electrónica industrial con la ingeniería de datos. Finalmente, se abre el campo para más aplicaciones y un mayor desarrollo en el entorno industrial del país.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Diseñar un sistema embebido de muestreo, recopilación y despliegue de datos de vibraciones de un motor eléctrico situado en un entorno industrial y un modelo de mantenimiento predictivo basado en la condición del motor, utilizando los conceptos de internet de las cosas para facilitar el despliegue y almacenamiento de la información.

5.2. Específicos

- Determinar las restricciones físicas y lógicas que implican las características del motor a medir.
- Diseñar el sistema de recopilación de datos de vibración considerando el entorno al que sería sometido en la industria alimenticia.
- Proponer una forma estandarizada de recopilar los resultados de vibraciones del motor eléctrico.
- Proponer en el diseño un método para diagnosticar una falla en un motor utilizando los datos generados en el muestreo de vibraciones a lo largo del tiempo.
- Proponer en el diseño un modelo de generación de alarmas automáticas cuando la vibración de un motor eléctrico indique una potencial falla.

- Analizar los resultados de la solución propuesta en términos de costos y beneficios.

6. NECESIDADES PARA CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El enfoque de esta investigación es satisfacer las necesidades de mantenimiento que actualmente limitan el correcto diagnóstico y supervisión de motores eléctricos críticos en los procesos de producción y envasado de alimentos. La solución que se propone es básicamente conectar el estado de salud del motor con los encargados de mantenimiento para que puedan tomar acciones en base al estado de salud de sus equipos y puedan prevenir fallas que de otra manera no se hubieran podido detectar o predecir, la métrica que podrá servir de referencia para medir el éxito de los objetivos es lograr la visualización de las mediciones de vibraciones de manera remota y poco invasiva en los equipos. De manera que se reducen costos y se maximiza el número de observaciones.

En la industria del envasado masivo de alimentos, específicamente en nuestra región, es común hablar de conceptos como mantenimiento correctivo, y mantenimiento preventivo, uno busca erradicar una falla que ya se presentó y el otro busca prevenir fallas a través del cambio de piezas que se considera que son de desgaste. La industria tiene un nivel de madurez intermedio, la alta tecnificación de los equipos obliga a las plantas productoras de alimentos a mantener bajo control el mantenimiento, con el fin de mantener costos de producción razonables a través de la optimización de las eficiencias y asegurar la calidad del producto.

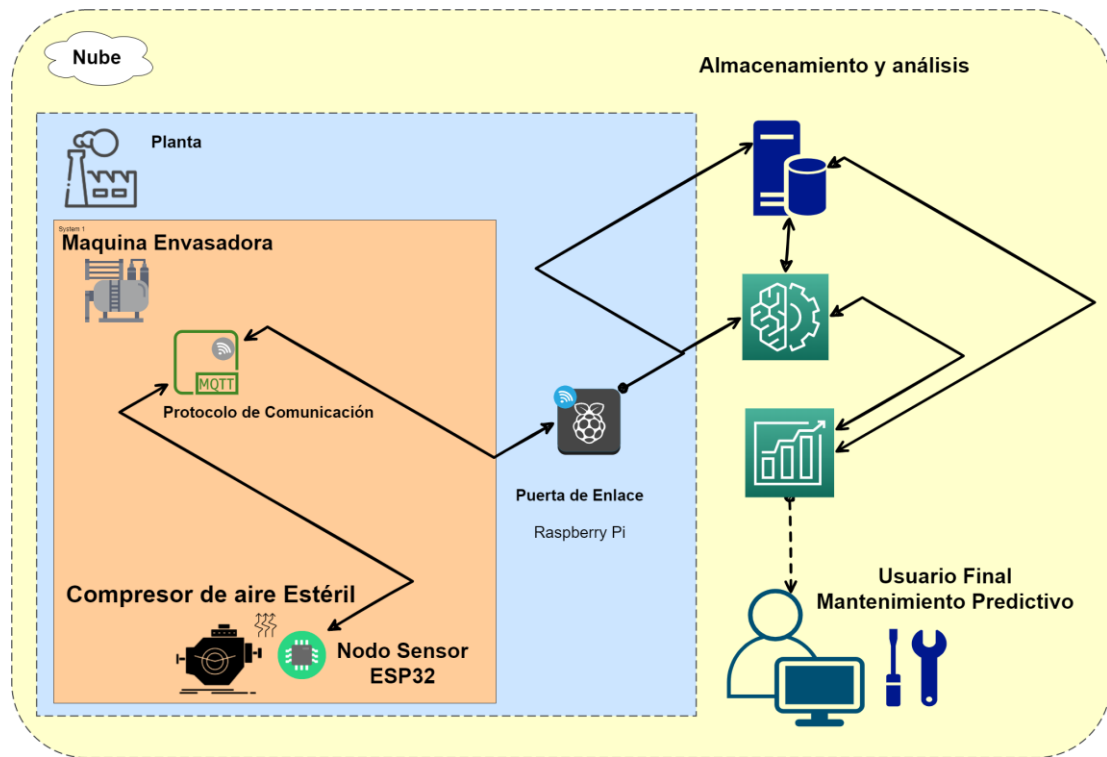
No obstante, en nuestra región no es común para la industria de alimentos, el hablar del mantenimiento proactivo, en donde la estrategia se basa en tomar determinadas acciones anticipando una potencial falla en los equipos. Por lo

tanto, surge la necesidad de aplicar técnicas de medición, para conocer de manera objetiva la condición de componentes difíciles de diagnosticar como, por ejemplo, los motores eléctricos, que accionan bombas, ventiladores, mecanismos rotativos entre otros procesos fundamentales en la industria de alimentos.

A través de la medición de las vibraciones mecánicas en un motor, y conociendo el mecanismo que activa, se puede realizar un análisis que provea un diagnóstico del mecanismo, de esta manera se puede conocer si se debe tomar alguna acción como revisión de los componentes del motor o bien, el cambio de piezas, para evitar una falla y por lo tanto un paro no planificado. Esta necesidad de medición, regularmente se cubre a través del uso de herramientas específicas como, por ejemplo, el medidor de vibraciones marca Fluke 810.

Este tipo de herramientas, realizan la medición de la vibración y posteriormente generan un reporte del estado del motor. El enfoque de esta investigación es proponer un sistema que realice continuamente la medición de la vibración y la almacene de manera remota, para el monitoreo en tiempo real de motores críticos, como por ejemplo compresores de aire estéril, los cuales son críticos en el proceso de envasado aséptico.

Figura 1. Esquema de la solución



Fuente: elaboración propia, empleando diagrams.net.

Se propondrá un sistema para la adquisición de datos de vibración de un motor eléctrico, considerando las restricciones físicas de un ambiente industrial de producción de alimentos, tales como temperatura, humedad y accesibilidad. Esto se logrará acoplado un acelerómetro al mecanismo de interés, el cual será manejado a través de un microcontrolador de tamaño reducido y de altas prestaciones como el ESP32, este conjunto de componentes electrónicos representaría un nodo de captura y transmisión de datos, para luego ser trasladados por medio del protocolo MQTT a una estación central como la Raspberry Pi Modelo B también conocida como el Gateway en una arquitectura simple de IoT, la Raspberry Pi se encargará de la recopilación de los datos, el almacenamiento por medio de una base de datos y también de proveer un

ambiente de monitoreo para que la persona encargada pueda hacer el monitoreo y revisión del estado del motor, la idea de hacerlo de esta manera sería la escalabilidad en caso de requerir más de un nodo de muestreo de datos.

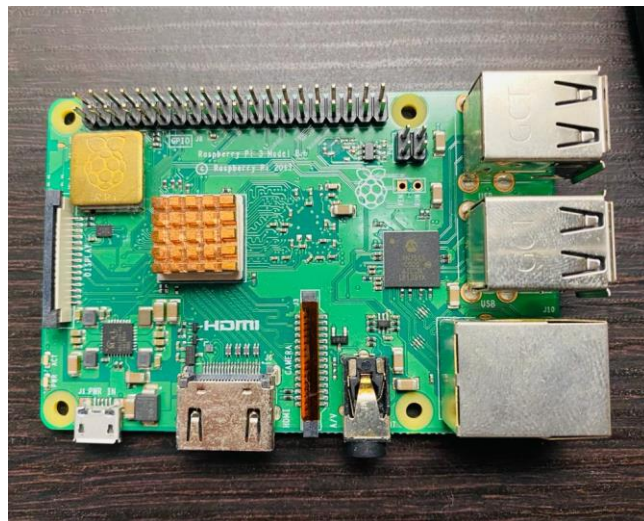
A través del análisis de datos de vibración, se hará una comparativa con el comportamiento básico del motor y se emitirá una alerta de posible falla. Para lograr de esta manera prevenir un fallo potencial. Esto se lograría por medio del análisis de variables como son la magnitud de la vibración y el espectro de frecuencia en donde se encuentran distribuidas las componentes de la vibración, de esta manera se puede profundizar en el diagnóstico certero de la condición del motor.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Sistemas embebidos

Un sistema embebido es un sistema computacional contenido en otro sistema más grande, dedicado a una o muy pocas tareas en un tiempo determinado, interactúa con su entorno físico mediante periféricos dedicados. En pocas palabras, es todo sistema computacional de propósito no general. En la figura 2 se puede observar una computadora en una placa, populares por estar en la línea divisoria entre un sistema embebido y una computadora de propósito general, ya que, frecuentemente son usadas para prototipar sistemas embebidos.

Figura 2. **Sistemas embebidos**



Raspberry Pi 3 modelo B+

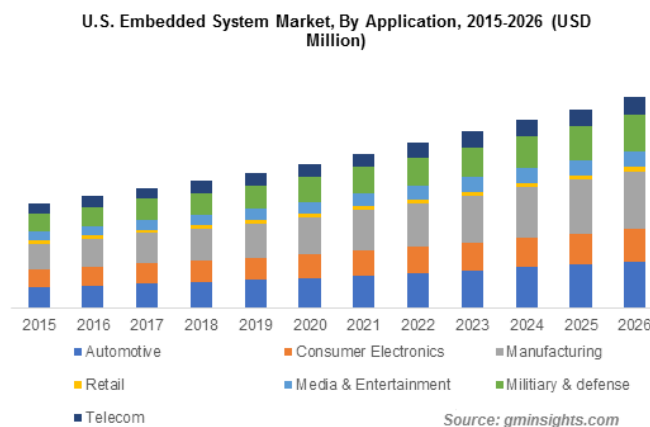
Fuente: [Fotografía de Carlos Daniel Oxom]. (Santa Lucía Milpas Altas, Sacatepéquez. 2021).
Colección particular. Guatemala.

A diferencia de una computadora personal, que se diseña de manera general para cumplir varias tareas dando la sensación de que se ejecutan al mismo tiempo, los sistemas embebidos se diseñan dependiendo de la tarea específica que van a ejecutar. No poseen sistemas operativos avanzados, principalmente, por su arquitectura y sus limitadas características. Suelen ser sistemas pequeños y de poco consumo eléctrico, permitiendo una gran portabilidad y relativo bajo costo.

7.2. Crecimiento económico de los sistemas embebidos

La electrónica de consumo ha sido una de las industrias con mayor crecimiento en las últimas décadas, para el año 2000, se estima que alcanzaba los 100 billones de dólares en Estados Unidos. Los sistemas embebidos son parte fundamental de estos dispositivos. En la figura 3 vemos el crecimiento del mercado de sistemas embebidos por tipo de aplicación.

Figura 3. Mercado de sistemas embebidos



Fuente: CEA (2009). *Mercado de sistemas embebidos*. Consultado el 8 de marzo de 2021.

Recuperado de https://web.archive.org/web/20090421040536/http://www.ce.org/Research/Sales_Stats/275.asp.

Para los próximos 10 años se espera que la industria automotriz, continúe su tendencia a desarrollar vehículos eléctricos autónomos, esto aumentaría la demanda de sistemas embebidos dedicados a esos propósitos.

Se estima que, de la producción total de procesadores o CPU en el mundo, cerca del 0 % es dedicado a computadoras de propósito general, lo demás es dedicado a sistemas embebidos. Al punto que hoy en día es difícil imaginar nuestra vida cotidiana sin la interacción con estos sistemas.

El aumento en el consumo de dispositivos que utilizan sistemas embebidos ha marcado las tendencias en el diseño de estos para la industria automotriz, medicina, telecomunicaciones, industria y manufactura, aeroespacial y militar.

Dependiendo de cada aplicación, los sistemas embebidos pueden ser especializados en adquisición y procesamiento de señales, comunicación y transmisión, sistemas de tiempo real, gestión energética, entre otros. Esta misma tendencia empuja a la industria manufacturera para ir actualizando la tecnología que se implementa en las máquinas instaladas alrededor del mundo.

Por ejemplo, una llenadora de bebidas de hace una década utilizaba la comunicación CAN BUS para sincronizar y comunicar diversos dispositivos como sensores, variadores de frecuencia y dispositivos remotos, solo en determinadas conexiones consideradas críticas, se llegaba a utilizar una conexión ethernet, es decir que alrededor de la década del 2010, las máquinas aun usaban protocolos mixtos de comunicación. Hoy en día, las máquinas actualizadas, traen consigo una comunicación ethernet para todos los dispositivos de automatización que integran, es decir que la industria se mueve en la dirección de los desarrollos y avances tecnológicos, pero lo hace una o dos generaciones después, hasta que

los componentes son lo suficientemente confiables y baratos. Ya que el ciclo de vida de una llenadora de bebidas puede ser en promedio de 20 años.

7.3. Componentes de un sistema embebido

Para cumplir con la tarea fijada, un sistema embebido debe ser capaz de interactuar adecuadamente con el entorno físico en donde se empotra, las entradas o estímulos hacia este sistema, producen salidas mediante una secuencia lógica previamente estructurada.

Por ejemplo, para el control de humedad para una planta. La entrada del sistema puede ser el porcentaje de humedad del suelo, para que, según la lógica previamente programada, pueda controlar el riego de la planta a través de una válvula hasta conseguir el nivel de humedad deseada, a través de un lazo de control previamente diseñado, probado y analizado.

En general, los sistemas embebidos cuentan con tres componentes básicos, los cuales son, periféricos para interactuar con el entorno físico, entiéndase, ambiente, electricidad, comunicación o tiempo. Una secuencia lógica para procesar la información obtenida del entorno y realizar alguna acción específica, a esto le llamamos software embebido o firmware. Y por último una unidad de procesamiento central o CPU, que se encargará de realizar las operaciones lógicas que el firmware tenga contemplado.

Figura 4. CPU



Fuente: Chacos. (2018). *Cpu Intel*. Consultado el 8 de marzo de 2021. Recuperado de <https://www.pcworld.com/article/3254236/how-to-find-your-motherboards-spectre-cpu-fix.html>.

7.4. Unidad de Procesamiento Central (CPU)

La CPU provee la capacidad computacional para procesar datos. Los datos se conforman por las variables que el sistema utiliza para relacionar la secuencia lógica con la información obtenida del entorno.

Según la naturaleza del sistema embebido, la CPU puede variar en cuanto a arquitectura, prestaciones e incluso su precio. Esto, debido a que existen numerosos dispositivos con diferente capacidad y propósito para procesar datos, por ejemplo, los microcontroladores, los microprocesadores, que actúan como elementos electrónicos independientes, o bien, las tarjetas electrónicas de

propósito general o tarjetas madre, estas tarjetas poseen microcontroladores y/o microprocesadores, en una configuración tal, que permita la rápida implementación de sistemas embebidos y facilitar el aprendizaje, por ejemplo, el Arduino Uno o bien la Raspberry Pi (SoC y SbC, según su arquitectura).

Tanto los microcontroladores, como los microprocesadores, las SoC y SbC tienen una oferta muy amplia para el desarrollo de sistemas embebidos, generalmente varían en, precio velocidad de procesamiento, periféricos, memoria, o gestión de memoria, consumo de energía, tamaño del encapsulado entre otros. Esto hace que la aplicación a la que vayan a ser destinados sea un punto fundamental en la elección del dispositivo correcto.

Figura 5. **Microprocesador Intel Core i7**

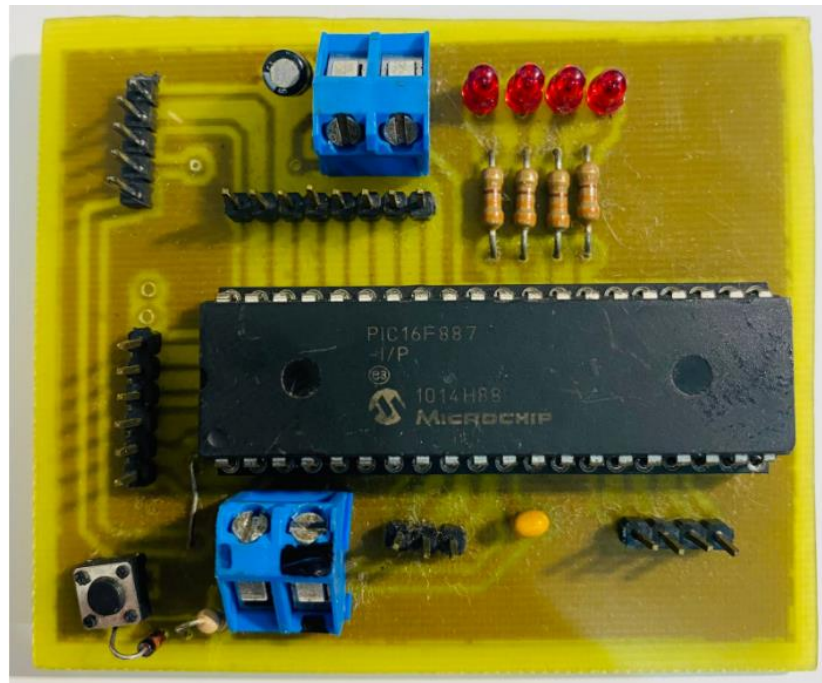


Fuente: 330 ohms (2020). *Diferencias entre un microprocesador y un microcontrolador.*

7.5. Microprocesador

El microprocesador es la opción más robusta por la gran flexibilidad para configurarse, éste cumple las instrucciones indicadas a través del programa, sin embargo, el diseño debe contemplar los elementos externos para que funcione correctamente, es decir periféricos, memoria de programa (ROM), memoria de acceso aleatorio (RAM) y fuente de reloj para definir la velocidad de ejecución, entre otros. El hecho de ser tan configurable hace al microprocesador como una opción robusta cuando el tiempo e inversión en diseño y desarrollo es justificable.

Figura 6. **Microcontrolador PIC16F887 en circuito dedicado**

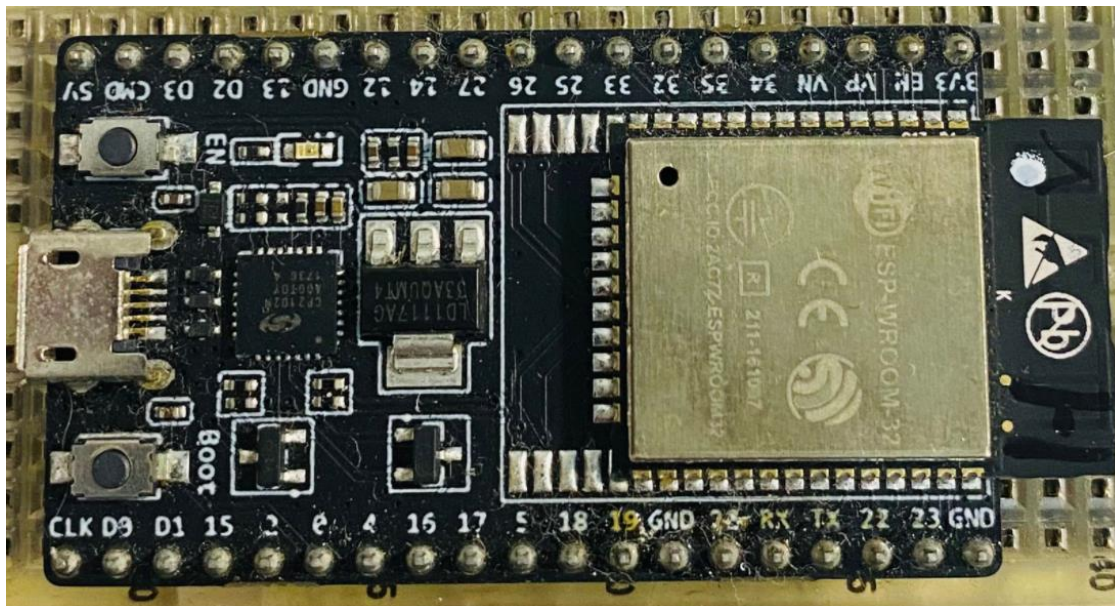


Fuente: [Fotografía de Carlos Daniel Oxom]. (Santa Lucía Milpas Altas, Sacatepéquez. 2021).
Colección particular. Guatemala.

7.6. Microcontrolador

El microcontrolador es una opción muy popular y conveniente, ya que contiene un microprocesador configurado con memoria, fuente de reloj y periféricos encapsulados en un circuito integrado. El tiempo de desarrollo se acorta en gran medida y esto hace que el proceso de implementación de un prototipo sea más rápido y barato. Sin embargo, sus características son fijas, esto puede llegar a ser una desventaja. Además, en una producción masiva, el costo del microcontrolador puede llegar a justificar la inversión en ingeniería para crear la propia solución a medida con un microprocesador.

Figura 7. ESP32 DevKit 1



Fuente: [Fotografía de Carlos Daniel Oxom]. (Santa Lucía Milpas Altas, Sacatepéquez. 2021).
Colección particular. Guatemala.

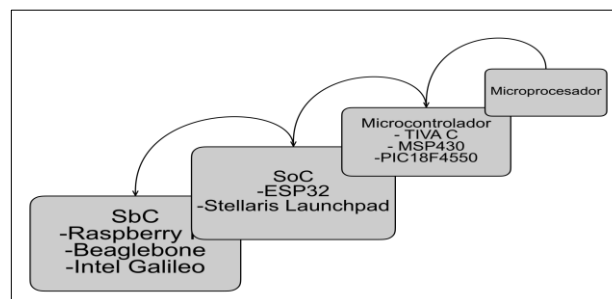
7.7. SoC (*system on chip*)

Los SoC, *System on chip*, sistema en una placa, por sus siglas en inglés, es un microchip que contiene todos los componentes y circuitos necesarios para un sistema dado, incluyendo fuente de alimentación, actuadores y sensores. Un ejemplo perfecto para SoC es la placa que controla un reloj inteligente. Están hechos a la medida de la aplicación.

7.8. SbC (*single board computer*)

Computadora en una placa, por sus siglas en inglés, se refiere a una computadora de uso general, integrada en una sola placa, es la contrapropuesta a la arquitectura de computadoras tradicionales, donde la tarjeta o placa madre (*motherboard*) se conectaba a placas separadas de video, comunicación y memoria. El ejemplo ideal para este tipo de CPU es la muy popular Raspberry Pi de Adafruit. Que ha llegado a popularizar el uso de este tipo de computadores debido a su bajo costo y flexibilidad para proyectos de computación y control embebidos, ya que prácticamente se tiene una computadora en el tamaño de una tarjeta de crédito.

Figura 8. Comparación SbC, SoC



Fuente: elaboración propia, empleando diagrams.net.

7.9. Periféricos

Un periférico es la interfaz entre el sistema embebido y su entorno físico, es decir que obtiene o agrega información de, o hacia el mundo exterior, los más comunes son los siguientes:

- GPIO, Entradas y salidas de propósito general
- Comunicación serial, como RS-485 o RS-232
- Interfaces de comunicación serial síncrona, como I2C, SPI
- Bus serial universal (USB)
- Conectividad Ethernet, WiFi, Bluetooth
- Bus de datos como CAN Bus, LIN Bus, Profibus
- Unidades de procesamiento de tiempo como PLL o temporizadores
- Entradas y salidas de propósito general (GPIO)
- Conversores analógico - digital, o digital - analógico

7.10. Firmware o software

El software para los sistemas embebidos se denomina firmware, es un código en lenguaje computacional que está hecho específicamente para el hardware donde va a funcionar. Una de las principales características del firmware es que no está pensado para que el ser humano interactúe por medio de una interfaz de un sistema operativo, a menos que la aplicación requiera desplegar información al usuario, el objetivo principal del firmware es interactuar con la máquina únicamente, dejando así, una interfaz limitada al usuario, aunque esto puede parecer una desventaja, muchos de los sistemas embebidos con los que un ser humano interactúa, están diseñados para no intervenir en su operación, tal es el ejemplo de los sistemas de frenado antibloqueo o ABS por sus siglas en inglés.

El firmware puede ser escrito en lenguaje ensamblador propio del controlador, ya que su estructura de instrucciones suele ser un set limitado de instrucciones (RISC, por sus siglas en inglés), o lenguajes como C, C++, recientemente se han desarrollado lenguajes de alto nivel para programar sistemas embebidos, tal como Python y JavaScript. Mientras más alto es el lenguaje de programación, menos eficiente es el uso de la memoria de programa en el microcontrolador.

Sin embargo, es un punto para considerar, ya que se puede acelerar el proceso de diseño e implementación y es ideal para hacer prototipos rápidos. El avance de la tecnología hace que cada vez la limitante de memoria se considere menos y esto hace más fácil y accesible el uso de microcontroladores.

En perspectiva con el proyecto planteado, una alternativa de rápido desarrollo es utilizar el entorno de desarrollo de Arduino, para realizar la programación lógica del nodo sensor. Esto permitiría desplegar mucho más rápido la investigación como una prueba de concepto y para validar los puntos de diseño que puedan ir surgiendo.

7.11. Internet de las cosas

El internet de las cosas es uno de los conceptos más escuchados en los últimos tiempos, que da la impresión de ser algo muy innovador, sin embargo, este concepto nació a finales de los 90's y se basa en una idea muy simple. Conectar objetos a internet, cualquier objeto cuyo propósito principal no sea de comunicación, sería dotado de capacidades para conectarse a internet y de esta manera abrir una nueva era en el uso de la tecnología para la interacción de las personas con su entorno.

Resulta pues, complicado pensar en simples objetos conectados a internet, pero basta con imaginar una cámara de fotografías familiares antigua, una radio, un teléfono tradicional, una calculadora, una computadora, todos estos juntos en un smartphone, y si, conectados a internet.

Otro ejemplo muy particular es el de los automóviles conectados a internet para llevarnos a nuestro destino, y dar con precisión una tarifa justa y además, poder compartir con los seres queridos la ubicación en tiempo real del transporte que tomamos, esta misma gama de posibilidades se abren en un entorno industrial, en donde, regidos bajo la premisa de que todo lo que se puede medir, se puede mejorar lo primero que viene a la mente es una amplia red de sensores y dispositivos que pueden ser monitoreados y controlados a través de internet.

7.12. Mantenimiento industrial

Mantenimiento es toda acción para preservar o restaurar un objeto, al punto de habilitarlo para ejecutar una función específica. Aunque el mantenimiento suele ser percibido como una serie de procedimientos técnicos ejecutados sobre un sistema u objeto, es importante notar que las acciones administrativas también juegan un papel fundamental para hacer eficiente el mantenimiento. Es por esto por lo que varias ramas de la ingeniería se dedican a estudiar este tema, desde el mantenimiento mecánico – industrial, que probablemente sea el más famoso, hasta las tácticas de mantenimiento a las bases de datos informáticos de un sistema bancario, por ejemplo.

No hay mantenimiento eficiente sin una administración adecuada, el mantenimiento predictivo pretende ser una herramienta para los administradores del mantenimiento, para bajar al máximo los paros no planificados por fallas súbitas.

7.13. Tácticas de mantenimiento

Según Muñoz (s.f.) la estrategia de la gestión del mantenimiento, se pueden clasificar los distintos tipos de mantenimiento, la línea más extendida en la filosofía de mantenimiento es la conservación del objeto o sistema, la cual pretende compensar el desgaste o deterioro sufrido por el uso regular.

También existen varias filosofías dependiendo el momento en que se hace dicho mantenimiento, estos son las más comunes:

- Basado en la falla
- Basado en tiempo de operación
- Basado en condiciones
- Proactivo o de prevención

7.14. Mantenimiento correctivo

También es conocido como mantenimiento basado en fallas, esta filosofía deja que el equipo opere hasta que se presente alguna falla, y se considera la reparación o cambio de la pieza dañada, justo antes o cuando el equipo se detenga. Esta filosofía funciona bien cuando el paro de los equipos no afecta la operación, o si los costos de labor y material no son relevantes. Este tipo de mantenimiento no se ajusta a la industria alimenticia, ya que un paro de línea supone un desperdicio de material de envasado y materia prima.

También se debe hacer uso inmediato de recursos destinados a este fin, como piezas de repuesto almacenadas en bodega o adquisición de recursos de emergencia, como asesoría técnica o piezas de emergencia. En un esquema industrial, este tipo de mantenimiento se considera como uno de los más

costosos, debido a que produce paros no planificados, que, en general producen desperdicio.

La desventaja que conlleva esta filosofía es que el departamento de mantenimiento se mantiene en un perpetuo manejo de crisis, lo cual aumenta la probabilidad de error humano, sin tomar en cuenta que se debe manejar un alto inventario de repuestos.

Sin ninguna duda, es la estrategia menos eficiente, y las reducciones de costos, terminan destinando a la compra de piezas baratas y mano de obra externa que termina de agravar los problemas por la falta de seguimiento.

Desde el punto de vista humano, el personal se observa con bajo rendimiento debido a grandes cantidades de tiempo extra trabajado y el estrés de regresar a producción suele ser de rutina. Desafortunadamente, a pesar de las muchas ventajas tecnológicas y administrativas de hoy en día, no es raro encontrarse con esta filosofía de mantenimiento en muchas industrias.

7.15. Mantenimiento preventivo

También conocido como mantenimiento basado en tiempo, su premisa es planificar las actividades de mantenimiento en una base de tiempo regular, o en intervalos definidos por horas de operación de los equipos, o bien, en el tiempo transcurrido. Un claro ejemplo son los ciclos de recambio de lubricantes en un automóvil. De esta forma, se reparan los componentes desgastados antes de que una falla específica ocurra.

Esta es una buena táctica para equipos que no operen continuamente, es decir, que cuenten con una ventana de tiempo para realizar los mantenimientos

y también, donde los técnicos tengan las habilidades y conocimientos necesarios para realizar las rutinas preestablecidas por experiencia, estadística de fallas de componentes o bajo un sistema arbitrario definido por los diseñadores de los equipos.

Las principales desventajas de esta estrategia es que las piezas pueden ser cambiadas muy temprano o muy tarde, también se tiene que disponer del equipo fuera de producción durante el tiempo que dure el mantenimiento.

7.16. Mantenimiento basado en condición

Finalmente, dentro del mantenimiento preventivo se encuentra el mantenimiento basado en condiciones, extensamente vendido como mantenimiento predictivo, que es el punto central de este trabajo. El mantenimiento predictivo toma ventaja de las tecnologías modernas de adquisición de grandes cantidades de datos y la alta conectividad electrónica que se tiene hoy en día. La idea de este tipo de mantenimiento es tratar de detectar condiciones inusuales y como resultado, predecir cuándo un equipo quedará fuera de servicio o bien, cuándo hay alta probabilidad de una falla grave.

Con este sistema, se busca programar la intervención en un tiempo conveniente y con un mejor manejo de los recursos destinados a este fin. En comparativa con el mantenimiento preventivo o programado, este tercer tipo de mantenimiento, implementado de la manera adecuada, supone ahorros, menos desperdicios por paros, y planificación de recursos, desde tiempo, producto procesado y personal.

Adicionalmente, se evita el sobre cambio de piezas, más bien se logra utilizar e identificar el tiempo de vida de determinados componentes que muchos

fabricantes dejan fuera de las garantías comunes en servicios de mantenimiento como lo son los motores y componentes eléctricos.

En resumen, el mantenimiento predictivo se plantea como una forma más eficiente de ejecutar los recursos destinados para este fin.

7.17. Monitoreo de condiciones

Se puede definir la vibración como el movimiento vaivén de una máquina o elemento en ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio. Generalmente, las vibraciones son causadas por problemas mecánicos como desequilibrio de sus elementos rotativos, desalineación en acoples, desgaste rodamientos y engranajes dañados o gastados, problemas con lubricantes, por mencionar algunos. Estas causas, como se puede suponer, son fuerzas que cambian de dirección o intensidad y difieren del movimiento normal de una máquina, sin embargo, se pueden llegar a clasificar haciendo el análisis del comportamiento y las características de la vibración.

Las vibraciones se pueden analizar observando el comportamiento de la aceleración del cuerpo, velocidad, desplazamiento y energía de los impulsos.

7.18. Medición de las vibraciones

Para medir las vibraciones existen una amplia gama de dispositivos para este propósito. Dependiendo de la aplicación final se considera el uso de determinado tipo de sensor, por ejemplo, existen acelerómetros, sensores de velocidad, sensores de proximidad entre los más comunes, también hay métodos no invasivos como el uso de láser para medir variaciones en la distancia desde el sensor hasta la pieza observada y también amplificadores de ruido mecánico

con el que también se puede llegar a percibir algún tipo de vibración mediante el oído.

En el caso de este trabajo de graduación se empleará un acelerómetro capacitivo, el cual, en un empaquetado de silicio muy pequeño, contiene tres pares de placas conductoras, paralelas a los ejes x, y, y z. Estas placas están sumergidas en un dieléctrico, para que cuando una fuerza mecánica mueva el sensor, éste logre mostrar las variaciones de capacitancia entre las placas. Mostrando así el valor de aceleración por medio de una señal analógica o bien por medio de transmisión serial en los sensores más modernos. Este tipo de sensores pueden llegar a medir hasta 4 milímetros, tamaño adecuado para incluirlos en un motor sin ser invasivos.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Mantenimiento Industrial

1.1.1. Mantenimiento Correctivo

1.1.2. Mantenimiento Preventivo

1.1.3. RCM y Mantenimiento Predictivo

1.1.4. Monitoreo de condiciones

1.1.4.1. Análisis de Vibraciones

1.2. Sistemas embebidos

1.2.1. Hardware

1.2.2. Software

1.2.3. Firmware

1.3. Internet de las Cosas y ciencia de los datos aplicada

1.3.1. Sistemas basados en la nube

1.3.2. Soluciones en sitio

1.3.3. Modelos de detección automática de fallas

2. ANÁLISIS DE LA MÁQUINA A MONITOREAR
 - 2.1. Análisis electromecánico de la máquina a monitorear
 - 2.1.1. Análisis Eléctrico
 - 2.1.2. Análisis Mecánico
 - 2.1.3. Fuentes de vibración
 - 2.1.3.1. Requerimientos mínimos del sensor de vibraciones

3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN
 - 3.1. Diseño de hardware
 - 3.2. Diseño de Firmware
 - 3.3. Diseño de Red y Conexión a Internet
 - 3.4. Esquema General

4. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de investigación

Este proyecto se basa en aplicar las técnicas y tecnologías emergentes para solucionar problemas comunes en la industria de manufactura desde la perspectiva de la ciencia de datos, en combinación con la electrónica y ciencias de la computación. Su carácter es exploratorio, ya que se busca explorar la combinación de técnicas de estos tres campos para solucionar un problema a nivel industrial y así ahorrar recursos y maximizar la disponibilidad de los equipos de producción, no se influye en las variables del fenómeno a estudiar, por eso se considera que la investigación es de tipo no experimental. Los datos que se obtienen son numéricos, que, a su vez, describen el estado del motor medido en cuanto a su condición de operación, por esto se considera que las variables del estudio son cualitativas y cuantitativas.

La investigación cualitativa es generalmente aplicada a las ciencias sociales, no obstante, en la industria, donde se combinan elementos que tienen como objetivo mejorar la eficiencia y el evitar paros no planificados, es el enfoque que se aplica al realizar un estudio detallado de las cualidades que originan el problema y presentar las soluciones respectivas.

9.2. Diseño de la investigación

El enfoque de la investigación se centra en el diseño de la solución del sistema IoT como un todo, tomando en cuenta las condiciones de las máquinas a medir, su accesibilidad, factores del ambiente, la estructura de software y

hardware y su interacción lógica por medio de protocolos aplicados a través de la programación; el objetivo general es diseñar un sistema de embebido de muestreo recopilación y despliegue de datos de vibraciones del motor eléctrico de un compresor de aire estéril y un modelo de mantenimiento predictivo basado en la condición del motor.

Todo esto para establecer una guía de los pasos y consideraciones que se deben de tomar para implementar dicho sistema. Parte de la investigación también se centrará en proponer un conjunto de reglas lógicas y procedimientos matemáticos para facilitar la lectura de los resultados de las mediciones para el usuario final, utilizando técnicas de procesamiento de datos que se consideren adecuadas para el propósito del análisis de vibraciones.

El diagnóstico predictivo de la falla del motor, tiene un impacto económico en el sistema de producción; si se desconoce en qué momento fallará un motor, no es posible contar con las piezas necesarias para ejecutar el cambio y corregir la falla, situación que provoca un paro no planificado que puede durar aproximadamente cinco días, en consecuencia, se ha integrado en el proyecto, realizar un análisis de la solución propuesta desde perspectiva económica que permita visualizar el impacto que este proceso tendrá.

9.3. Técnicas de recolección y análisis de datos

A pesar de que no es el fin último de la investigación, el diseño del sistema de captura de vibraciones utiliza métodos de recolección de datos, por medio de la medición directa a través de acelerómetros. Estos datos pasarían por un preprocesamiento en el microcontrolador de captura de datos, un ESP32, es decir, un chip SoC de bajo costo y consumo de energía, con tecnología Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integrada, que incluye interruptores de antena, balun

de radiofrecuencia, amplificador de potencia, amplificador receptor de bajo ruido, filtros, y módulos de administración de energía.

Estos datos preprocesados se enviarán a un SbC (Computadora de placa única) como una Raspberry Pi para aplicarle un procesamiento de datos que permitan conocer el comportamiento de la vibración en el espectro de la frecuencia y posteriormente se almacenen en una base de datos que pueda ser visualizada fácilmente, estas últimas dos etapas, se colocarían en la nube.

Para el procesamiento de los datos se utilizarían técnicas como transformada rápida de Fourier o FFT, que es una herramienta fundamental en el procesado digital de señales, así como análisis temporales de los resultados de las vibraciones para hacer comparaciones y generar alarmas automáticas. El análisis de los datos, por su parte, sería realizado por el experto en vibraciones de máquinas, con la ayuda de la información desplegada por el dispositivo diseñado.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El análisis de las vibraciones es una técnica de mantenimiento industrial que ha sido utilizada desde tiempos previos a la digitalización o el desarrollo tecnológico de la computación. De hecho, cuando en el tráfico, comenzamos a escuchar un ruido extraño en nuestro vehículo, no estamos haciendo más que percibir las ondas sonoras transmitidas a través de la estructura del carro, que provienen de una fuente de vibración en la mecánica del automóvil, y que, sin temor a la equivocación, se relacionan a una falla inminente o bien a una condición fuera de lo normal en el vehículo.

A pesar de esto, para este estudio, no se dedicará el esfuerzo en aplicar alguna técnica novedosa en el tratamiento de los datos de vibración, se tiene un enfoque exploratorio, debido a que el problema se aborda de manera de poder visualizar los datos de vibración utilizando tecnología actual para este propósito, haciéndola visible y automatizando la medición para obtener una tendencia a lo largo del tiempo, es por esto que el alcance del tratamiento se basará en cómo se muestrean los datos de vibración, el tratamiento primario que obtienen, cómo se almacenan y finalmente el despliegue de los datos.

10.1. Adquisición de datos

Al ser el objeto principal de estudio, la vibración se mide colocando un dispositivo sensor en el objeto a medir, la instalación se hace de manera que se puedan tomar mediciones automáticas, por lo que es prudente considerar el uso de placas atornilladas, adhesión por medio de pegamentos especiales entre otros.

Considerando siempre medir lo más cercano a los rodamientos del motor ya que estos son los puntos donde el desgaste se presenta en una máquina rotativa según su diseño.

10.2. Tratamiento de datos

A través del sistema embebido, se toman los datos de vibración, que, en principio estarán representados en unidades g haciendo referencia a la magnitud de la aceleración medida con respecto a la aceleración de la gravedad terrestre, estos datos se transfieren al microcontrolador a una tasa de transferencia adecuada, para poder realizar tantas mediciones como sea necesario para obtener un resultado válido.

Esta tasa de medición, la conocemos como frecuencia de muestreo, y debe cumplir con el teorema del muestreo de Nyquist, en donde se hace referencia a que, para que una señal pueda ser reconstruida en base a mediciones temporales, que, en este caso, debería ser la frecuencia más alta de vibraciones de interés, a la cual el sistema electromecánico estaría sujeto, la frecuencia de muestreo debe ser al menos, dos veces más rápida que la mayor de sus frecuencias.

Por esto, el primer tratamiento que se le hace a los datos recibidos de la medición física sería el almacenamiento en una tabla temporal en el microcontrolador.

Estos datos, estarían en unidades g relativas.

Posterior a esto, se procede a realizar una transformada rápida de Fourier, para enviar la información de las vibraciones, transformadas el espectro de la

frecuencia, hacia la computadora de placa simple como la Raspberry Pi, de esta manera funciona como un Gateway que se encargará de administrar la información y su conexión con la nube, para quedar almacenados los datos en el historial de vibraciones del motor.

10.3. Variables

La principal variable para medir en este estudio es la aceleración, físicamente es el dato que se obtiene, por el tipo de sensores que se pretende usar, la variación en la aceleración será entonces el dato de vibración obtenido desde el motor eléctrico. Dependiendo del enfoque del análisis mecánico, puede ser de interés el estudio de la aceleración, la velocidad o el desplazamiento que pueda ser medido en una máquina, sin embargo, estos datos se obtienen después de una serie de cálculos.

La aceleración, se obtendrá a partir de un acelerómetro, que funcionará como la conexión de nuestro sistema embebido con el sistema físico. La aceleración se puede expresar de varias maneras, sin embargo, va a interesar la aceleración en términos de la aceleración gravitacional, en la superficie de la tierra, por lo tanto, la medición primaria que se obtendrá pasará a la escala de las g, siendo 1 g, el equivalente a la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

Adicional, se obtendrán las revoluciones por segundo que el motor eléctrico realiza a plena carga para poder realizar los cálculos a partir de esta información.

La condición del equipo va a depender de estas variables directamente.

11. CRONOGRAMA

Tabla I. Cronograma

#	Actividades	Nov. 2021			Dic. 2021					Ene. 2022				Feb. 2022				Mar. 2022					Abr. 2022				
			3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4
1	Aprobación de Protocolo																										
2	Análisis final del sistema a medir																										
3	Verificación de requerimientos basicos																										
4	Investigación de servicios en la nube																										
5	Diseño general del sistema medidor																										
6	Diseño de componentes físicos																										
7	Diseño de componentes lógicos																										
8	Revisiones diseño con el Asesor																										
9	Correcciones																										
10	Montaje de prototipo																										
11	Gestiones para adquisición de datos																										
12	Adquisición y tratamiento de datos																										
13	Comunicación y control en la nube																										
14	Revisiones con el Asesor																										
15	Correcciones																										
16	Redacción del informe final																										
17	Revisiones finales con Asesor																										
18	Correcciones																										
19	Entrega Final																										
	Leyenda																										
	Actividades con Asesor																										
	Actividades con Escuela de Postgrado																										
	Actividades prácticas o de campo																										
	Actividades teóricas o investigación																										
	Actividades de informe final																										

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

En un entorno con recursos limitados, es de vital importancia conocer si la idea a ejecutar es factible o no, esto con el fin de tomar la mejor decisión en cuanto a dedicarle los recursos al estudio.

Un aspecto muy importante es que se debe diferenciar entre la factibilidad económica y la factibilidad técnica del proyecto, esto permite tener una visión clara de las limitantes del proyecto en general, en especial cuando se trata de implementaciones tecnológicas, es de mucha ayuda evaluar cómo unos cuantos megabytes de memoria eran trasladados en un avión de carga, o cómo las bases de datos se guardaban en tarjetas y luego en cintas magnéticas, para proyectar esas limitantes al futuro y diferenciar si el proyecto es factible, no factible, o bien hay limitaciones técnicas y económicas que, una vez superadas, significan una nueva fase en el campo de aplicación de la solución.

Para entender la factibilidad de este trabajo, se desglosan las actividades en tres etapas principales, la primera es el análisis de la máquina a medir para conocer sus características básicas, la segunda etapa es en el diseño de la solución, que abarca la integración de técnicas y tecnologías que permitirán alcanzar los objetivos, y la tercera es el análisis y presentación de resultados.

Teniendo a vista los recursos que se necesitan para la implementación de estas tres etapas, se perfila el proyecto como de integración de soluciones, en donde hay recursos materiales y económicos necesarios para realizar la investigación, pero es mínimo, en comparación con la inversión de recursos no económicos. En contraste, el beneficio de una buena aplicación de los objetivos

sería la detección de una falla potencial y por consecuencia, la toma de acciones para evitar que esa falla ocurra.

12.1. Análisis del costo – beneficio

El motor que se pretende monitorear forma parte de la sección aséptica de una llenadora de bebidas industrial para el consumo masivo, esta llenadora produce 24,000 envases por hora, cada envase con un volumen de 200 ml. En caso este motor llegara a fallar súbitamente, por previas experiencias se tienen dos escenarios de tiempo de restauración de la falla; cuando existe repuesto en sitio, cuando no existe repuesto en sitio. Para el primer escenario, el tiempo de restauración de falla es de 18 horas aproximadamente, para el segundo escenario hay un tiempo estimado de más de 96 horas por los trámites de importación del país.

Se podría calcular fácilmente un costo por tiempo de paro así:

$$C_{\text{paro}} = 24,000_{\text{envases/hora}} * \text{Costo}_{\frac{Q}{\text{envase}}} * (\text{Tiempo de Paro}_{\text{horas}}) \text{ Quetzales (Ec. 1)}$$

Al ingresar valores hipotéticos a esta fórmula, se obtienen valores altos que hacen pensar que la implementación del monitoreo de vibraciones en un motor tan crítico es de vital importancia, y sobre todo es factible.

Por el lado técnico, se pretende utilizar el microcontrolador ESP32, que es un microcontrolador de altas prestaciones y de bajo costo que integra características novedosas para un dispositivo de ese tipo, como por ejemplo conexión Wifi y Bluetooth. Al contar con varios núcleos, el microcontrolador posee alto poder de procesamiento que le permitirían procesar las señales externas de manera adecuada para monitorear el motor. Para este caso especial se tiene

factibilidad técnica y económica para la implementación del tema central del protocolo.

12.2. Recursos monetarios

El trabajo propuesto requiere una cantidad de recursos monetarios para la etapa de investigación, las herramientas y espacio de trabajo son propiedad del autor, la estimación del costo adicional se detalla en la tabla II.

Tabla II. **Recursos monetarios**

Artículo	Precio
1 Raspberry PI 3 B+ kit	\$ 50.00
2 ESP32 DEV KIT	\$ 20.00
3 LIS3DH Acelerómetro	\$ 25.00
4 Herramientas y accesorios	\$ 50.00
5 Varios	\$ 150.00
Total	\$ 295.00

Fuente: elaboración propia.

12.3. Recursos no monetarios

La mayoría de los recursos necesarios para realización de esta investigación son recursos no monetarios, dado que será el tiempo invertido en el análisis de la integración, lo que hará el mayor volumen de recurso no monetario.

Otro aspecto para considerar dentro de los recursos no monetarios es el uso de herramientas especializadas de propiedad del autor, tales como

multímetro, computadora, fuente de voltaje, entre otros. Sin estas herramientas, alcanzar la meta del trabajo propuesto sería una tarea difícilmente alcanzable.

13. REFERENCIAS

1. 330 ohms (19 de noviembre, 2020). Diferencias entre un microprocesador y un microcontrolador. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://blog.330ohms.com/2020/11/19/diferencias-microcontrolador-microprocesador/>.
2. Aghenta, L. y Iqbal, M. (abril, 2019). Low-Cost, open source iot-based scada system design using Thinger.IO and ESP32 Thing. *Electrónica*, 8(8), 800-822.
3. Babiuch, M., Foltýnek, P. y Smutný, P. (2019). *Using the ESP32 microcontroller for data processing* (Tesis de licenciatura). Technical University of Ostrava, Chequia.
4. Bello, G., Constanza, N., García, B. y De Jesús, A. (febrero, 2018). Diseño y fabricación de un sistema experimental para la medición de vibraciones mecánicas: Estudio Analítico. *Verano de la Investigación Científica*, 4(1), 3220-3224.
5. Calleja, M. y Guasch, J. (2019). *Monitorización de sensores con Arduino utilizando el protocolo MQTT* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
6. Díaz, S. (s.f.). *Medición y Análisis de Vibraciones, Laboratorio Dinámica de Máquinas* (Tesis de maestría). Universidad Simón Bolívar, Colombia.

7. Gualotuña, E. (2016). *Medición y Análisis de Vibraciones Mecánicas en un bus de Transporte de Pasajeros y sus efectos en la Salud y el Confort mediante la norma ISO 2631* (Tesis de Maestría). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
8. Koene, I., Klar, V. y Viitala, R. (2020). *IoT connected device for vibration analysis and measurement HardwareX*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067220300171?via%3Dihub>.
9. Lara, F. (2019). *Utilización de Google Cloud para el almacenamiento y procesamiento de datos monitorizados remotamente* (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Superior de Linares, España.
10. Miranda, J. (2005). *¿Qué es el estudio de factibilidad en un proyecto?* [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/que-es-el-estudio-de-factibilidad-en-un-proyecto/>.
11. Moreno, F., Becerra, J. y Rendón, C. (diciembre, 2015). *Diseño de un sistema de análisis temporal y espectral para detectar fallas por vibración en motores eléctricos*. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24(38), 41-51.
12. Muñoz, B., (s.f.), *Mantenimiento Industrial*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>.

13. Quezada, A. y Torres, M, (2016). *Diseño de un sistema medidor de vibraciones para máquinas rotativas de 900RPM HASTA 84000RPM* (Tesis de licenciatura). Universidad del Valle, Bolivia.
14. Tsyarkin, M. (enero, 2017) Monitoreo de la condición del motor de inducción: técnica de análisis de vibraciones. *IEEE AUTOTESTCON*, 1(1), 1-7.