



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

UTN
IBARRA - ECUADOR

Facultad de
Posgrado

FACULTAD DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

**“SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y ALERTA TEMPRANA PARA
MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE ELEMENTOS ROTATIVOS EN PROCESOS
INDUSTRIALES BAJO I4.0”**

Proyecto del Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Magíster
en Ingeniería Mecatrónica mención Procesos Industriales

AUTOR: Ing. Byron Hernán López Cheza

TUTOR: MSc. Cosme Damían Mejía Echeverría

IBARRA - ECUADOR

2023



Facultad de
Posgrado

CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Como Director del trabajo de investigación con el tema: “**SISTEMA DE**

MONITORIZACIÓN Y ALERTA TEMPRANA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE ELEMENTOS ROTATIVOS EN PROCESOS INDUSTRIALES

BAJO I4.0”, trabajo que fue realizado por Byron Hernán López Cheza, previo a obtener la maestría en Maestría en Mecatrónica, Mención Procesos Industriales, doy fe de que dicha obra cumple con los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente en los tribunales para ser seleccionada oportunamente.

Ibarra, noviembre 24, 2022

C.: 1002641288

Director de tesis



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Posgrado

**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1002975751		
APELLIDOS Y NOMBRES:	López Cheza Byron Hernán		
DIRECCIÓN:	Ibarra. La Dolorosa del Priorato		
EMAIL:	byron22adx@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO:	NO	TELÉFONO MÓVIL:	0990777731

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y ALERTA TEMPRANA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE ELEMENTOS ROTATIVOS EN PROCESOS INDUSTRIALES BAJO I4.0”
AUTOR:	López Cheza Byron Hernán
FECHA:	29/10/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input type="checkbox"/> PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Magíster en Mecatrónica mención procesos industriales.
ASESOR / DIRECTOR:	MSc. Cosme Mejía

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 16 días del mes de mayo de 2023

EL AUTOR:

.....

Ing. Byron Hernán López Cheza



REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: POSGRADO - UTN

Fecha: Ibarra, 24 de noviembre de 2022

Byron Hernán López Cheza: “SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y ALERTA TEMPRANA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE ELEMENTOS ROTATIVOS EN PROCESOS INDUSTRIALES BAJO I4.0” / GRADO MAGISTER EN MECATRÓNICA MENCIÓN PROCESOS INDUSTRIALES.

DIRECTOR: MSc. Cosme Mejía.

El objetivo general de esta tesis fue: Diseñar un sistema de monitorización y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos en procesos industriales bajo I4.0, con la finalidad de reducir el riesgo de un mantenimiento correctivo.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Analizar las variables que intervienen en el normal funcionamiento de una bomba hidráulica para detectar un mal funcionamiento.
- Diseñar el sistema de monitorización y alerta temprana para elementos rotativos (Bombas hidráulica).
- Implementar el sistema de monitoreo y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos (bombas hidráulicas) en procesos industriales bajo I4.0.
- Validar el sistema de monitoreo y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos para la ejecución de pruebas de funcionamiento.

MSc. Cosme Mejía

Director

Ing. Byron Hernán López Cheza

Autor

DEDICATORIA

A mi esposa Gabriela, tu apoyo a sido fundamental, has estado conmigo inclusive en los instantes más difíciles, este proyecto es un logro más que lo hemos conseguido juntos, gracias amor.

A mis hijas Sofía y Karla quienes son mi alegría diaria y mi motivación para seguir preparándome día a día para guiar sus pasos a una vida de bien.

Byron

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional para cumplir mis objetivos personales y académicos.

A la Universidad Técnica del Norte, por darnos la oportunidad de seguir creciendo en nuestra vida profesional.

A los docentes de la Maestría de Procesos Industriales por compartir sus conocimientos, los cuáles me han permitido culminar con este anhelado objetivo.

A mi tutor, el MSc Cosme Mejía, por su dedicación y paciencia en el correcto desarrollo de este trabajo de titulación.

Byron

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS	II
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO I.....	15
2. EL PROBLEMA	15
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.2. ANTECEDENTES.....	16
2.3. OBJETIVOS	19
2.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
2.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.4. JUSTIFICACIÓN	19
2.5. JUSTIFICACIÓN	20
CAPÍTULO II	21
3. MARCO REFERENCIAL	21
3.1. MARCO TEÓRICO.....	21
3.1.1. GENERALIDADES DE LAS BOMBAS HIDRÁULICAS.....	21
3.1.2. BOMBAS CENTRÍFUGAS	22
3.1.3. MANTENIMIENTO	29
3.1.4. MANTENIMIENTO	30
3.1.5. TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	32

3.1.6.	MONITOREO DE LA CONDICIÓN.....	35
3.1.7.	INDUSTRIA 4.0.....	35
3.2.	MARCO LEGAL	37
3.2.1.	NORMAS DE SEGURIDAD GENERALES	38
CAPÍTULO III.....		40
4.	MARCO METODOLÓGICO.....	40
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	40
4.2.	ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	40
4.3.	PROCEDIMIENTOS (DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN).....	41
4.3.1.	FASE 1: INVESTIGACIÓN	41
3.3.2	FASE 2: DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y ALERTA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	50
3.3.3	FASE 3: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA.....	57
3.3.4	FASE 4: EJECUCIÓN DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	61
4.4.	CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y BIOÉTICAS	66
CAPÍTULO IV.....		67
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5.1.	RESULTADOS.....	68
5.2.	ANÁLISIS.....	72
5.2.1.	<i>ETAPA DAQ</i>	72
5.2.2.	<i>ETAPA IOT</i>	73
5.2.3.	<i>ETAPA APP MÓVIL</i>	73
CAPÍTULO V.....		74
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
6.1.	CONCLUSIONES	74
6.2.	RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....		76
7.	ANEXOS.....	79

ANEXO 1: DIAGRAMA DE BLOQUES	79
ANEXO 2: DIAGRAMA DE CONEXIONES	80
ANEXO 3: SCRIPS REFERENTES DEL FUNCIONAMIENTO.....	81
ANEXO 4: EVIDENCIA FOTOGRÁFICA	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diferentes tipos de bombas hidráulicas.....	21
Figura 2 Una bomba suministra energía a un fluido	22
Figura 3 Bomba Centrífuga y sus partes	23
Figura 4 fricción entre los componentes o las partículas contaminantes	24
Figura 5 Imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) de la micrografía de los materiales.....	25
Figura 6 Análisis de las superficies en los momentos de parada.....	25
Figura 7: Daño de la superficie de un elemento de un sistema hidráulico causado por los subproductos ácidos.....	26
Figura 8 Piezas mecánicas dañadas por cavitación	27
Figura 9 Clasificación del mantenimiento.....	29
Figura 10 Clasificación del mantenimiento.....	30
Figura 11 Termografía de un motor	34
Figura 12 Localización Universidad Técnica del Norte.....	40
Figura 13: Diagrama de bloques.....	51
Figura 14: Diagrama electrónica	52
Figura 15: Configuración de puerto MQTT	53
Figura 16: Configuración del servidor MQTT	54
Figura 17: Interfaz grafica para el diseño de la aplicación móvil.....	56
Figura 18: Interfaz de bloques para lógica de la aplicación	56
Figura 19. Conectores XRL para sensores.	57

Figura 20: PCB Moduladora de sensores	59
Figura 21 MAX31865	59
Figura 22 ADS1115 en el dispositivo.....	60
Figura 23 ESP32 en el dispositivo.....	60
Figura 24 APP móvil	61
Figura 25 Monitor serial de la etapa DAQ	62
Figura 26 Recepción de datos en el esp32 utilizando comunicación serial.....	62
Figura 27 Comprobación de conexión de internet y servidor MQTT	63
Figura 28 Visualización de datos en el servidor.....	63
Figura 29 App funcional.....	64
Figura 30 Conexiones internas del dispositivo ya ensamblado.....	67
Figura 31 Dispositivo exteriormente	68
Figura 32 Bomba ensamblada en un circuito hidráulico	70
Figura 33 Comparación de métricas.....	71
Figura 34 Pruebas de alertas	71
Figura 35 Comprobación de envío y recepción de datos.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de control y técnicas de mantenimiento preventivo	32
Tabla 2 Nomenclatura para utilizar para los requerimientos del sistema	42
Tabla 3:Listado de Stakeholders para el diseño del sistema de monitoreo de la presión arterial.	43
Tabla 4 Requerimientos de Stakeholders para el diseño del sistema de monitoreo de la presión alta.	43
Tabla 5 Tabla de Requerimientos del Sistema	44
Tabla 6 Requerimientos de arquitectura para el diseño del sistema	45
Tabla 7 Selección de hardware.....	47
Tabla 8 Tabla comparativa de sensores de corriente.....	47
Tabla 9 Tabla comparativa de sensores de temperatura.....	48
Tabla 10 Tabla comparativa de sensores de flujo	49
Tabla 11 Tabla comparativa de sensores de flujo	49
Tabla 12: Tabla comparativa de software	50
Tabla 13 Tabla comparativa desarrolladores APP	50
Tabla 14 Tabla de Alertas emitidas de acuerdo a los sensores	65
Tabla 15 Rubrica de cumplimiento de requerimientos	68

RESUMEN

La presente investigación contiene información recopilada sobre daños o fallas comunes en elementos rotativos que se presentan en la industria ecuatoriana, además de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, transmisión de información basada en la condición del equipo en tiempo real. En la cual se realiza un sistema de monitorización y alerta temprana para mantenimiento preventivo en elementos rotativos basada en la industria 4.0. con finalidad de reducir el riesgo de un mantenimiento correctivo. Para la implementación de sistema de monitorización se utilizó una bomba centrífuga perteneciente al laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte. La realización del proyecto inicia con la investigación sobre parámetros y evaluación de funcionamiento de un elemento rotativo, herramientas y elementos de medición para monitorización bajo I4.0, métodos de comunicación y transmisión de datos en tiempo real, donde se seleccionó las mejores opciones para la implementación del proyecto. El sistema se diseñó en base a la selección elementos y herramientas de medición y comunicación que mejor se adaptaron al tipo de elemento rotativo y a los parámetros que permiten determinar un mal funcionamiento. Además, se seleccionaron elementos y herramientas disponibles en el mercado nacional. Una vez diseñado el sistema se procedió con la implementación, donde se realizaron ajustes y correcciones, de acuerdo con los datos técnicos del equipo a monitorear. Una vez implementado el sistema se realizan pruebas de funcionamiento bajo distintas condiciones de trabajo del equipo monitoreado. Se comprueban que los datos obtenidos y transmitidos al dispositivo móvil se corresponden con los datos obtenidos manualmente.

Palabras clave: Monitorización, Bomba centrífuga, Mantenimiento, Industria 4.0

ABSTRACT

This research contains information collected on common damages or failures in rotating elements that occur in the Ecuadorian industry, as well as preventive and predictive maintenance strategies, transmission of information based on the condition of the equipment in real time. In which a monitoring and early warning system for preventive maintenance in rotating elements based on industry 4.0 is carried out. in order to reduce the risk of corrective maintenance. For the implementation of the monitoring system, a centrifugal pump belonging to the Mechatronics laboratory of the Technical University of the North was used. The realization of the project begins with the investigation on parameters and evaluation of operation of a rotating element, tools and elements of measurement for monitoring under I4.0, communication methods and transmission of data in real time, where the best options were selected for the project implementation. The system was designed based on the selection of elements and measurement and communication tools that best adapted to the type of rotating element and the parameters that allow determining a malfunction. In addition, elements and tools available in the national market were selected. Once the system was designed, the implementation proceeded, where adjustments and corrections were made, in accordance with the technical data of the equipment to be monitored. Once the system is implemented, functional tests are carried out under different working conditions of the monitored equipment. The data obtained and transmitted to the mobile device are verified to match the data obtained manually.

Keywords: Monitoring, Centrifugal pump, Maintenance, Industry 4.0.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

2.1. Planteamiento del problema

Los elementos rotativos son muy utilizados en la industria ecuatoriana, ya que están presentes en todo tipo de proceso productivo. Del funcionamiento de estos equipos depende la minimización del consumo energético, la optimización de los recursos y el incremento de la productividad, entre otros. Por ende, es importante que se encuentren en óptimas condiciones de funcionamiento.

Actualmente, el mantenimiento de estos equipos es realizado por el técnico de mantenimiento en base a un monitoreo manual, lo cual no garantiza que el equipo pueda fallar en el momento menos indicado causando paradas no programadas, lo que genera pérdidas económicas y productivas de muy alta repercusión. Adicionalmente, si los elementos rotativos no operan en excelentes condiciones generan un consumo energético muy elevado, además, se generan problemas graves que pueden afectar la seguridad del personal de una planta.

Por otra parte, el mantenimiento de bombas hidráulicas no es muy oportuno ya que son equipos que pueden estar operando las 24 horas del día, lo que hace difícil realizar un correcto mantenimiento preventivo. El costo de mantenimiento correctivo es muy alto. Entre los problemas más habituales se tienen:

- Fenómeno de la cavitación, que se manifiesta con la formación de cavidad en el líquido bombeado, está acompañada por vibraciones ruidosas y reducción del caudal.
- La bomba puede presentar daños internos, fallas de los sellos, rodamientos, entre otros. Disminución del rendimiento y erosión.
- Roturas en los accesorios instalados en los extremos (grifos, válvulas, etc.) debido a golpe de ariete.
- Problemas en el motor.
- Desequilibrio del motor.
- Control manual inadecuado.

En el mercado internacional existen equipos como el SEL-2411P que es un sistema compatible con SCADA, pre-configurado y autónomo para controlar y monitorear aplicaciones

de bombas de agua y aguas residuales. Es una solución sencilla para monitorear y controlar aplicaciones de vaciado y llenado de nivel de líquido, mas no para saber el estado del equipo en operación. El SEL-2411P cuenta con homologación UL, está diseñado para soportar entornos de agua y aguas residuales hostiles y viene estándar con recubrimiento protector para brindar protección contra atmósferas con presencia de vapores, líquidos o gases corrosivos. Las opciones de E/S flexibles, los protocolos de comunicaciones y los ajustes de estación simples permiten lograr una integración sencilla con aplicaciones nuevas o modernizadas. Su costo es elevado. Su precio en el mercado internacional varía de entre \$2900 hasta \$5000, dependiendo de la aplicación, el número de entradas y prestaciones. Para el mercado ecuatoriano el precio incrementaría en cuanto a los aranceles.

De acuerdo con lo anterior, a partir del presente trabajo de investigación se propone una solución más económica y eficaz utilizando recursos disponibles en el mercado local, además el uso de una aplicación para un fácil acceso a la información del equipo rotativo.

2.2. Antecedentes

(Hidalgo, 2016) realizó el diseño y la implementación de un tablero de control para la monitorización y control de flujo de un sistema de inyección de agua para la extracción de crudo en un pozo petrolero. El resultado obtenido es un sistema de control que cuenta con un PLC y un PanelView en tiempo real, que permite de manera eficaz realizar la monitorización del flujo de inyección de agua en el Pozo 012 del Bloque ATACAPI en la Provincia de Sucumbíos del Oriente ecuatoriano, siendo este proyecto ratificado por la empresa Proyectos Integrales del Ecuador PIL S.A.

(Inca & Patín, 2016) implementó un sistema de monitoreo y control con sensores, que hace posible que un invernadero se automatice, mediante la administración SNMP. La opción de control y monitoreo de datos se realiza mediante una red inalámbrica y un software de monitoreo que envía una alerta mediante un e-mail al usuario si existen cambios bruscos de climatización. El Sistema de Control se realiza mediante la utilización del Shield relé de 4 canales de 5V y sensores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo los que están encargados de recopilar toda la información de los cambios ambientales que suscitan en el lapso de un tiempo determinado y permite que se activen los elementos auxiliares que se encuentran en el invernadero. El control de parámetros ambientales de temperatura y humedad es un

servicio que contribuye a la optimización de tiempo y recursos en la producción del invernadero, de acuerdo a las necesidades del usuario.

(Salgado, 2019) realizó la implementación de sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) de un proceso de llenado de botellas, que consta de equipos industriales, comunicados por una red mixta que comprende protocolos de comunicación Ethernet y Modbus. Para la monitorización de los datos se utiliza un interfaz hombre-máquina diseñado acorde a los requerimientos del proceso, además se diseña una interfaz remota para visualizar la información en puntos con acceso a internet, mediante el equipo simatic iot 2040. Se obtiene como resultado una lectura en tiempo real de los datos en el sistema SCADA, aumento de la producción de botellas y visualización de datos en una plataforma web.

Según (López, 2019) una propuesta de solución para actualizar el modelo de monitorización de procesos, es una plataforma basada en Industria 4,0 para la monitorización de un proceso industrial, mediante la aplicación de Internet de las Cosas (IoT) con el protocolo de comunicación MQTT. El protocolo aplicado opera mediante una arquitectura cliente-servidor, utiliza comunicación sobre WebSockets y el transporte de mensajería se filtra por eventos de publicación/suscripción. El proceso industrial es controlado mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) y simulado en el software Factory I/O. La plataforma de comunicación consta de un bróker y dos clientes y su funcionamiento es demostrado mediante pruebas de funcionamiento y el análisis de tráfico de datos mediante la herramienta Wireshark. La plataforma de comunicación desarrollada a través del protocolo MQTT, permite una monitorización de procesos en línea mediante una página web, su utilización y aplicabilidad es sencilla, además posee características de escalabilidad, calidad de entrega, seguridad y sobre todo la comunicación en entornos restringidos.

(Montero & Trajano, 2019), realizaron una investigación sobre un “Sistema de manufactura flexible orientado a industria 4.0”, el objetivo fue analizar la influencia de las herramientas tecnológicas orientadas a Industria 4.0 en el incremento de la flexibilidad de un sistema de manufactura, en la que las tecnologías tanto de fabricación como de la información se han integrado para crear eficientes sistemas de manufactura, gestión y formas de hacer negocios, a través de tecnologías como integración vertical y horizontal, análisis de datos, nube y simulación, entre otras; sistemas que permiten automatizar los procesos de fabricación para alcanzar una mayor flexibilidad, así como atender de forma oportuna a las necesidades del mercado. En conclusión, la aplicación de nuevas herramientas tecnológicas para el desarrollo

de los sistemas de manufactura promueve al crecimiento de la industria nacional en conceptos de flexibilidad siendo un referente en cuanto a la investigación relacionada de estos temas.

Según (Luna, 2018), la implementación de un sistema de monitoreo para mantenimiento en equipos electrónicos en la compañía Sisamex, permitió encontrar áreas de oportunidad y optimizar tareas de mantenimiento autónomo. El reemplazo de los equipos electrónicos instalados en la maquinaria es uno de los principales costos en una empresa metalmecánica, **Sisamex** opera bajo un esquema de **Mantenimiento Productivo Total** (TPM), de modo que planteó como objetivo, buscar la forma de aumentar la durabilidad de los componentes electrónicos el mayor tiempo posible: temperatura bajo el funcionamiento del equipo electrónico; humedad; calidad de la energía; contaminación por partículas o del medio ambiente; y vibración general de la maquinaria. Luego de un análisis, los ejecutivos de la compañía decidieron desarrollar un sistema de monitoreo de indicadores como temperatura y humedad, para ver la tendencia en los dispositivos. El sistema consiste en utilizar una herramienta para el monitoreo de los controles lógicos programables y colocar sensores en las máquinas para monitorear los cinco factores que afectan a los componentes electrónicos. También se requirió un software adecuado y el desarrollo de ingeniería para el monitoreo de todo el sistema. Con el apoyo del área de tecnologías de la información de la compañía, el equipo creó una aplicación para poder monitorear el proceso desde dispositivos móviles. que a la larga representa beneficios en calidad y productividad.

(Díaz & Veloz, 2019), en este proyecto de investigación se realizó la vinculación de una máquina de embazado de alimentos mediante sistemas IoT, para cumplir con las tendencias de la nueva industria 4.0 que busca el fortalecimiento de sistemas ciber-físicos en la que la interacción humano-máquina sea en tiempo real gracias a las redes inalámbricas. Los sistemas de dosificación permiten crear un proceso de producción más eficientes gracias a la ayuda del IoT, y el protocolo MQTT que es uno de los mejores para este tipo de arquitecturas. Su distribución y escalabilidad son muy buenas al poseer un servidor llamado bróker que gestionarán la unión y procesamiento de los dispositivos que se conecten al servidor, y gracias a su sistema de encriptación e identificación propias del protocolo lo que lo hace con una alta interacción con el usuario y seguro para la transmisión y reenvío de datos.

(Bautista & Vinicio, 2018). propuso la implementación de un sistema de control de variables que elimine la manipulación en el proceso de mezclado de compuestos termoplásticos en la empresa “Plasticaucho Industrial”. El primer paso consistió en incluir en el proceso un

código de barras que permita calibrar de manera automática las variables que intervienen en el proceso de mezclado, luego se eliminó los elementos electromecánicos para pasar de un proceso manual a uno totalmente automático para posteriormente crear un sistema SCADA con el objetivo de tener información histórica y en tiempo real, finalmente se cierra el proyecto con la inclusión de un sistema IoT que permite tener acceso a la información del proceso en tiempo real y desde cualquier parte del mundo. La aplicación de industria 4.0, específicamente del internet de las cosas influyó positivamente en el seguimiento del funcionamiento de la mezcladora porque permitió mostrar datos en tiempo real con la utilización del módulo IoT, los mismos que pueden ser observados desde cualquier parte del mundo.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de monitorización y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos en procesos industriales bajo I4.0, con la finalidad de reducir el riesgo de un mantenimiento correctivo.

2.3.2. Objetivos específicos

- Analizar las variables que intervienen en el normal funcionamiento de una bomba hidráulica para detectar un mal funcionamiento.
- Diseñar el sistema de monitorización y alerta temprana para elementos rotativos (Bombas hidráulica).
- Implementar el sistema de monitoreo y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos (bombas hidráulicas) en procesos industriales bajo I4.0.
- Validar el sistema de monitoreo y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos para la ejecución de pruebas de funcionamiento.

2.4. Justificación

Para cualquier industria, los elementos rotativos son indispensables en un proceso productivo por lo que detectar fallas a tiempo se traduce en beneficios y ganancias.

En términos económicos, un fallo común del sistema rotativo puede costar cientos de miles de dólares y cuanto mayor sea el incidente puede traer costos de producción mucho mayores.

El desarrollo del sistema aportará una nueva perspectiva de la gestión del mantenimiento industrial, que permitirá predecir de forma real el momento en el cual será necesario realizar un mantenimiento preventivo.

La implementación de un sistema de monitoreo y alerta de mantenimiento preventivo del funcionamiento de un elemento rotativo permitirá reducir el desgaste del personal humano quienes realizan rondas manuales para adquirir datos y evaluar el estado de los equipos. El sistema permitirá definir con anticipación los equipos y repuestos que son necesarios para prevenir la paralización de un proceso productivo, por lo tanto, este sistema permitirá la disminución de stocks de repuestos. Así mismo, aumentará la fiabilidad y disponibilidad de la máquina y por lo tanto se incrementará la productividad de los procesos.

Finalmente, el desarrollo de este proyecto no solo permitiría al investigador afianzar los conocimientos de llevar a cabo un buen mantenimiento de elementos rotativos, sino que serviría de base para desarrollar otros sistemas de monitorización para otro tipo de máquinas e incluso desarrollar nuevas herramientas del mantenimiento predictivo.

2.5. Justificación

La presente investigación es un proyecto a pequeña escala, donde se propone implementar un sistema de monitorización y alerta temprana para mantenimiento preventivo de un elemento rotativo, específicamente una bomba hidráulica, a fin de disminuir paradas no programadas o deterioro de los equipos. Para implementar el sistema es necesario el uso de sensores, bajo la aplicación de I4.0 a manera de tener acceso a la información del estado del elemento rotativo, desde una aplicación a tiempo real.

Para el correcto funcionamiento del sistema se debe tener en cuenta los siguientes aspectos puntuales dentro del proyecto:

- Actualmente existen una gran variedad de sensores electrónicos dependiendo del factor económico se elige el tipo de sensores que mejor se adapte con las necesidades de la aplicación, basado en I4.0.
- Los datos adquiridos se podrán observar en una aplicación desde un dispositivo móvil. Que brinde alertas de mal funcionamiento.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

3.1. Marco Teórico

3.1.1. Generalidades de las bombas hidráulicas

Una bomba (Figura 1) es un sistema mecánico que intercambia energía con el fluido que se contiene o circula en ella, es decir que es una máquina generadora que trabaja con un fluido incompresible en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica.

Figura 1

Diferentes tipos de bombas hidráulicas



Nota: En esta figura se observa diferentes tipos de bombas hidráulicas. Esta figura se la obtuvo en la página web realizada por Pérez J. , 2021

El propósito central consiste en transferir energía que permitirá su transporte en la instalación, lo que conlleva a un aumento de presión a la salida de bomba, relacionándose con el caudal que está transportando en forma de la curva característica (Cengel & Cimbala, 2018).

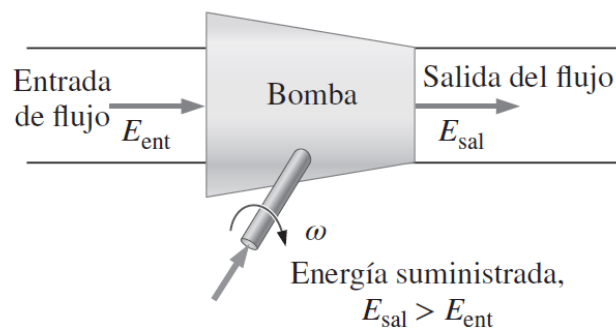
Esta curva característica es propia de cada bomba, y depende de su forma y principio de funcionamiento, de su tamaño, de la velocidad del accionamiento, Las bombas hidráulicas más usuales son las bombas rotodinámicas o turbomáquinas y los de desplazamiento positivo o volumétricas. (UPCGRAU, 2018).

Se puede afirmar, sin más pretensión que ser objetivos, que son contados los procesos industriales en los que esté implicado un fluido que no utilice alguna de estas bombas. Una

bomba rotodinámica es una máquina generadora que comunica energía al fluido a su paso por uno o varios rodetes, rotores o impulsores, incrementando su cantidad de movimiento, pero sin un cambio apreciable en su densidad (UPCGRAU, 2018).

Figura 2

Una bomba suministra energía a un fluido



Nota: En la figura se puede ver como la energía se les debe suministrar, y transfieren la mayor parte de esta energía al fluido, por lo regular, mediante una flecha rotatoria. Esta imagen fue tomada del libro de Mecánica de fluido de Cengel & Cimbala, 2018.

Según la dirección del flujo en el rodete (Figura 2), estas bombas pueden clasificarse en centrífugas o radiales, axiales y de flujo mixto. Las bombas volumétricas son ingenios mecánicos que transportan el fluido en forma de paquetes discretos que no interactúan entre sí. Esta forma de impulsión tiene una serie de consecuencias bastante evidentes: por un lado, interrumpe la vena fluida y, por tanto, la ecuación de la energía sólo se puede aplicar si se realiza un promedio temporal de sus términos; pero, por otro lado, favorece el transporte de fluidos viscosos a alta presión y hace que su caudal sea casi independiente de la presión a unas revoluciones dadas. Esta última circunstancia las hace muy indicadas en sistemas de transmisión de energía y de dosificación, sectores industriales en los que encuentran numerosas aplicaciones prácticas sin casi competencia (Pfleiderer, 2018).

3.1.2. Bombas Centrífugas

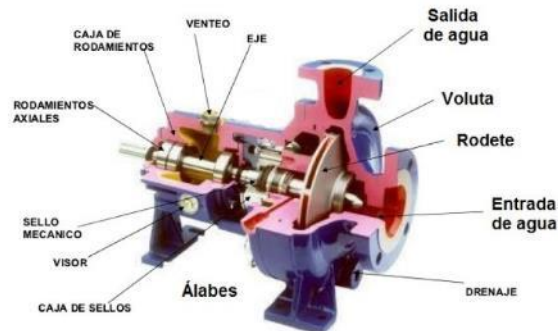
Una bomba centrífuga (Figura 3) transforma la energía mecánica de un impulsor o rodete en energía cinética o de presión de un fluido incompresible con lo cual convierte la energía con la que es accionada, es decir de energía mecánica a energía hidráulica.

Este tipo de bomba sirve para trasegar líquidos a través de la energía hidráulica que genera la bomba centrífuga. Generalmente son usadas para provocar que una corriente de agua fluya.

En el mundo hay muchos sectores industriales que necesitan usar bombas centrífugas en sus procesos mecánicos. Unos de los sectores que más lo usan son la industria química, la industria cosmética para el desarrollo de cremas o la industria alimentaria para la elaboración de todo tipo productos (UPCGRAU, 2018).

Figura 3

Bomba Centrífuga y sus partes



Nota: El grafico representa la bomba centrífuga y sus partes. Tomado de la Guía de Laboratorio de la Universidad Continental, 2017.

Contaminación

Los fluidos de un Sistema puede ser la responsable de la causa de varias fallas de cualquier componente de un sistema Hidráulico, ya que puede contener sedimentos o partículas que pueden contaminar los mecanismos, por ende, es esencial llevar el control de estas partículas para alcanzar la operación de un sistema a largo plazo.

Algunos expertos en el área consideran que el 75% de los fallos del sistema son un resultado directo de la contaminación en los sistemas con fluidos como aceite, agua y aire. Además, se estima que el 50% entra a través de los sellos del actuador y el respiradero del tanque (Soto, 2021).

En los diferentes fluidos anteriormente mencionados también contienen altos niveles de contaminantes. Y además de ello el sistema mismo crea partículas de material que forman la contaminación. A continuación, se muestran los diferentes tipos de desgaste por partículas:

Desgaste abrasivo.

Este es un mecanismo de desgaste primario (Figura 4) y la forma en que la mayoría de la gente se imagina como se inicia la contaminación. La fricción entre los componentes o las partículas contaminantes son la principal causa de este fenómeno. Las partículas duras entre dos superficies móviles interaccionan mecánicamente desgastando una o ambas cosas (Soto, 2021)

Figura 4

fricción entre los componentes o las partículas contaminantes



Nota: Las partículas duras entre dos superficies móviles interaccionan mecánicamente desgastando una o ambas cosas. Gráfico extraído de la página blog.parker.com de Soto, 2021.

Desgaste erosivo:

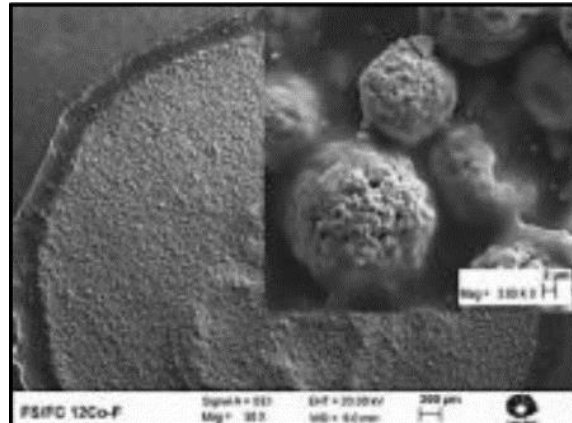
Este es un problema muy común e inevitable que se presenta en la acción de diferentes operaciones de componentes hidráulico, útiles para la generación de energía (Reyes, MojenaI, Sagaró, & Camello, 2016).

Este se produce también por desgaste primario, que en el transcurso del trabajo realizado por el sistema destruye los componentes desde el nivel microscópico como se puede ver en la

Figura 5.

Figura 5

Imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) de la micrografía de los materiales



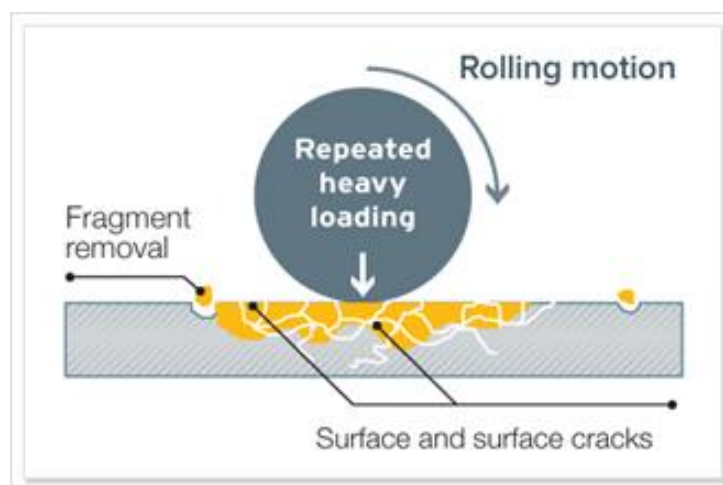
Nota: Este material depositado es HardKarb 12Co-F. Esta figura se extrajo del artículo científico sobre el Comportamiento del desgaste erosivo en recubrimientos depositados por la técnica de proyección térmica, por Reyes, MojenaI, Sagaró, & Camello, 2016.

Desgaste por fatiga

Las causas por el desgaste de fatiga se dan en la mayoría por el fallo de las superficies en contacto, ya que después de un cierto tiempo de trabajo, la microestructura superficial sufre microgrietas que debilitan su comportamiento como se muestra en la Figura 6 (Atten2, 2021).

Figura 6

Análisis de las superficies en los momentos de parada



Nota: las superficies en los momentos de parada deben ser minuciosamente examinadas. Esta figura fue extraída de la página principal de la empresa Atten2, 2021.

Desgaste corrosivo

Este desgaste se produce por un ataque localizado debido a ciertos aditivos del lubricante, por ende, el desgaste depende de la acidez del fluido y la contaminación con otros (Altun, 2020).

Este fenómeno ocurre cuando la superficie de la máquina es dañada por un ataque químico, el cual es responsable del desgaste corrosivo puede ser líquido o vapor. El daño de la superficie suele ser por los subproductos ácidos por la degradación del lubricante como se lo puede ver en la Figura 7.

Figura 7

Daño de la superficie de un elemento de un sistema hidráulico causado por los subproductos ácidos.



Nota: Pieza dañada por lubricación deficiente y ajuste inadecuado. Esta figura se extrajo de la página web de NORIA, 2016

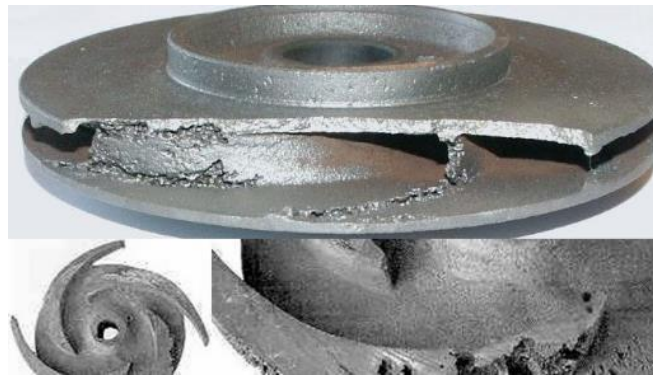
Cavitación

A la cavitación se la conoce como la formación y explosión de burbujas de vapor que se forman en el interior de la bomba en los que la presión cae por debajo de la presión de vapor del medio bombeado, y esto produce cuando la altura de aspiración neta positiva, que necesita la bomba no está disponible.

Este fenómeno puede afectar en las zonas al contacto del fluido con las superficies solidas de las bombas, lo que genera ligeros chasquidos y vibraciones, por la erosión de las partes mecánicas como se puede observar en la Figura 8 (GRUNDFOS, 2020).

Figura 8

Piezas mecánicas dañadas por cavitación



Nota: Erosión de las partes mecánicas en contacto directo con el fluido producida por cavitación. Esta Figura fue extraída de GRUNDFOS, 2020.

Localización de fallas

Muchas de las fallas y desperfectos en las bombas ocurren por una mala operación y puesta en servicio en condiciones inadecuadas; en este artículo se va a enumerar una serie de averías y sus posibles soluciones, así como los parámetros a verificar para detectar oportunamente la causa de la anomalía (bombascentrifugas.net, 2020).

La bomba no succiona

Primero se debe verificar que hay agua en el depósito de succión.

Verificar que la tubería de succión este completamente llena y no exista presencia de aire en la misma o en el cuerpo de la Bomba. En este punto es importante constatar el estado de la válvula de pie y el filtro si existiese, el mismo no debe poseer obstrucciones y la válvula debe aperturar y cerrar correctamente. Si faltase agua en la tubería de succión; las bombas vienen provista de una toma para cebarlas, retirar este tapón y agregar agua hasta que no salga aire y el agua se rebose, si la tubería no se llena se debe reemplazar la válvula de pie (Cengel & Cimbala, 2018).

Caudal insuficiente

Una de las causas más frecuentes en la disminución del caudal es la entrada de aire en la tubería de aspiración o a través del sello. Se debe realizar una inspección minuciosa para detectar posibles daños en la tubería o en los accesorios. Desmontar el sello y verificar posibles daños, si la bomba emplea empaquetaduras reemplazar los cordones si se observa fuga excesiva de fluido (UPCGRAU, 2018).

Sobre Carga en el Motor

En este punto tenemos una maquina funcionando fuera de los rangos de operación. Una de las soluciones para esto es estrangular la válvula de descarga para disminuir el caudal de la Bomba (bombascentrifugas.net, 2020).

Este punto de daño puede generar los siguientes daños:

- **Daños en el Impulsor.** el daño en los alabes del impulsor pueden ocasionar desbalanceo y vibraciones que afectan el normal funcionamiento del motor.
- **Daño en los rodamientos.** En este caso es necesario hacer una revisión de los rodamientos del motor, así como los de los de la bomba.

Pérdida constante de la ceba de la Bomba

Este efecto es causado por una válvula de pie defectuosa o daño en sellos o empaques, lo cual provoca fugas en la tubería de aspiración (bombascentrifugas.net, 2020).

Presión de la Bomba Insuficiente

Esto provoca daños en los álabes ocasionando una disminución de la capacidad de la Bomba, también hay un defecto en la entrada de aire en la tubería de succión o fuga excesiva en el área de impulsión (Soto, 2021).

Falla prematura de Sellos o empaques

Esta falla provoca un desbalanceo ocasionado por el impulsor, ocasionando el mismo efecto en los rodamientos o desalineación.

También puede provocarse por una selección inadecuada de los materiales del sello o Empaquetadura, el seleccionado es muy importante para garantizar la durabilidad del sello, se ha visto en algunas ocasiones el empleo de sellos con elastómeros de buna en bombas que manejan ácido acético con una durabilidad de unas pocas semanas.

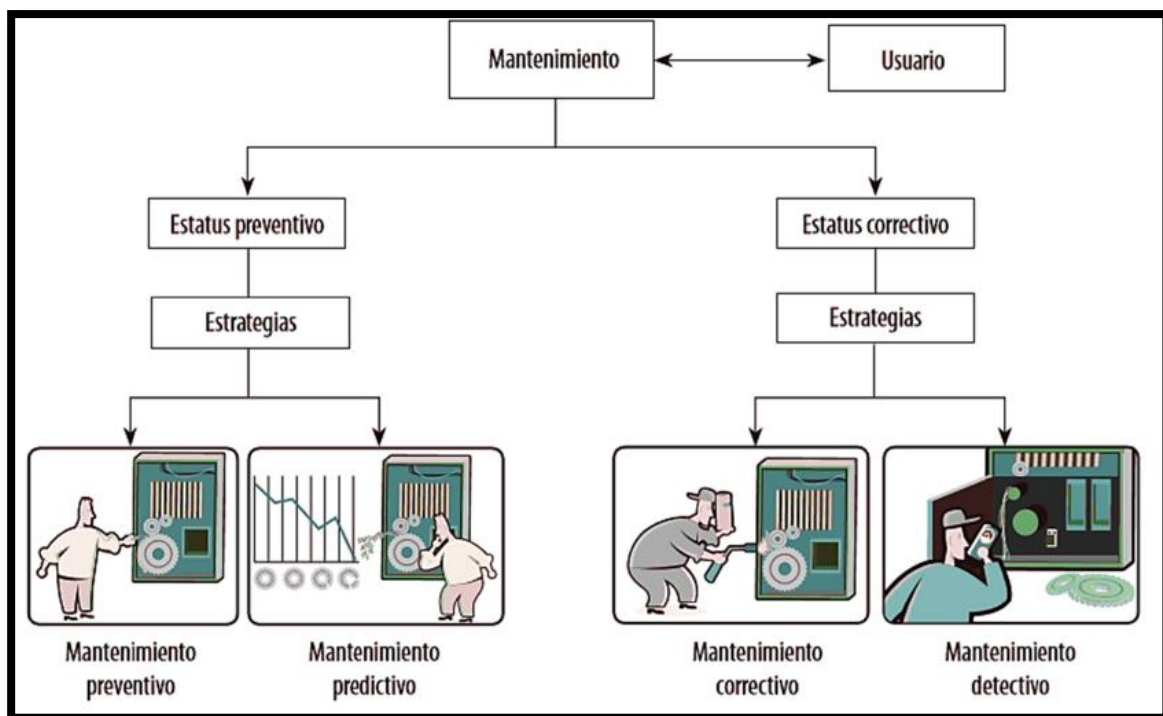
Otro efecto puede darse por la falta de lubricación, por ello es Verificar que la bomba no esté funcionando en vacío; si nos es lubricada por el mismo fluido verificar los anillos o tomas de lubricación y constatar su correcto funcionamiento (UPCGRAU, 2018).

3.1.3. Mantenimiento

El mantenimiento es esencial pues aparece de la necesidad que tienen las empresas de alcanzar el uso óptimo de sus equipos, para mantenerlos trabajando de forma continua y eficiente. Hay distintas formas de aplicar el mantenimiento (Medardo, Gonzales, & Diaz, 2017).

Figura 9

Clasificación del mantenimiento



Nota: en la figura se muestra la clasificación de los diferentes tipos de mantenimiento. Tomado de Garcia, 2010.

Mantenimiento preventivo

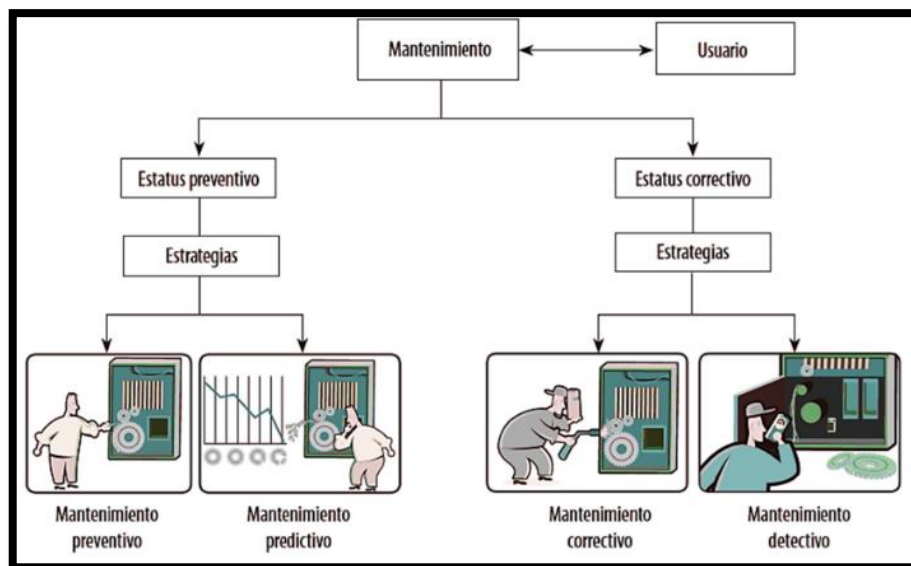
El mantenimiento preventivo es utilizado especialmente para la detección, mediante la eficaz planificación y programación de los análisis periódicos, las fallas pronosticadas en equipos, sistemas e instalaciones, que afectan el normal funcionamiento de un proceso de producción o el desempeño del equipo dañado. Este tipo de mantenimiento está enfocado en garantizar las mejores condiciones en la maquinaria (Olarte C. , 2010).

3.1.4. Mantenimiento

El mantenimiento es fundamental cuando las empresas requieren de un uso óptimo de sus equipos, para que los mismos permanezcan funcionando de forma continua y eficiente. Existen diferentes tipos de mantenimiento como se los puede ver en Figura 10, donde se divide en Preventivo y Correctivo, donde se desglosa algunos tipos que se ven a continuación (Medardo, Gonzales, & Diaz, 2017).

Figura 10

Clasificación del mantenimiento



Nota: en la figura se muestra la clasificación de los diferentes tipos de mantenimiento. Tomado de Garcia, 2010.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es comúnmente aplicado para detectar, a través de un vigoroso plan de los análisis periódicos, los defectos en máquinas, sistemas y establecimientos, que alteran el habitual funcionamiento de un proceso de producción o a su vez el rendimiento de la máquina dañada. La característica principal de este tipo de mantenimiento es asegurar las óptimas condiciones en la maquinaria (Olarte, Botero, & Cañon, 2010).

Mantenimiento predictivo

Este tipo de mantenimiento se lo conoce también como mantenimiento basado en la condición. Se fundamenta en ejecutar evaluaciones no invasivas, mediante el uso de herramientas en cada una de las partes que pudiera existir daños o deterioro, permitiendo predecir un defecto importante. Normalmente este tipo de inspecciones se realizan con las máquinas en funcionamiento y conservando la producción (Galvan, 2015).

Parámetros para control de estado

Son magnitudes físicas que pueden experimentar cambios reiterativos en su resultado, cuando la condición funcional de la máquina se ve modificada (Jasso, 2011). Son varios los parámetros que se pueden aplicar, mientras cumplan con las siguientes condiciones:

- Que sea sensible a un fallo específico.
- Que cambia debido a la aparición de algún defecto.
- Que el resultado siempre es el mismo.

Las técnicas empleadas en el mantenimiento preventivo se clasifican en dos grupos:

- **Técnicas directas.** – Verificación en elementos con posibles defectos, donde la más empleada es la inspección visual, aunque también se suele utilizar la inspección por líquidos penetrantes, por partículas magnéticas, ultrasonidos, análisis de materiales y la inspección radiográfica (Jasso, 2011).
- **Técnicas indirectas.** – Medición y análisis de cualquier parámetro que es relevante en el funcionamiento. La técnica mayormente empleada es el análisis de vibraciones, que se pueden emplear en conjunto con el análisis de lubricantes,

de ruidos, de impulsos de choque, medida de presión o de temperatura (Jasso, 2011).

En la siguiente tabla se enlistan los parámetros de control y técnicas de mantenimiento preventivo:

Tabla 1

Parámetros de control y técnicas de mantenimiento preventivo

PARAMETRO DE ANÁLISIS	TÉCNICA
Inspección visual	Uso de mirillas, endoscopios
Vibraciones	Análisis espectral y de tendencias
Presión, caudal, temperatura	Seguimiento de evolución
Ruido	Análisis del espectro
Degradación y contaminación de lubricantes	análisis fisicoquímico
Estado de rodamientos	Impulso de choque
Alineación	Laser de monitorización
Control de fuerza, torque y potencia	Extensométrica, torsiómetro
Velocidades críticas	Amortiguación dinámica

Nota: en la tabla se detallan las variables que se pueden analizar en una bomba hidráulica. Tomado de (Jasso, 2011)

3.1.5. Técnicas de aplicación para el mantenimiento predictivo

Cada técnica de mantenimiento predictivo abarca cierta área, donde su impacto es máximo. Además, es posible combinarlas para aumentar la capacidad de diagnóstico (Jasso, 2011).

La siguiente lista de equipos, propone diferentes técnicas de monitoreo para cada caso:

- Bombas centrífugas: inspecciones con los sentidos humanos, análisis de vibraciones, medición del rendimiento, medición de temperatura.
- Bombas hidráulicas: inspecciones con los sentidos humanos, medición de temperatura, medición del rendimiento, análisis de aceite.

- Cañerías: Medición de espesores, inspección visual y detección por ultrasonido de fugas.
- Tanques a presión: medición de espesores, prueba hidráulica, inspección radiográfica y por ultrasonido.
- Compresores de tornillo: inspección con los sentidos humanos, análisis de vibraciones, análisis de aceite termografía, medición del rendimiento, detección de fugas por ultrasonido.
- Motores eléctricos: análisis de vibraciones, termografía, mediciones eléctricas.
- Motores y compresores reciprocantes: inspecciones con los sentidos humanos, análisis de aceite, medición del rendimiento.

Técnica de inspección Visual

Consiste en examinar la máquina con cualquier sistema de observación, desde la simple inspección visual hasta el uso de microscopios y endoscopios. Es posible detectar defectos físicos, como fisuras, deterioro, mal acoplamiento de elementos de fijación, etc. (Jasso, 2011).

Técnica de líquidos penetrantes

Consiste en introducir un tinte especial sobre una superficie previamente limpiada, en donde se debe dar tiempo al tinte para que sea posible penetrar en zonas donde pueden existir defectos. Seguido a esto se limpia la superficie y se agrega un líquido absorbente, el cual elimina la tinta y muestra las fisuras y zonas de posibles defectos (Jasso, 2011).

Técnica de partículas magnéticas

Esta técnica no afecta al funcionamiento de la máquina, del mismo modo que la anterior. Su forma de empleo es inducir en un campo magnético a un material ferromagnético, para extender partículas magnéticas muy pequeñas, las cuales se guían por el flujo magnético. Es posible apreciar los defectos debido a las discontinuidades en la distribución de partículas (Jasso, 2011).

Técnica de inspección radiográfica

Normalmente es aplicada para el control de calidad en uniones soldadas, permitiendo detectar defectos internos como pueden ser fisuras, burbujas o impurezas. Su método de empleo requiere de una fuente radioactiva y una pantalla fotosensible a esta fuente, en donde se debe intercalar el elemento entre estos dispositivos (Jasso, 2011).

Técnica de ultrasonido

Comúnmente aplicado para detectar grietas, fisuras por fatiga, corrosión o fallos de fabricación. El ultrasonido se desplaza a través del material y es posible determinar la distancia del defecto, gracias al tiempo medido entre la emisión de la señal y la recepción del eco. Además, es posible estimar el tamaño de las grietas, permitiendo controlar el defecto. En la actualidad también se aplica para detectar fugas en sistemas de vapor, gas o aire (Jasso, 2011).

Técnica análisis de aceite

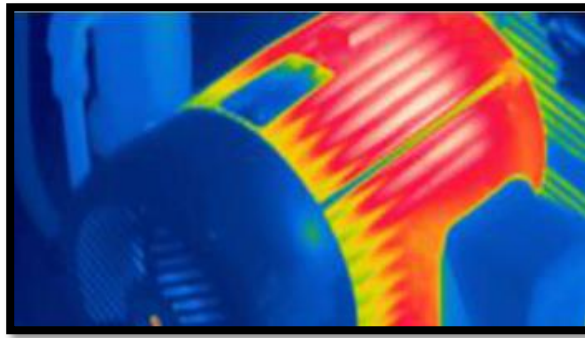
El análisis de aceite permite determinar cuando el aceite lubricante de la máquina requiere una intervención (Preditécnico, 2013). Esta técnica es capaz de determinar defectos como:

- *Degradación del lubricante.* - Con su estudio es posible determinar si es necesario o no realizar una sustitución del lubricante.
- *Desgaste de componentes.* – Con su estudio es posible identificar con anticipación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, obturaciones, etc.
- *Entrada de contaminantes sólidos y líquidos.* – Con su estudio es posible detectar la entrada de contaminantes sólidos en el sistema.

Técnica de termografía

La termografía (Figura 11) consiste en examinar la temperatura de la máquina y de este modo es posible determinar si la máquina está trabajando de forma correcta. Normalmente un aumento de la temperatura significa un defecto electromecánico en la máquina o en alguna parte específica (Olarte, Botero, & Cañon, 2010).

Figura 11



Nota: en la figura se muestra la termografía realizada a un motor eléctrico en funcionamiento.

3.1.6. Monitoreo de la condición

El monitoreo basado en la condición es aplicado para evaluar en tiempo real medidas físicas que pueden presentar defectos, de tal forma que sea posible predecir futuros fallos en la maquinaria, y de esta forma mantener un correcto funcionamiento en el equipo. Un mantenimiento mal planificado genera costos innecesarios, dado que un excesivo mantenimiento requiere el uso de tecnologías durante un mayor período de tiempo, y el escaso mantenimiento no permite preservar la vida útil de la maquinaria (Galvan, 2015).

Las tecnologías para el mantenimiento predictivo son muy variadas, y su selección depende de la clase de maquinaria, el tipo de defecto a detectar y la capacidad de inversión (Galvan, 2015).

3.1.7. Industria 4.0

La industria 4.0 se fundamenta en los sistemas de integración, el Internet de las Cosas (IoT), máquinas y sistemas autónomos, manufactura aditiva, inteligencia artificial, Big Data, etc., las cuales al trabajar de forma conjunta generan disrupciones importantes en la industria, además del comportamiento del consumidor (Basco, Beliz, Coatz, & Garnero, 2018).

La industria 4.0 se refiere a la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) en la industria. Los sistemas ciber-físicos (CPS) forman parte de la estructura del IoT, los cuales monitorizan los procesos físicos y son capaces de crear una copia virtual del mundo real y así aprender y evolucionar. Con la cuarta revolución industrial, se espera que las máquinas se comuniquen entre sí, para compartirse información y tomar decisiones adecuadas. Además, se prevé que el Internet de las Cosas (IoT) facilite el control de datos y la nube permita un almacenamiento de grandes cantidades de datos (Román, 2016).

Tecnologías básicas en que se sustenta la industria 4.0

La industria 4.0 se basa en tecnologías similares a las que un ingeniero informático está capacitado, lo cual lo convierte en el profesional más competente para esta etapa de la revolución industrial (Román, 2016).

Comunicaciones móviles

El Internet de las Cosas (IoT) se fundamenta en las comunicaciones móviles. La comunicación entre máquinas (M2M) y el etiquetado de objetos garantizan un ecosistema en el cual sistemas y productos pueden comunicarse entre sí. Gracias a esto, es posible almacenar datos, organizar los CPPS y aplicar los servicios de manera remota, en tiempo real y en cualquier lugar (Román, 2016).

La nube (Cloud Computing).

La nube es un servicio, normalmente de pago por uso, el cual engloba aplicaciones e infraestructuras mediante redes públicas o privadas. Los sistemas y productos inteligentes producirán un gran número de datos que deben ser almacenados y procesados, los cuales serán posible acceder de forma on-line desde cualquier lugar. La nube facilita el flujo de datos sin límites, además no requiere de infraestructuras para incrementar el espacio para almacenar la información (Román, 2016).

Análisis de Datos (Big Data)

El análisis de datos permite identificar información significativa para la empresa, la cual facilita la planificación y organización. De esta manera existirán mayores opiniones comerciales, además de tener una repercusión importante de carácter social, donde se comprenderá el comportamiento del cliente (Camargo, Camargo, & Joyanes, 2014).

Comunicación Máquina a Máquina (M2M)

La comunicación Máquina a Máquina M2M constituye la base del Internet de las Cosas (IoT). Permite la comunicación entre las máquinas que establecen la Industria 4.0. Gracias a estos datos de comunicación y recopilación de información, es posible realizar simulaciones de los productos y procesos de fabricación (Román, 2016).

Plataformas sociales

Las plataformas sociales cambiaron la forma de trabajo gracias a la velocidad de comunicación, además de ser global y permitir la relación de uno a muchos. La mejora de la comunicación será muy significativa, lo que permitirá a las industrias colaborar e innovar gracias al fortalecimiento de la información. Además, debido al gran uso de las redes sociales más conocidas y empleadas, será más fácil conocer al usuario y trabajar directamente bajo demanda (Román, 2016).

La impresión 3D (fabricación aditiva).

Se define como la fabricación de objetos tridimensionales en base a diseños digitales. No es muy común encontrar este tipo de fabricación en la industria, sin embargo, la fabricación aditiva aumentará la eficiencia en productos personalizados. Es posible realizar prototipos de una forma más rápida y sencilla, usando un servicio de impresión 3D (Román, 2016).

Robótica avanzada y colaborativa

Gracias a las innovaciones de la inteligencia artificial y de dispositivos sensoriales, es posible fabricar robots capaces de trabajar por si solos. El objetivo será que los robots sean capaces de trabajar juntamente con otros robots y con las personas, aprendiendo de los humanos para facilitar los procesos de fabricación (Román, 2016).

Realidad aumentada

La realidad aumentada no ha tenido un auge importante en la industria, sin embargo, se prevé que estos sistemas brinden información pertinente a los operadores para mejorar la forma en la que estos realizan su trabajo (Román, 2016).

Seguridad

La seguridad informática ha sido un pilar importante en la industria, y con el crecimiento de los sistemas de comunicación, es importante proteger todos los sistemas críticos y las líneas de producción. Para ello, se requiere de comunicaciones seguras y veraces, además de gestionar el acceso de los usuarios a las máquinas (Román, 2016).

3.2. MARCO LEGAL

3.2.1. Normas de seguridad generales

La implementación de acciones en seguridad y salud en el trabajo se respalda en el Art. 326, numeral 5 de la Constitución del Ecuador, en Normas Comunitarias Andinas, Convenios Internacionales de la OIT, Código del Trabajo, Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo, Acuerdos Ministeriales.

La Conferencia General de la Organización Internacional del Trabajo: Convocada en Ginebra por el Consejo de Administración de la Oficina Internacional del Trabajo, y congregada en dicha ciudad el 5 de junio de 1963 en su cuadragésima séptima reunión; la prohibición de la venta, arrendamiento y utilización de maquinaria desprovista de dispositivos adecuados de protección,

“Art. 1.- 1. Para la aplicación del presente Convenio, se considerarán como máquinas todas las movidas por una fuerza no humana, ya sean nuevas o de ocasión. 2. La autoridad competente de cada país determinará si las máquinas, nuevas o de ocasión, movidas por fuerza humana, entrañan un riesgo para la integridad física del trabajador y en que medida, y si deben ser consideradas como máquinas a los efectos de la aplicación del presente Convenio. Estas decisiones se adoptarán previa consulta a las organizaciones más representativas de empleadores y de trabajadores interesadas. La iniciativa de la consulta puede tomarla cualquiera de estas organizaciones.” (Labour, 1989)

Art. 2.-

2. En la medida que determine la autoridad competente, la cesión a cualquier otro título y la exposición de máquinas cuyos elementos peligrosos, enumerados en los párrafos 3 y 4 del presente artículo, se hallen desprovistos de dispositivos adecuados de protección deberán prohibirse por la legislación nacional o impedirse por otras medidas de análoga eficacia. Durante la exposición de una máquina, sin embargo, la remoción provisional de los dispositivos de protección para fines de demostración no se considerará como infracción a la presente disposición a condición de que se adopten las precauciones apropiadas para proteger a las personas contra todo riesgo. (Labour, 1989)

3. Todos los pernos, tornillos de ajuste y chavetas, así como las demás piezas que sobresalgan de las partes móviles de las máquinas, que pudieran presentar también un peligro para las personas que entren en contacto con estas piezas - cuando están en

movimiento -, y que designare la autoridad competente, se deberán diseñar, embutir o proteger de manera que se prevenga este peligro. (Labour, 1989)

4. Todos los volantes, engranajes, conos o cilindros de fricción, levas, poleas, correas, cadenas, piñones, tornillos sin fin, bielas y correderas, así como los árboles (comprendidos sus extremos) y otros órganos de transmisión que pudieran presentar también peligro para las personas que entren en contacto con éstos órganos - cuando están en movimiento -, y que designare la autoridad competente, se deberán diseñar o proteger de manera que se prevenga este peligro. Los órganos de impulsión de las máquinas deberán diseñarse o protegerse de manera que se prevenga todo peligro.

Art. 6.- 1. La utilización de máquinas que tengan alguna parte peligrosa, incluyendo los órganos de trabajo (punto de operación), desprovista de disposiciones adecuados de protección, deberá prohibirse por la legislación nacional o impedirse por otras medidas de análoga eficacia. Sin embargo, cuando esta prohibición de la máquina, se aplicará en toda la medida en que lo permita esta utilización. 2. Las máquinas deberán protegerse de manera que se respeten los reglamentos y las normas nacionales de seguridad e higiene del trabajo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

4.1. Descripción del área de estudio

El desarrollo de la tesis se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, Campus el Olivo, específicamente en la Avenida 17 de Julio 5-21 y General José María Córdova, en el edificio de idiomas (CAI), primera planta. La Universidad Técnica del Norte es una institución educativa que cuenta con laboratorios de electrónica y mecatrónica para el desarrollo de proyectos de investigación en el área tecnológica con altas prestaciones, la localidad se la indica gráficamente en la Figura 12.

Figura 12

Localización Universidad Técnica del Norte



Nota: En la figura se muestra la ubicación geográfica de la institución. Tomado de Google maps.

4.2. Enfoque y tipo de investigación

El desarrollo de la presente investigación se realizó basado en un enfoque ingenieril, ya que el objetivo fue solucionar un problema aplicado a la industria. El proyecto pretendía monitorizar en tiempo real el funcionamiento de un elemento rotativo, por lo que se planteó el diseño de un sistema tecnológico basado en un procedimiento de diseño de ingeniería.

Por otra parte, el desarrollo de este proyecto requirió diversos procedimientos, por lo que se emplearon diferentes técnicas de investigación.

En esta investigación se necesitó información del ámbito de gestión de mantenimiento en específico, de la medición de los parámetros que se tomarían en cuenta para realizar un mantenimiento preventivo, por lo tanto, la investigación fue documental.

Así mismo, esta investigación es aplicada, puesto que se desarrolló un sistema tecnológico como solución a una problemática de un elemento rotativo el cual está presente en todo tipo de aplicaciones industriales por lo que la solución puede ser útil para cualquier otro elemento presente en el ámbito industrial.

Finalmente, se llevó a cabo una investigación experimental, ya que se evaluaron dispositivos electrónicos, su funcionamiento y sus respuestas en las respectivas pruebas del sistema de monitorización, determinando errores y su respectiva corrección hasta llegar al correcto funcionamiento.

4.3. Procedimientos (Diseño de la investigación)

4.3.1. Fase 1: Investigación

Se recopiló información de los distintos parámetros de funcionamiento que se pueden evaluar en un elemento rotativo y que permiten establecer el momento en el cual se debe realizar un mantenimiento preventivo específicamente sensores y herramientas de software aplicados en I4.0.

Actividad 1: Recopilación de información bibliográfica:

En esta actividad se realizó la obtención de información bibliográfica con la finalidad de ampliar el conocimiento en materia de mantenimiento de elementos rotativos y sus puntos más críticos.

Actividad 2: Adquisición de Requerimientos en el campo:

En dicha actividad se realiza una visita de campo en la que se da un análisis exhaustivo de los distintos requerimientos.

Construcción de Atributos de los requerimientos

Los atributos y requerimientos se dan en los siguientes puntos:

- Stakeholders: Estos requerimientos se saca del público en interés asociado con este proyecto.
- Sistema: este describe los servicios que ofrece el sistema y las restricciones asociadas con su funcionamiento.
- Arquitectura: Describe las distintas condiciones que debe cumplir el sistema.

Nomenclatura utilizada para los requerimientos

Para cada uno de los diferentes requerimientos se adopta una distinta nomenclatura para el manejo de datos.

Tabla 2

Nomenclatura para utilizar para los requerimientos del sistema

Requerimiento	Abreviatura
RSTK	Requerimientos de Stakeholders del Sistema
RS	Requerimientos del Sistema
RA	Requerimientos de Arquitectura del Sistema

Requerimientos de Stakeholders.

Los Stakeholders corresponden a las personas que están involucradas directa o indirectamente en el desarrollo del sistema, como se lo puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3

Listado de Stakeholders para el diseño del sistema de monitoreo.

LISTA DE STAKEHOLDERS	
Usuarios directos	Técnicos docentes Docentes Estudiantes
Usuarios indirectos	Personas interesadas en el área de estudio.

La Tabla 4 se observa los procesos que se consideraron necesarios para identificar los requerimientos de los usuarios, a los cuales se benefician directa e indirectamente del proyecto, con el fin de analizar los intereses de estos y las expectativas del proyecto, para obtener los siguientes requerimientos, se utilizó herramientas y técnicas de investigación, como la entrevista y fuentes bibliográficas.

Tabla 4

Requerimientos de Stakeholders para el diseño del sistema de monitoreo.

RSTK				
Requerimientos de Stakeholders del Sistema				
OPERACIONALES- RSTKO				
NÚMERO	REQUERIMIENTOS	PRIORIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
RSTKO 1	Los elementos o componentes interactúen bien entre sí.	X		
RSTKO 2	El sistema debe de ser fácil de Manipular.	X		
RSTKO 3	El dispositivo debe de adaptarse a diferentes entornos industriales		X	
RSTKO 4	Este sistema debe de enviar alertas en el caso de que los índices sean críticos.	X		
RSTKO 5	Debe de constar un almacenamiento de los datos.		X	
REQUERIMIENTOS DE USO				
RSTKU 1	La información debe poder ser interpretada por operarios.	X		
RSTKU 2	El sistema debe avisar si la bomba esta inactiva o sin alimentación	X		
RSTKU 3	Los usuarios podrán visualizar los datos de manera online y offline de manera manual	X		
RSTKU 4	El equipo de toma de valores de Flujo, cantidad de agua transportada,	X		

	temperatura al contacto de la bomba y contadores de vida útil.		
RSTKU 5	Las alarmas deben de ser visualizadas en el dispositivo, y en la aplicación.		X
REQUERIMIENTOS DE USUARIO			
RSTUS 1	El dispositivo debe disponer de un Manejo intuitivo.		X
RSTUS 2	Las medidas deben de ser validas por un equipo normalizado		X
RSTUS 3	Debe de tener indicadores visuales y pantalla de visualización		X
RSTUS 4	Para el manejo del dispositivo se debe tener un manual de usuario o tutorial que sea explicativo para personal no técnico.	X	

Requerimientos del sistema

Estos requerimientos se basan en las funciones y restricciones que desempeñan el sistema de acuerdo con la sistematización con respecto al objetivo central, en ello se analizan los requerimientos de interfaz, performance, modo y estado como se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5

Tabla de Requerimientos del Sistema

Requerimientos del Sistema RS				
#	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
REQUERIMIENTOS DE INTERFAZ				
RSI 1	Visualización de datos de los flujos de entrada y salida.	X		
RSI 2	Debe de disponer de una interfaz amigable al usuario.	X		
RSI 3	La interfaz debe de informar si esta activada la comunicación o no.		X	
RSI 4	Manipulación manual.	X		
REQUERIMIENTOS DE PERFORMANCE				
RSP 1	Se puede tomar el dato de forma manual.		X	
RSP 2	La base de datos debe tener un funcionamiento continuo.		X	
RSP 3	Se debe asegurar que todos los datos lleguen a la base de datos.	X		
REQUERIMIENTOS DE MODO Y ESTADO				
RSE 1	Optara un estado emergente en el caso de tener valores fuera de las restricciones adaptadas.	X		

RSE 2	Tendrá un estado de internación, mientras tenga los tiempos de espera.	X	
RSE 3	En el caso de que los datos sean irregulares, se procesara a notificar la anomalía.	X	
RSE 4	Los contadores de vida útil de los elementos de mantenimiento dentro de los requerimientos se alertarán con valores cercanos		X
REQUERIMIENTOS FÍSICOS			
RSF 1	El dispositivo cuenta con una carcasa capaz de proteger la integridad de los elementos electrónicos internos	X	
RSF 2	Protecciones contra humedad del entorno	X	
RSF 3	Tablero de control ergonómico y con normativa		X

Requerimientos de arquitectura

Los requerimientos de arquitectura son la guía para el diseño de la arquitectura del sistema e incluyen atributos de calidad y atributos considerados como primarios para el funcionamiento del sistema.

En la Tabla 6 se detallan los requerimientos con respecto al monitoreo de la de procesos de una bomba hidráulica.

Tabla 6

Requerimientos de arquitectura para el diseño del sistema

Requerimientos de Arquitectura del sistema RA				
	Requerimiento de arquitectura	Prioridad		
		Alto	Medio	Bajo
Requerimientos lógicos (conectividad)				
RAL1	Conectividad con APP Móvil en tiempo real			X
RAL2	Utilizar protocolo MQTT para envío de datos.		X	
RAL3	Comunicación serial para conexión con los distintos modulares.	X		
RAL4	Levantamiento de servicio en HiveMQ		X	

Requerimiento de diseño		
RAD1	Visualización de datos con protocolo MQTT	X
RAD2	Alertas en la aplicación móvil	X
RAD3	Arquitectura monolítica	X
Requerimiento de Software		
RAS1	Datos presentados en tiempo real.	X
RAS2	La base de la programación debe ser software de código abierto	X
RAS3	Genera un historial de alarmas.	X
Requerimientos de Hardware		
RAH1	El dispositivo debe tener un tamaño pequeño para que el usuario lo pueda transportar con facilidad.	X
RAH2	El sistema de tener Hardware libre.	X
RAH3	Capacidad de almacenamiento en la base de datos para cada uno de los resultados.	X
Requerimientos Electrónicos		
RAE1	Módulos adaptables y compatibles	X
RAE2	Protecciones de elementos electrónicos	X
RAE3	Hardware Libre	X
RAE4	Microcontrolador capaz de cumplir con los requerimientos del sistema embebido	X

Actividad 3: Recopilación y selección de sensores y herramientas de software bajo I4.0:

se recopiló información de los sensores existentes en el mercado local, que se adaptaron de mejor manera para monitorización de elementos rotativos bajo I4.0.

Para continuar se inicia con una matriz de comparativa entre diferentes componentes de acuerdo con los requerimientos.

- **Tarjeta embebida**

Es importante seleccionar los sistemas embebidos, que puedan controlar la adquisición de datos y la conexión en la red, de los cuales se tomaron los dispositivos observados en la Tabla 7.

Tabla 7

Selección de hardware

HARDWARE	REQUERIMIENTOS						VALORACIÓN TOTAL	
	RAH 1	RAH 3	RAE 1	RSE 2	RSTKO 1	RAH 1		RSF 1
Arduino	1	1	1	1	1	1	0	6
Esp32	1	1	1	1	1	1	0	6
Raspberry PI PICO	1	1	1	1	0	1	0	5
Cumple = 1								
No Cumple = 0								
Elección: Arduino y Esp32								

Se seleccionó Arduino y Esp32 con respecto a Raspberry PI PICO por su compatibilidad con los diferentes módulos y elementos electrónicos en el dispositivo, pero principalmente porque la conectividad que tienen entre sí y para con la aplicación.

Sensor de corriente

En ese caso con la Tabla 8 se observa diferentes tipos de sensores de corriente, que nos ayudara a monitorear la corriente de la bomba, por ser uno de los índices de sobrecarga.

Tabla 8

Tabla comparativa de sensores de corriente

SENSOR INTENSIDAD	REQUERIMIENTOS						VALORACIÓN TOTAL	
	RSF 1	RAS 1	RSTUS 3	RAE1	RSTKO 3	RSTKU 1		RAH 1
SCT-013-030	1	1	1	1	1	1	1	7
ACS712	0	1	0	1	1	1	1	5
Cumple = 1								
No Cumple = 0								

Elección: SCT-013-030

Se eligió este sensor por ser más completo que otros sensores, cumple con lo requerido y contiene otros elementos que emiten información adicional tales como: potencia, voltaje e intensidad, además no es un sistema invasivo.

Sensor de Temperatura

La selección del sensor de temperatura se tomó en cuenta para el recalentamiento del dispositivo por efecto de carga, ya que en esta variable se puede tomar en cuenta diferentes índices de mantenimiento correctivo, sensores analógicos que son comprados de acuerdo con requerimientos puntuales como se ve en la Tabla 9.

Tabla 9

Tabla comparativa de sensores de temperatura

SENSOR DE TEMPERATURA	REQUERIMIENTOS							VALORACIÓN TOTAL
	RAE	RSF	RSTKO	RAE1	RSTKO	RSTKU	RAH	
	2	1	1		3	4	1	
PT-100	1	0	1	1	1	1	1	6
LM35	1	0	1	1	0	1	1	5

Cumple = 1
No Cumple = 0
Elección: PT - 100

Se escogió el sensor PT-100 debido a que su rango de temperatura de trabajo es mucho mayor que el rango del sensor LM35, haciendo que el sensor sea más apto para las diferentes condiciones industriales que pueden surgir al utilizar el dispositivo.

Sensor de flujo

Se estima el sensor de flujo en dos puntos del sistema, tanto en la entrada como en la salida, ya que de ello depende el funcionamiento correcto de la bomba, ya que el caudal de la entrada debe de ser menor al de salida, tomando en cuenta ello se consideraron dos tipos de sensores que pueden ayudar en el sistema como se puede ver en la Tabla 10.

Tabla 10

Tabla comparativa de sensores de flujo

SENSOR DE FLUJO	REQUERIMIENTOS							VALORACIÓN TOTAL
	RAE	RSF	RSTKO	RSTKO	RSTKU	RAH		
	2	1	1	RAE1	3	4	1	
Fs300a 1 pulgada	1	0	1	1	1	1	1	6
YF -S201	1	0	0	1	1	1	1	5
Cumple = 1								
No Cumple = 0								
Elección: Fs300a ¾								

Se escogió el sensor Fs300a “in” porque es compatible con los programas a utilizar y con los elementos de construcción ya que cada sensor a pesar de cumplir con las mismas especificaciones, cada uno tiene una medida de rosca diferente y la medida requerida la tiene el sensor anteriormente mencionado.

Sensor de vibración

Este sensor es importante, ya que se pueden detectar delineamientos en su ensamble y diferentes anomalías mecánicas, en la siguiente Tabla 11 podemos ver la comparativa con otro.

Tabla 11

Tabla comparativa de sensores de flujo

SENSOR DE VIBRACIÓN	REQUERIMIENTOS							VALORACIÓN TOTAL
	RAL	RAS	RSTKO	RSTKO	RAL	RSTKU	RAH	
	1	1	1	3	4	4	1	
MEAS LDT0028KL	1	1	1	1	1	1	1	7
SW420	1	0	0	1	1	1	1	5
Cumple = 1								
No Cumple = 0								
Elección: MEAS LDT0028KL								

En este caso se seleccionó el MEAS LDT0028KL, ya que es robusto al entorno en el que se encontrara la bomba.

- **Software**

Para la selección de software (Tabla 12) se debe tener en cuenta dos, uno en que se programó Arduino, y otro la aplicación Android.

Tabla 12:

Tabla comparativa de software

SOFTWARE	REQUERIMIENTOS							VALORACIÓN TOTAL
	RAL	RAS	RAS	RAS	RSTKO	RAL	RAL	
	1	1	3	2	1	3	2	
Visual Studio	1	1	1	0	1	0	1	5
IDE Arduino	1	1	1	1	1	1	1	7
Cumple = 1								
No Cumple = 0								
Elección: IDE Arduino								

Para este caso se utilizará como software el IDE Arduino debido a que es una plataforma de código abierto, es más sencilla de utilizar en conjunto con un gran número de librerías para cada uno de los módulos requeridos en el dispositivo.

Tabla 13

Tabla comparativa desarrolladores APP

DESARROLLADOR APP	REQUERIMIENTOS								VALORACIÓN TOTAL
	RAS	RSI	RSTK	RSI	RSTK	RAL	RA	RA	
Arduino	1	1	U 2	2	O 1	4	D 2		
Android Studio	1	1	1	0	1	1	1	6	
App Inventor	1	1	1	1	1	1	1	7	
Cumple = 1									
No Cumple = 0									
Elección: App Inventor									

Se escogió como plataforma para desarrollar la aplicación, App Inventor de MIT por tener unas características simples y una interfaz más amigable e intuitiva para la creación de este tipo de aplicaciones, además de ser compatible con todos los protocolos de conectividad y entre los módulos utilizados en el dispositivo.

3.3.2 Fase 2: Diseño del sistema de monitorización y alerta de mantenimiento preventivo

Actividad 4: Diagrama de bloques:

En esta parte se da una descripción del funcionamiento del sistema, detallando en diferentes etapas.

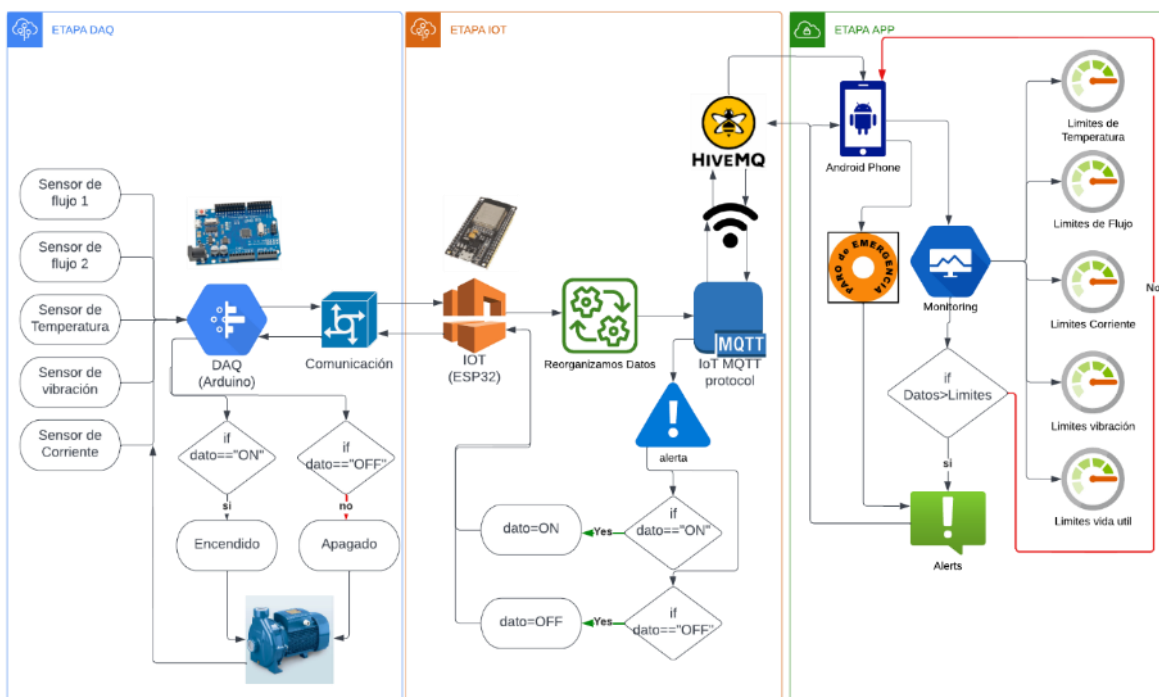
Este diagrama permite crear estructuras de alto nivel del sistema donde se representa los componentes principales del sistema como se lo puede ilustrar en la Figura 13, este sistema está dividido en 3 etapas que son:

- **Etapa DAQ:** En esta etapa se tiene la adquisición de datos por parte de un arduino, encargado de agrupar y reordenar los datos por segmento de coma, para posteriormente poder enviarlos en una cadena por comunicación serial a la siguiente etapa, no obstante, esta etapa también recibe datos para poder encender o apagar la bomba, considerándolo un mecanismo de paro de emergencia
- **Etapa IOT:** Esta etapa realiza la agrupación e interconexión de la etapa DAQ a través de una red con protocolo MQTT, para poder conectarse con la aplicación móvil a través del internet.
- **Etapa App:** Esta etapa es donde se tiene una interfaz para el usuario, donde podrá visualizar los valores sensoriales del sistema donde se detectará y avisara de distintas anomalías, este a su vez también tiene un botón de paro para cualquier emergencia que se solicite.

Como se puede observar este sistema tiene una correlación de comunicación entre sus etapas, que ayudaran a cumplir el cometido de este trabajo.

Figura 13:

Diagrama de bloques



Nota: El diagrama de bloques esta especificado cada una de las etapas.

Actividad 5: Diseño Etapa DAQ

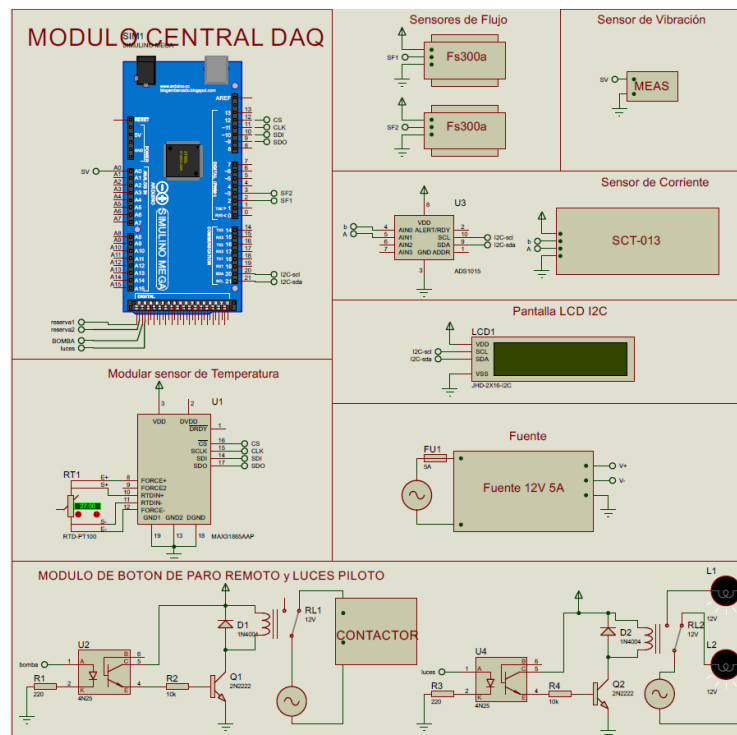
En esta etapa se utiliza un sistema embebido que permita recolectar los datos sensoriales del sistema, estos datos se ajustan a las siguientes variables.

- **Corriente:** En ello se determinará si hay una sobrecarga del sistema, o simplemente el dispositivo no está funcionando.
- **Temperatura:** Detecta sobrecalentamiento en la bomba, haciendo reaccionar al sistema, apagando el equipo y dar el aviso para su respectiva revisión.
- **Flujo:** El flujo nos ayuda a ver si el dispositivo funciona como debería, ya que en una bomba se tiene que el caudal de entrada debe de ser menor al de salida, de no ser así se debe de dar aviso para la respectiva inspección.
- **Vibración:** las vibraciones se los toma en cuenta ya que, si tienden a incrementarse y superar los límites considerados como normales, significa que existen daños o defecto en la fundación, desalineación entre la bomba y equipo impulsor, por lo cual va a requerir una inspección inmediata.

Teniendo en cuenta las variables a medir y la selección de sensores realizada en la fase anterior, se realiza un diagrama electrónico del sistema de la Etapa DAQ como se lo puede ver en la siguiente Figura 14.

Figura 14:

Diagrama electrónico



Nota: Diagrama electrónico del interconectado del modular de la Etapa de la DAQ.

Actividad 6: Diseño Etapa IOT

Los datos adquiridos debían soportar un proceso de verificación para realizar el análisis automático de posibles fallas en el elemento rotativo. Esto se efectuó mediante un algoritmo de proceso alojado en la memoria de programa de un controlador, este controlador se optó por utilizarse el esp32, el cual tiene la característica principal, que tiene integrado un módulo wifi, donde se puede mandar directamente el informador al servidor MQTT.

Como se puede observar en la Figura 13, en la etapa de la DAQ se tiene una comunicación bidireccional en la cual se encarga de reorganizar los datos tanto de entrada o de salida, en el caso de la entrada se evidencia el dato para el control del botón de paro.

Preparación de datos para el protocolo MQTT en Arduino

Para poder enviar los datos por protocolo MQTT es necesario, utilizar las siguientes librerías:

- Wifi.h: Esta librería se utiliza para habilitar el módulo Wifi del esp32, no obstante, al activar el wifi se pierde la utilidad de un puerto completo del sistema embebido.
- PubSubClient.h: Esta es una biblioteca cliente para mensajería MQTT.

Teniendo en claro las diferentes librerías, procedemos a configurar el protocolo MQTT, como se indica en la Figura 15, debemos de tener los datos del servidor, numero del puerto que por defecto es el 1883, usuario, contraseña, el tópico de suscripción que son los datos que se envían desde el esp32, y el tópico público que es para acoger las señales de del protocolo.

Figura 15

Configuración de puerto MQTT

```
//*****  
//***** MQTT CONFIG *****  
//*****  
const char *mqtt_server = "broker.hivemq.com";  
const int mqtt_port = 1883;  
const char *mqtt_user = "";  
const char *mqtt_pass = "";  
const char *root_topic_subscribe = "/escribirutn";  
const char *root_topic_publish = "/leerutn";
```

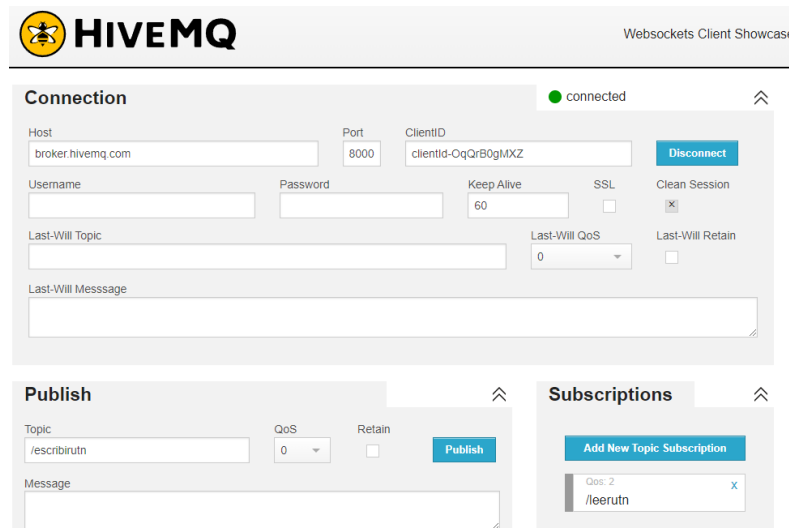
Nota: Esta figura muestra la configuración hecha en el IDE de arduino

Levantamiento del servicio MQTT

Para el servicio MQTT se utiliza el de HIVEMQ, en ello se configuran con los mismos parámetros que se configura el arduino a excepción del número de puerto que en este caso se utiliza el 8000, como se puede observar

Figura 16

Configuración del servidor MQTT



The screenshot displays the Hivemq Websockets Client Showcase interface. At the top, there is a header with the Hivemq logo and the text 'Websockets Client Showcase'. Below this, the 'Connection' section is active, showing a green 'connected' status. The connection details include: Host (broker.hivemq.com), Port (8000), ClientID (clientId-OqQrB0gMXZ), Username, Password, Keep Alive (60), SSL (unchecked), Clean Session (checked), Last-Will Topic, Last-Will QoS (0), and Last-Will Retain (unchecked). There is a 'Disconnect' button. Below the connection section, the 'Publish' section is visible, showing a Topic (/rescribrutn), QoS (0), Retain (unchecked), and a 'Publish' button. The 'Subscriptions' section shows an 'Add New Topic Subscription' button and a list of subscriptions, including one for QoS: 2 on the topic /leerutn.

Nota: Esta figura muestra la interfaz de la página web para la configuración del servicio

Actividad 7: Diseño Etapa APP

El diseño de la etapa APP, se debe tener en cuenta las funcionalidades anteriormente explicadas en la Figura 13, en estas se tiene el monitoreo, y el botón de paro de emergencias.

Desarrollo de la APP

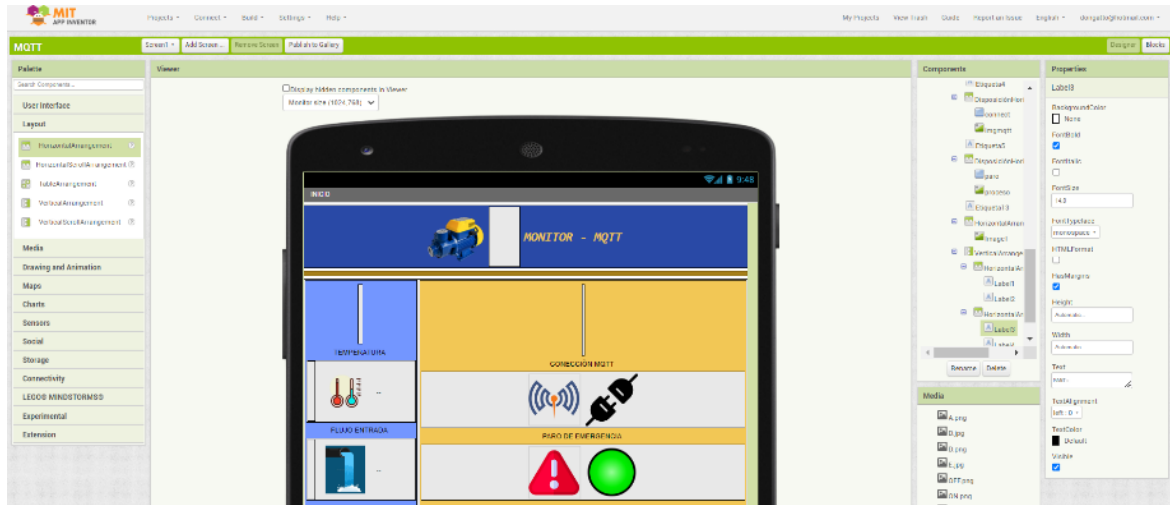
Para el monitoreo se realiza el diseño de la interfaz en el desarrollador online de app inventor como se ilustra en la

Figura 17:

Interfaz gráfica para el diseño de la aplicación móvil, donde se emplea la distribución visual de los sensores y la estética de la aplicación móvil.

Figura 17:

Interfaz gráfica para el diseño de la aplicación móvil

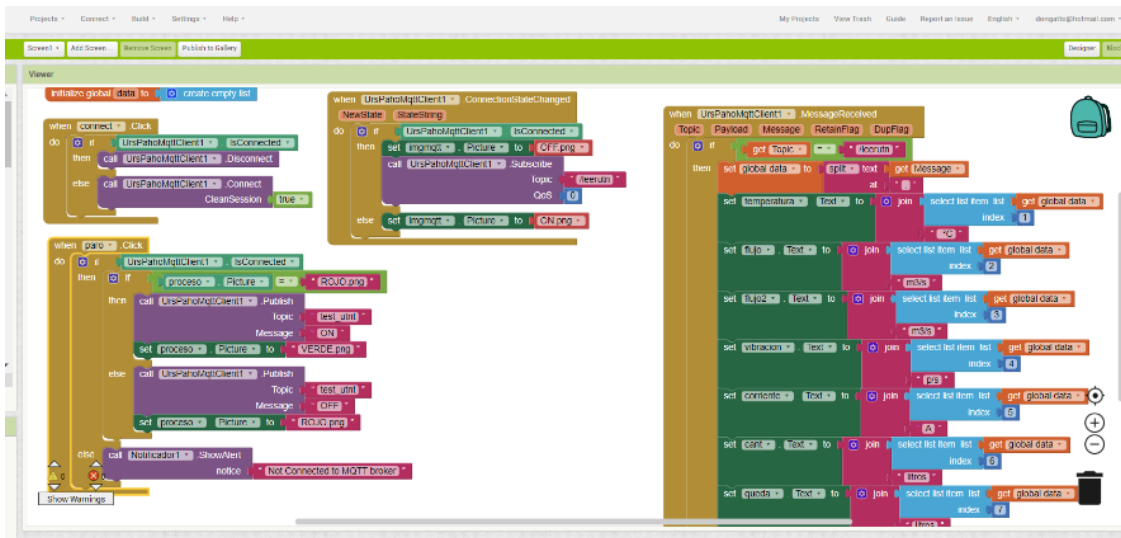


Para la programación se utiliza la pestaña de bloques en el cual se realizan los diversos procesos del algoritmo, los bloques contienen su propia lógica como se puede ver en la Figura 18:

Interfaz de bloques para lógica de la aplicación esta lógica ayuda también a la configuración de interconexión con el protocolo MQTT, y también a desfragmentar la cadena con los datos, y colocar cada uno de los datos donde corresponde, en el orden anteriormente configurado en la interfaz de diseño.

Figura 18:

Interfaz de bloques para lógica de la aplicación



3.3.3 Fase 3: Implementación del sistema de monitoreo y alerta temprana

Se implementó el sistema realizando los ajustes y correcciones pertinentes, de acuerdo con el diseño de cada una de las etapas.

Actividad 7: Implementación de la etapa DAQ.

Para la implementación se tomó en cuenta los diferentes modulares a tomar con el arduino MEGA 2560 seleccionado por el número de pines, y distribución, lo cual permite un mejor manejo, no obstante para la prioridad de esta etapa se tiene relevancia en la conexión de sensores, en lo cual se tomó en cuenta conectores externos XRL utilizados para audio, que son especializados en antiestática y anti perturbaciones externas, utilizando protección de conexión con enroscado, teniendo buena conexión con los demás modulares.

Figura 19.

Conectores XRL para sensores.

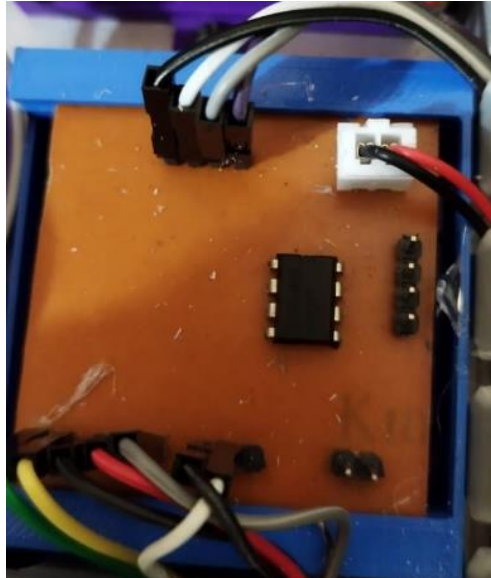


Consecutivamente se tomó la distribución de los sensores implementados en una tarjeta PCB (Figura 20

PCB Moduladora de sensores) encargada de repartir la alimentación a distintos sensores y la interconexión por pines; mejorando la distribución para que se conecte a la alimentación al arduino con respecto de los sensores de flujo y el sensor de vibración.

Figura 20

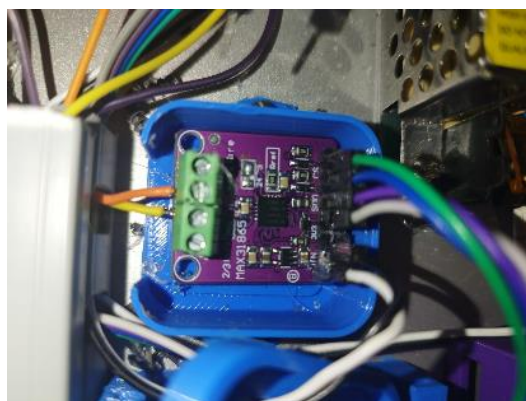
PCB Moduladora de sensores



No obstante algunos sensores necesitaron un módulo acondicionador de señal, como por ejemplo el sensor de temperatura pt100, donde se utiliza un MAX31865 como acondicionador, ya que este sensor es compatible con SPI (Serial Peripheral Interface), que se refiere al protocolo síncrono de comunicación serial, que trabaja en modo “Full dúplex” para recibir y transmitir información, permitiendo la comunicación del PT100 sea directa con el arduino, obteniendo el dato del sensor escalable por un transductor, permitiendo que la toma de datos sea eficiente utilizando un algoritmo de librería para calcular la temperatura.

Figura 21

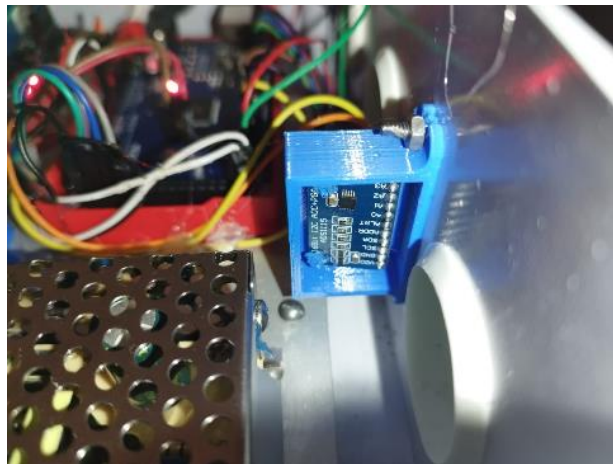
MAX31865



En el caso del sensor de corriente SCT-013, donde se utilizará una salida de tensión de $\pm 1\text{VRMS}$ y resistencia burden interna, se utilizó un ADS1115(Figura 22) en modo referencial donde se ajustó la ganancia a 240V estando dentro del rango $\pm 1,414\text{V}$, teniendo la precisión con el sensor de 1.87mA , es modulo tiende a utilizar comunicación I2C para la transferencia de datos al arduino Mega.

Figura 22

ADS1115 en el dispositivo

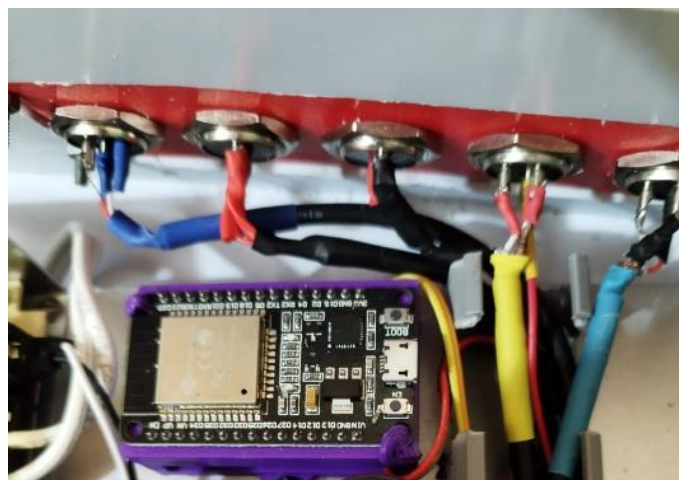


Actividad 8: implementación de la etapa IOT.

Para la implementación Etapa IOT se preparó solo conexiones externas al esp32 (Figura 23) las cuales son solo de alimentación y comunicación serial.

Figura 23

ESP32 en el dispositivo



Actividad 9: Implementación de la etapa APP.

La app móvil fue maquetada de manera horizontal, donde se estableció los parámetros a monitorizar, y los tipos de botones que direccionaban el dato para poder apagar o prender la bomba, en el caso que cumpla con los requerimientos de uso del dispositivo, teniendo en cuenta esto se dispone del APK para la instalación en el celular.

Figura 24

APP móvil



3.3.4 Fase 4: Ejecución de pruebas de funcionamiento

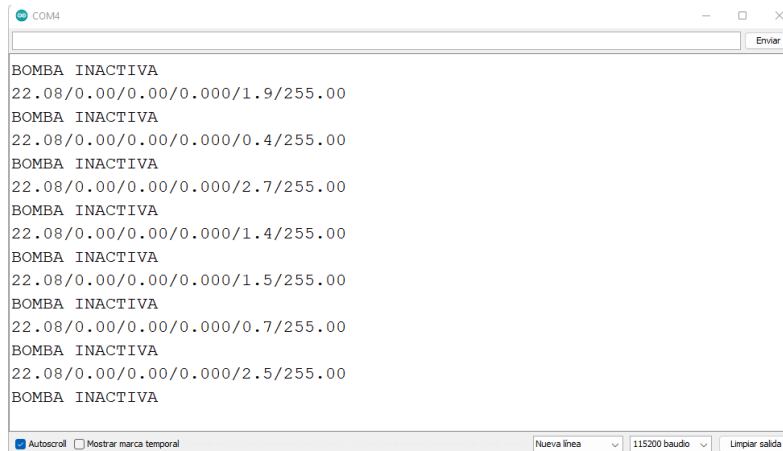
Se plantearon varias pruebas bajo distintas condiciones de trabajo para evaluar el buen funcionamiento del sistema.

Actividad 10: Prueba de adquisición de datos.

En esta actividad se pudo ver la adquisición de datos por monitor serial (Figura 25), en cual se evidencia la toma de datos con los diferentes sensores, tomando en cuenta la variable del caudal de entrada, caudal de salida, temperatura de contacto, corriente y cantidad de agua transcurrida.

Figura 25

Monitor serial de la etapa DAQ

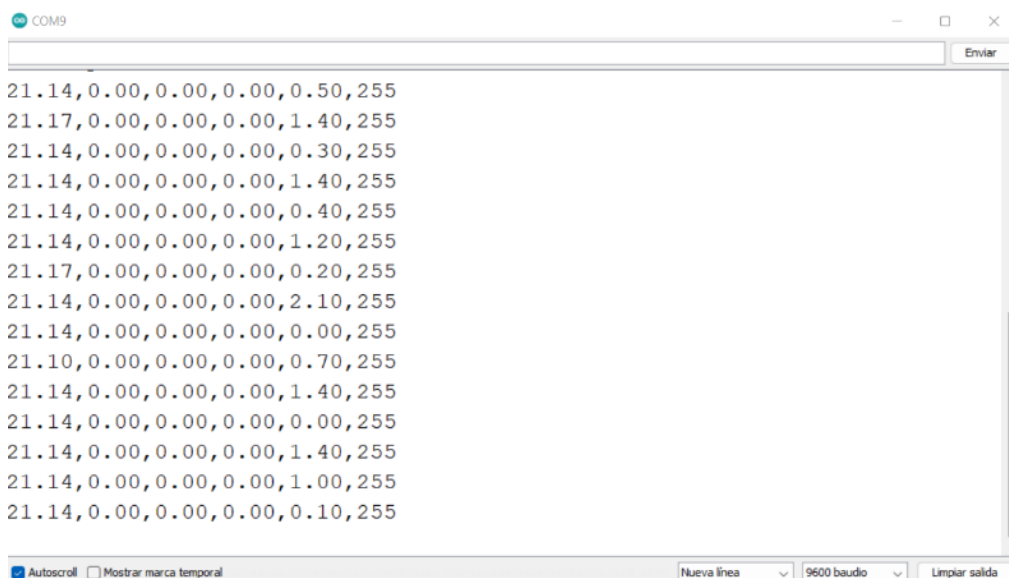


Actividad 11: Prueba de comunicación de datos Arduino al esp32 y enlace con el servidor MQTT.

Para evidenciar la entrega de datos en el ESP32 es necesario poder utilizar el monitor serial, en el cual se evidencio la recepción de datos, separadas por un signo diferenciador “/” para con ello proceder al envío de datos al servicio MQTT evidenciando la suscripción con un mensaje en el monitor serial como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

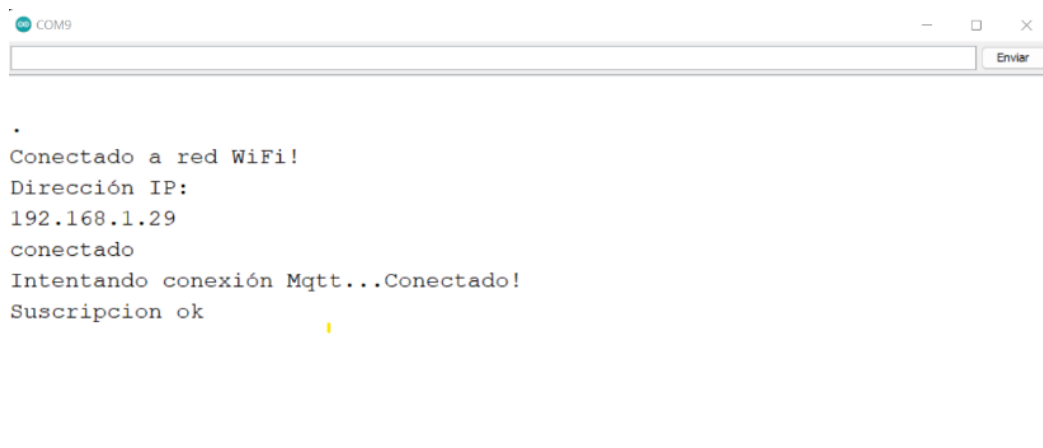
Recepción de datos en el esp32 utilizando comunicación serial



Antes de ello se especifica la búsqueda de red wifi, comprobando la conexión a internet, y al mismo tiempo con el servidor (Figura 27), una vez verificada la conexión, se une una cadena de texto en CHAR donde se ordena el mensaje, para publicarle al tópic.

Figura 27

Comprobación de conexión de internet y servidor MQTT

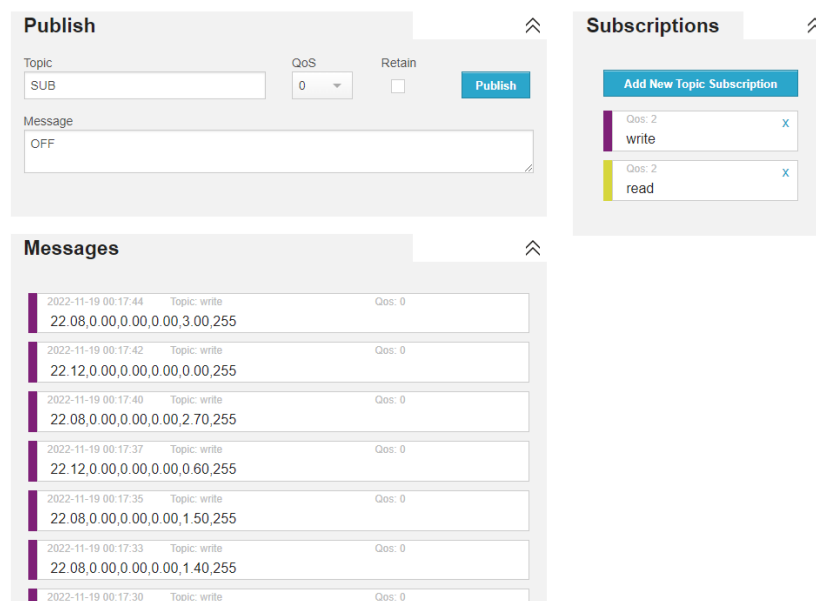


Actividad 12: Prueba de comunicación de datos al servicio.

En esta prueba se visualiza los datos en la página del servicio, teniendo en cuenta de que la cadena y tramado de datos sea la correcta con su distinto separador como se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Visualización de datos en el servidor



Actividad 13: Prueba de envío y recepción de datos del servicio a la aplicación móvil

Esta aplicación móvil (Figura 29) contiene los datos de la temperatura de la bomba, el caudal de entrada y de salida, la vibración del dispositivo y la corriente, al mismo tiempo se sabrá el conteo de la cantidad de agua transcurrida por la bomba que se necesita para realizar el distinto mantenimiento.

Figura 29 App funcional



En la aplicación se dispone de 1 botón de conexión que nos permite conectarnos al servicio y el mismo a desconectarnos, cuando este se encuentre activado, se recibe los datos de los sensores, también se agregó un botón de pare de emergencia, que sirve para prender o apagar remotamente la bomba como se lo puede ver en la Figura 29.

Actividad 14: Pruebas de alarmas de la bomba

Las alarmas en activarse con sus condiciones se deben establecer como se lo puede ver en la Tabla 14.

Tabla 14

Tabla de Alertas emitidas de acuerdo con los sensores

Alerta	Descripción	Condiciones	Acciones
BOFF0	Bomba inactiva	Corriente=0 A	Alerta Pantalla Alerta App móvil
SCB60	Sobrecalentamiento de la bomba	Temperatura>60°C	Bomba apagada Alerta Pantalla Alerta App móvil
MFBC0	No hay agua en la entrada de la bomba	Flujo Entrada=0 l/min	Bomba apagada Alerta Pantalla Alerta App móvil
MFBC1	El funcionamiento no traslada agua a mayor flujo del que tenía	Flujo Entrada > Flujo Salida	Alerta Pantalla Alerta App móvil
EMV5	Error mecánico de la bomba	Vibración>5 v	Bomba apagada Alerta Pantalla Alerta App móvil
MAPR001	Mantenimiento preventivo	Cantidad de agua>Límite	Bomba apagada Alerta Pantalla Alerta App móvil

En esta actividad se prueba cada una de las alertas programadas en el modular principal.

- **BOFF0 (Bomba inactiva):** esta alarma se activa cuando el sensor de corriente determine 0 en sus métricas, esta alerta se visualizará en la pantalla del dispositivo como también en la aplicación móvil.
- **SCB60 Sobrecalentamiento de la bomba,** se da cuando el sensor de temperatura sube más de los 60 °C, lo cual para prevenir un daño colateral se apaga la bomba hasta que se realice en mantenimiento correctivo de la misma, esta alerta se visualizará en la pantalla del dispositivo como también en la aplicación móvil.
- **MFBC (No hay agua en la entrada de la bomba),** es ideal tener esta alarma ya que, si no hay agua a la entrada de la bomba y este en pleno funcionamiento, puede la máquina tener conflictos por el cierre mecánico y el motor pueden sufrir daños, por ello se da aviso y se suspende automáticamente la alimentación de la bomba.
- **MFBC** este sucede cuando la bomba no cumple con el funcionamiento de trasladar agua a mayor flujo del que tenía, esta falla el módulo advierte, pero no

suspende la alimentación eléctrica de la bomba, para que se pueda realizar el correctivo correspondiente.

- EMV5 este aviso da cuando se excedió los HZ límites de vibración avisando un desperfecto mecánico de la bomba, de igual manera se da aviso en la interfaz como en la aplicación.
- MAPR001 (mantenimiento preventivo), este solo se activa cuando se cumple con la cantidad de agua limitante para su debido mantenimiento preventivo.

4.4. Consideraciones ambientales y bioéticas

El sistema planteado es una solución tecnológica que pretende medir variables de funcionamiento de un elemento rotativo que puede ser utilizado en cualquier tipo de aplicación industrial y que tiene como objetivo reducir posibles fallas. Los elementos utilizados no representan riesgo alguno tanto para las personas como para el medio ambiente. Esta solución podría contribuir a la detección de fallas de elementos rotativos como bombas hidráulicas utilizadas con fluidos contaminantes y que mediante su monitorización impedirían posibles riesgos de contaminación.

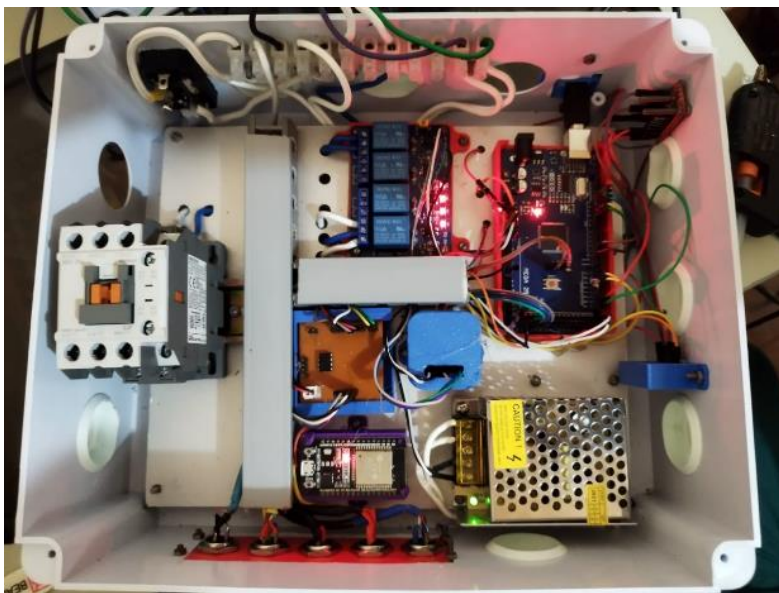
CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe el diseño de un sistema de monitorización y alerta temprana para mantenimiento preventivo de elementos rotativos bajo I4.0, donde se examinaron las fallas que se manifiestan con mayor frecuencia en las bombas centrífugas, asimismo se tomaron en cuenta las características técnicas de funcionamiento para determinar los parámetros a monitorear y determinar los sensores y herramientas de software que mejor se adapten a bombas centrífugas. Se realizó el montaje de todos los elementos, sensores, cableado, controlador entre otros que conforman el sistema de monitorización (Figura 30) y alerta temprana acompañado de ello se realizó las pruebas de funcionamiento en base a diferentes condiciones de trabajo.

Figura 30

Conexiones internas del dispositivo ya ensamblado



El exterior del dispositivo (Figura 31) se tiene una pantalla que nos ayudara a monitorizar todos los parámetros de la bomba, junto con luces piloto que nos indica el estado de funcionamiento, y botones que nos ayuda a prender o apagar la bomba de manera manual, y al mismo tiempo nos ayuda a quitar el estado de reparación que bloquea la máquina hasta que esté preparada para funcionar con normalidad, y para desbloquear básicamente de aplastar los dos botones al mismo tiempo durante 5 segundos, y este desbloquear el estado para que la maquina pueda funcionar normalmente, bajo las restricciones para un buen funcionamiento.

Figura 31

Dispositivo exteriormente



5.1. Resultados

A continuación, se muestra un listado de una rúbrica con los ítems de requerimientos iniciales a cumplir donde se da a conocer los resultados.

Tabla 15

Rubrica de cumplimiento de requerimientos

NÚMERO	REQUERIMIENTOS		
		CUMPLE	NO CUMPLE
RSTKO 1	Los elementos o componentes interactúen bien entre sí.	X	
RSTKO 2	El sistema debe de ser fácil de Manipular.	X	
RSTKO 4	Este sistema debe de enviar alertas en el caso de que los índices sean críticos.	X	
RSTKU 1	La información debe poder ser interpretada por operarios.	X	
RSTKU 2	El sistema debe avisar si la bomba esta inactiva o sin alimentación	X	
RSTKU 3	Los usuarios podrán visualizar los datos de manera online y offline de manera manual	X	
RSTKU 4	El equipo de toma de valores de Flujo, cantidad de agua transportada, temperatura al	X	

	contacto de la bomba y contadores de vida útil.	
RSTKU 5	Las alarmas deben de ser visualizadas en el dispositivo, y en la aplicación.	X
RSTUS 1	El dispositivo debe disponer de un Manejo intuitivo.	X
RSTUS 2	Las medidas deben de ser validas por un equipo normalizados	X
RSTUS 3	Debe de tener indicadores visuales y pantalla de visualización	X
RSTUS 4	Para el manejo del dispositivo se debe tener un manual de usuario o tutorial que sea explicativo para personal no técnico.	X
RSI 1	Visualización de datos de los flujos de entrada y salida.	X
RSI 2	Debe de disponer de una interfaz amigable al usuario.	X
RSI 3	La interfaz debe de informar si esta activada la comunicación o no.	X
RSI 4	Manipulación manual.	X
RSP 1	Se puede tomar el dato de forma manual.	X
RSP 2	La base de datos debe tener un funcionamiento continuo.	X
RSP 3	Se debe asegurar que todos los datos lleguen a la base de datos.	X
RSE 1	Optara un estado emergente en el caso de tener valores fuera de las restricciones adaptadas.	X
RSE 2	Tendrá un estado de internación, mientras tenga los tiempos de espera a concluir el correctivo.	X
RSE 3	En el caso de que los datos sean irregulares, se procesara a notificar la anomalía.	X
RSE 4	Los contadores de vida útil de los elementos de mantenimiento dentro de los requerimientos se alertarán con valores cercanos	X
RSF 1	El dispositivo cuenta con una carcasa capaz de proteger la integridad de los elementos electrónicos internos	X
RSF 2	Protecciones contra humedad del entorno	X
RAL1	Conectividad con APP Móvil	X
RAL2	Utilizar protocolo MQTT para envio de datos.	X
RAL3	Comunicación serial para conexión con los distintos modulares.	X
RAL4	Levantamiento de servicio en HiveMQ	X

RAD1	Visualización de datos con protocolo MQTT	X
RAD2	Alertas en la aplicación móvil	X
RAD3	Arquitectura monolítica	X
RAS1	Datos presentados en tiempo real.	X
RAS2	La base de la programación debe ser software de código abierto	X
RAS3	Genera un historial de alarmas.	X
RAE1	Módulos adaptables y compatibles	X
RAE2	Protecciones de elementos electrónicos	X
RAE3	Hardware Libre	X
RAE4	Microcontrolador capaz de cumplir con los requerimientos del sistema embebido	X

la Tabla 15 fue completada al momento de probar el dispositivo en el campo, el cual se ensambla la bomba en un circuito de agua para ver su funcionamiento como se puede ver en la Figura 32.

Figura 32

Bomba ensamblada en un circuito hidráulico



En donde se evidencio el funcionamiento de este, tomando en cuenta los parámetros censados con instrumentos normalizados, para verificar el rango de error de la misma, en el caso del sensor de corriente, se determina su medición con la de una pinza amperímetro, evidenciando una pequeña variación (Figura 33).

Figura 33

Comparación de métricas



Al mismo tiempo se comprobó las diferentes alarmas (Figura 34), provocando fallas, de las cuales el equipo salió con buenos resultados dando una alarma tanto en la pantalla del dispositivo como en la aplicación móvil.

Figura 34

Pruebas de alertas



Se tomó en cuenta también el tramado de información en la comunicación del dispositivo como con la aplicación móvil, tanto en la transmisión como en la recepción de información, obteniendo excelentes resultados y cumpliendo con los requerimientos.

Figura 35

Comprobación de envío y recepción de datos



5.2. Análisis

Como se pudo observar en la Tabla 15

Rubrica de cumplimiento de requerimientos se pudo ver el cumplimiento del 100 % de los 38 requerimientos, dando por acentuado del cumplimiento del alcance de la investigación.

Sin embargo, es necesario dar un análisis de cada una de las etapas, para que se pueda mejorar en trabajos futuros.

5.2.1. Etapa DAQ

Se puede evidenciar que se realizó un buen trabajo de adquisición de datos teniendo en cuenta, la división de funciones con el esp32 que paso a la etapa IOT, ya que el arduino mega se ocupó de agrupar el dato y enviarlo en una cadena de atributos separado por un símbolo, para que pueda disgregarse cada medida de los diferentes sensores, además de ello ocupó diferentes protocolos de comunicación como SPI(Serial Peripheral Interface) y I2C (Inter-Integrated

Circuit), que salieron muy provechosos al poder realizar diversas acciones con los transductores.

Esta etapa se hizo a cargo también de los modulares de relés tanto para el accionamiento de la bomba como las luces piloto, y en el segmento de comunicación con la siguiente etapa se la estableció con comunicación Serial.

5.2.2. Etapa IOT

Esta etapa se programó al ESP32 como el puente de comunicación con la nube, capas de reorganizar los datos y poderlos enviar al tópico de suscripción y recibir en un tópico de publicación, en ello se estableció la configuración del servidor.

El Mqtt fue muy útil empezando porque es uno de los protocolos de red más ligeros de publicación y suscripción, de dispositivo a otro, además de ello esta diseñado para conexiones inalámbricas remotas de recursos de ancho de banda, aunque para la configuración se debe programar la conexión de red wifi.

5.2.3. Etapa APP móvil

La aplicación es responsiva y con una interfaz amigable al usuario, en el cual se programó los parámetros de red MQTT como el servidor y los tópicos, esta aplicación puede darse para cualquier celular de sistema operativo Android.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Muchos de los daños en una bomba hidráulica centrífuga se producen por no determinar a tiempo las anomalías de su funcionamiento, y no brindar de manera oportuna los debidos mantenimientos, teniendo pérdidas de producción, económicas e incluso de la integridad física de un trabajador de planta.
- El diseño empleado en este trabajo de investigación se desgloso por etapas que realizan un todo, empleando la etapa DAQ encargada de la adquisición de datos y el monitoreo, consecutivamente la etapa IOT, encargada de generar el nexo principal para la utilización del protocolo MQTT y por último la etapa APP en que tiene un diseño de interfaz intuitivo y fácil de utilizar, esto hizo de ello tener un proyecto escalable y ordenado.
- La implementación llevó por la utilización de módulos acondicionadores de señal para tener una mejor precisión en el caso del MAX31865 en el caso de la utilización del sensor de temperatura PT100 y el ADS1115 para el sensor de corriente SCT-013, optimizando la adquisición de datos.
- En la implementación se utilizó conectores XLR antiestáticos, que permite tener seguridad al conectar los sensores, siendo un punto importante para evitar puntos de impedancia.
- Se realizaron pruebas exhaustivas en cada etapa, en la cual se probó cada circunstancia de desperfecto de la máquina, tomando de referencia los requerimientos generales, teniendo el 100% de cumplimiento de cada uno de ellos.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda para futuros trabajos utilizar machine learning para pronosticar desperfectos, y poder pronosticar fallas, con lo cual se economizaría porque se podría tratar a tiempo los desperfectos.
- Se podría crear desde cero el servidor MQTT, creando un servicio personal con algunas restricciones nativas que pueden ayudar a tener una mejor adaptabilidad de tipos de datos de cadena.
- Se podría crear un portal web con algunos aditamentos especiales, que permitirían incluso el estudio más extenso del comportamiento de esta maquinaria.
- Se recomienda utilizar cableado estructurado para generar un mejor orden para la implementación del dispositivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Altun, M. (2020). The Effect of Cooperative Learning Strategies in the Enhancement of EFL Learners' Speaking Skills. *Asian EFL Journal*, 144-171.
- Atten2. (2021, Diciembre 4). *blog.atten2.com*. Retrieved from [blog.atten2.com: https://blog.atten2.com/buenas-practicas-tribologicas-para-evitar-el-desgaste-de-maquinaria#:~:text=Desgaste%20por%20fatiga%3A%20Control%20de,microgrietas%20que%20debilitan%20su%20comportamiento](https://blog.atten2.com/buenas-practicas-tribologicas-para-evitar-el-desgaste-de-maquinaria#:~:text=Desgaste%20por%20fatiga%3A%20Control%20de,microgrietas%20que%20debilitan%20su%20comportamiento).
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). *Industria 4.0: Fabricando el futuro*. Buenos Aires.
- Bautista, A., & Vinicio, O. (2018). Parametrización automática de las variables de control y su influencia en el proceso de mezclado de compuestos termoplásticos aplicando principios de Industria 4.0. *Repositorio UTA*.
- bombascentrifugas.net. (2020, Enero 24). *bombascentrifugas.net*. Retrieved from [bombascentrifugas.net: https://www.bombascentrifugas.net/deteccion-de-fallas-y-averias-en-bombas-centrifugas/](https://www.bombascentrifugas.net/deteccion-de-fallas-y-averias-en-bombas-centrifugas/)
- Camargo, J. J., Camargo, J. F., & Joyanes, L. (2014). Conociendo Big Data. *Facultad de Ingeniería; Vol 24, No 38*, 63-77.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2018). *Mecánica de fluidos*. Ciudad de Mexico: McGraw.
- Díaz, D., & Veloz, A. (2019). Diseño y construcción de un sistema de dosificación monitoreado a través de la nube. *Carrera de Ingeniería Mecatrónica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*.
- Galvan, J. (2015). *Análisis de la implementación del mantenimiento productivo*. Mexico: Aveas Beltrán.
- GRUNDFOS. (2020, Diciembre 12). *grundfos.com*. Retrieved from [grundfos.com: https://www.grundfos.com/ar/support/faq/what-is-cavitation#:~:text=La%20cavitaci%C3%B3n%20es%20la%20formaci%C3%B3n,de%20vapor%20del%20medio%20bombeado](https://www.grundfos.com/ar/support/faq/what-is-cavitation#:~:text=La%20cavitaci%C3%B3n%20es%20la%20formaci%C3%B3n,de%20vapor%20del%20medio%20bombeado).

- Hidalgo, R. (2016). Diseño e implementación de un tablero de control para la monitorización del sistema de inyección de agua en el pozo PZSIA-001 para la empresa de proyectos integrales del Ecuador PIL S.A. *Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control - ESPE*.
- Inca, D., & Patín, C. (2016). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de humedad y temperatura para invernaderos con administración SNMP. *Universidad Nacional de Chimborazo*.
- Jasso, A. (2011). *Implementación del Mantenimiento predictivo de la empresa AGR-RACKED*.
- Labour, O. I. (1989). *C119 - Convenio sobre la protección de la maquinaria*.
- López, M. (2019). Industria 4.0 para la monitorización de un proceso industrial. *Universidad Técnica de Ambato*.
- Luna, D. (2018, Marzo 14). *reporteroindustrial.com*. Retrieved from [reporteroindustrial.com: https://www.reporteroindustrial.com/temas/Beneficios-de-un-sistema-de-monitoreo-para-mantenimiento-40-en-equipos-electronicos+123980?pagina=1](https://www.reporteroindustrial.com/temas/Beneficios-de-un-sistema-de-monitoreo-para-mantenimiento-40-en-equipos-electronicos+123980?pagina=1)
- Medardo, J., Gonzales, V., & Diaz, V. (2017). *Mantenimiento - Técnicas y aplicaciones industriales*. Mexico: Grupo Editorial Patria.
- Montero, B., & Trajano, D. (2019). Sistema de manufactura flexible orientado a industria 4.0. *Repositorio UTA*.
- Olarte, C. (2010). Technologies of maintenance predictive used in the industry. *Scientia et Technica Año XVI*, 3-5.
- Olarte, W., Botero, M., & Cañon, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia ET Technica*.
- Pfleiderer, C. (2018). *Bombas centrífugas y turbocompresores*. Mexico: Labor.
- Preditécnico*. (2013, Marzo 4). Retrieved from <http://www.preditecnico.com/2013/03/el-analisis-de-aceites-como-tecnica.html>
- Reyes, M., MojenaI, Á., Sagaró, R., & Camello, C. (2016). Comportamiento del desgaste erosivo en recubrimientos depositados por la técnica de proyección térmica. *SciELO*, 1.

Román, J. (2016). *Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Codiinforme.*

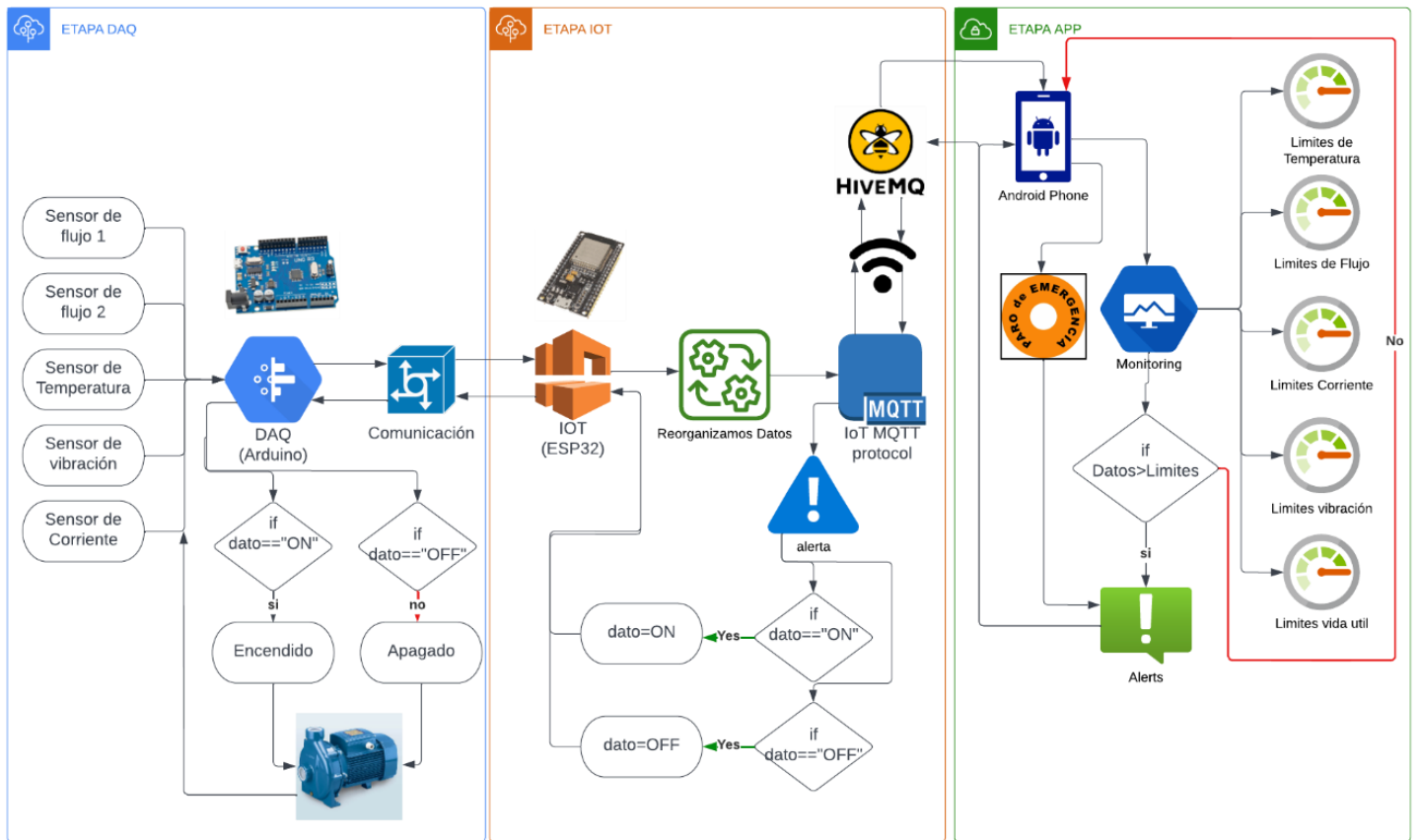
Salgado, M. (2019). *Diseño e implementación de un sistema scada del proceso de llenado de agua en botellas con proyección a la industria 4.0 empleando simatic iot 2040. La Libertad. UPSE, Matriz. Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.*

Soto, V. (2021, Julio 15). *blog.parker.com*. Retrieved from [blog.parker.com: https://blog.parker.com/site/MX/details-home-page/contaminaci%C3%B3n-y-sus-efectos-en-los-sistemas-hidr%C3%A1ulicos-mx](https://blog.parker.com/site/MX/details-home-page/contaminaci%C3%B3n-y-sus-efectos-en-los-sistemas-hidr%C3%A1ulicos-mx)

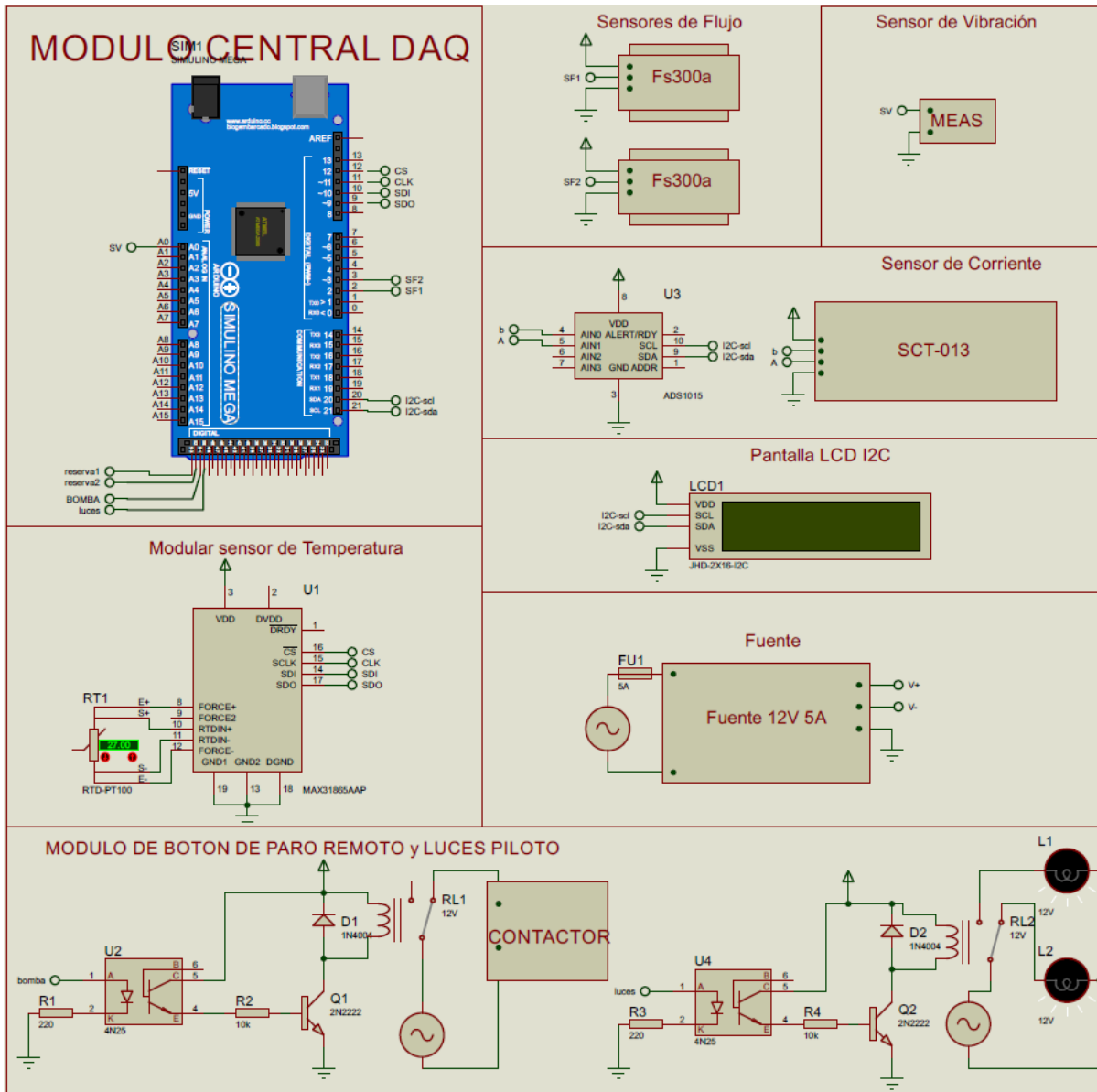
UPCGRAU. (2018). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Catalonia: Universidad Politécnica de Catalunya.

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de bloques



Anexo 2: Diagrama de conexiones



Anexo 3: Scripts referentes del funcionamiento

Etapa DAQ

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <FlowMeter.h>
#include <EEPROM.h>
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
//*****
//**lcd**
//*****
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
//*****
//**variable eeprom**
//*****
int eeAddress = 0;
//*****
//**S.Temperatura**
//*****
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
#define RREF 430.0
#define RNOMINAL 100.0
float sensorValue1;
float temp0 = 0;

//*****
//**S.Flujos**
//*****

FlowMeter *Meter1;
FlowMeter *Meter2;
float volumen;
float cant;
int lim = 1000;

// set the measurement update period to 1s (1000 ms)
const unsigned long period = 1000;

//*****
//**S.Corriente**
//*****
Adafruit_ADS1115 ads;
```

```

const float FACTOR = 30; //30A/1V
const float multiplier = 0.0625F;
float corriente;
//*****
/**S.Vibracion**
//*****

const int PIEZO_PIN = A0; // Piezo output
int piezoADC = 0;
float piezoV = 0.0;

//variable de p[roceso singular
int a = 0;

//*****
/**ALERTAS**
//*****

int r = 0;

//*****
/**botones**
//*****

int sensorVal = 0;
int sensorVal2 = 0;

void Meter1ISR() {
  // let our flow meter count the pulses
  Meter1->count();
}

void Meter2ISR() {
  // let our flow meter count the pulses
  Meter2->count();
}

void setup()
{
  Wire.begin();
  Serial.begin(115200);
  Serial2.begin(115200);//comunicacion esp32
  //SENSOR PT100 MAX
  Serial.println("Adafruit MAX31865 PT100 Sensor Test!");
  thermo.begin(MAX31865_3WIRE);
  //flujo
  // obtenga una nueva instancia de FlowMeter para un sensor de flujo no calibrado y permítale adjuntar su

```

```

//controlador de servicio de interrupción' (ISR) en cada flanco ascendente
Meter1 = new FlowMeter(digitalPinToInterrupt(2), UncalibratedSensor, Meter1ISR, RISING);

// realice este paso de configuración para cada caudalímetro e ISR que haya definido, dependiendo de cuántos necesite
Meter2 = new FlowMeter(digitalPinToInterrupt(3), UncalibratedSensor, Meter2ISR, RISING);

//corriente
ads.setGain(GAIN_TWO);    // ±2.048V 1 bit = 0.0625mV
ads.begin();

volumen = EEPROM.read(eeAddress);
pinMode(47, OUTPUT);
pinMode(49, OUTPUT);
pinMode(51, OUTPUT);
pinMode(53, OUTPUT);
pinMode(4, INPUT_PULLUP);
pinMode(5, INPUT_PULLUP);
//lcd
lcd.begin();
lcd.backlight();

}

void loop()
{
  panel();
  precaucion();
  //corriente
  float currentRMS = getCorriente();
  float power = 230.0 * currentRMS;

  printMeasure("Irms: ", currentRMS, "A ,");
  printMeasure("Potencia: ", power, "W");
  //delay(1000);
  // Serial.print("Irms: ");
  // Serial.print("A, Potencia: ");
  // Serial.print(P, 3);
  // Serial.println("W");
  //delay(100)
  //pt100
  uint16_t rtd = thermo.readRTD();
  float ratio = rtd;
  ratio /= 32768;
  sensorValue1 = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);

```

```

//flujo
flujo();

if (a == 0)
{
    volumen = Meter1->getTotalVolume() + volumen;

    a = 1;
}
else
{

    if (Meter1->getTotalVolume() > volumen)
    {
        volumen = Meter1->getTotalVolume();
        EEPROM.write(eeAddress, volumen);
    }

    cant = 0;
}

//vibracion
vibra();
funciones();

Serial.println(String(sensorValue1) + "/" + String(Meter1->getCurrentFlowrate()) + "/" + String(Meter2-
>getCurrentFlowrate()) + "/" + String( currentRMS, 3) + "/" + String(piezoV, 1) + "/" + String(volumen));
corriente = currentRMS;
Serial2.print(sensorValue1);
Serial2.print("/");
Serial2.print(Meter1->getCurrentFlowrate());
Serial2.print("/");
Serial2.print(Meter2->getCurrentFlowrate());
Serial2.print("/");
Serial2.print( currentRMS, 3);
Serial2.print("/");
Serial2.print( piezoV, 1);
Serial2.print("/");
Serial2.println(volumen);
//delay(500);
lcdpanel();

```

```

}

void flujo()
{
  delay(period);

  // process the (possibly) counted ticks
  Meter1->tick(period);
  Meter2->tick(period);

  // output some measurement result
  //Serial.println("Meter 1 currently " + String(Meter1->getCurrentFlowrate()) + " l/min, " + String(Meter1-
>getTotalVolume()) + " l total.");
  //Serial.println("Meter 2 currently " + String(Meter2->getCurrentFlowrate()) + " l/min, " + String(Meter2-
>getTotalVolume()) + " l total.");

}

float getCorriente()
{
  float voltage;
  float corriente;
  float sum = 0;
  long tiempo = millis();
  int counter = 0;

  while (millis() - tiempo < 1000)
  {
    voltage = ads.readADC_Differential_0_1() * multiplier;
    corriente = voltage * FACTOR;
    corriente /= 1000.0;

    sum += sq(corriente);
    counter = counter + 1;
  }

  corriente = sqrt(sum / counter);
  return (corriente);
}

void vibra()
{
  piezoADC = analogRead(PIEZO_PIN);
  piezoV = piezoADC / 1023.0 * 5.0;
  //Serial.println(piezoV); // Print the voltage.
}

```

```
}
```

```
void printMeasure(String prefix, float value, String postfix)
```

```
{  
  // Serial.print(prefix);  
  // Serial.print(value, 3);  
  // Serial.println(postfix);  
}
```

```
void funciones()
```

```
{  
  if (Serial2.available() > 0)  
  {  
    char recibe = Serial2.read();  
    Serial.print("dato= ");  
    Serial.println(recibe);  
    if (recibe == 'p')  
    {  
      digitalWrite(47, HIGH);  
      digitalWrite(53, HIGH);  
    }  
    if (recibe == 'r')  
    {  
      digitalWrite(47, LOW);  
      digitalWrite(53, LOW);  
    }  
  }  
}
```

```
void precaucion()
```

```
{  
  r = 0;  
  if (Meter1->getCurrentFlowrate() < 0.5)  
  {  
    digitalWrite(47, HIGH);  
    digitalWrite(53, HIGH);  
    r = 1;  
  }  
  if (corriente == 0)  
  {  
    Serial.println("BOMBA INACTIVA");  
    r = 2;  
  }  
}
```

```

if (sensorValue1 > 55)
{
  Serial.println("INICIO DE SOBRECALENTAMIENTO");
  digitalWrite(47, HIGH);
  digitalWrite(53, HIGH);
  r = 3;
}
if (Meter1->getCurrentFlowrate() > Meter2->getCurrentFlowrate())
{
  Serial.println("FLUJO INCOHERENTE");
  digitalWrite(47, HIGH);
  digitalWrite(53, HIGH);
  r = 4;
}
if (piezoV > 4)
{
  Serial.println("ERROR MECANICO");
  digitalWrite(47, HIGH);
  digitalWrite(53, HIGH);
  r = 5;
}
if (volumen > lim)
{
  digitalWrite(47, HIGH);
  digitalWrite(53, HIGH);
  bloqueo();
}
}

```

```

void lcdpanel()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("T=");
  lcd.setCursor(2, 0);
  lcd.print(sensorValue1, 1);
  lcd.setCursor(7, 0);
  lcd.print("C");
  lcd.setCursor(12, 0);
  lcd.print("Vo=");
  lcd.setCursor(15, 0);
  lcd.print(volumen, 0);
  lcd.setCursor(19, 0);
  lcd.print("L");
}

```

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("F1=");
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print(Meter1->getCurrentFlowrate(), 1);
lcd.setCursor(7, 1);
lcd.print("l/m");
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print("Vi=");
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(piezoV, 1);
lcd.setCursor(18, 1);
lcd.print("Hz");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("F2=");
lcd.setCursor(3, 2);
lcd.print(Meter2->getCurrentFlowrate(), 1);
lcd.setCursor(7, 2);
lcd.print("l/m");
lcd.setCursor(12, 2);
lcd.print("ESTADO:");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("I=");
lcd.setCursor(2, 3);
lcd.print(corriente, 3);
lcd.setCursor(8, 3);
lcd.print("A");
if (r == 0)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("NORMAL ");
}
if (r == 1)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("MFBC0 ");
}
if (r == 2)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("BOFF0 ");
}
if (r == 3)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("SCB60 ");
}

```



```

}
if (r == 4)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("MFBC1 ");
}
if (r == 5)
{
  lcd.setCursor(12, 3);
  lcd.print("EMV5 ");
}
delay(1);
}

void bloqueo()
{
  while (true)
  {
    sensorVal = digitalRead(4);
    sensorVal2 = digitalRead(5);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(" MAQUINA ESPERANDO ");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(" REPARACION ");
    if (sensorVal == LOW)
    {
      if (sensorVal2 == LOW)
      {
        break;
      }
    }
    delay(1);
  }
}

void panel()
{
  sensorVal = digitalRead(4);
  sensorVal2 = digitalRead(5);
  if (sensorVal == LOW) {

    digitalWrite(47, LOW);
    digitalWrite(53, LOW);
    Serial.println("on");
    delay(500);
  }
}

```

```

}
if (sensorVal2 == LOW) {
  digitalWrite(47, HIGH);
  digitalWrite(53, HIGH);
  Serial.println("off");
  delay(500);
}
}

```

Etapa IOT

```

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Separador.h>
#include <HardwareSerial.h>
//#include <ArduinoJson.h>

/*****
/***** SERIAL *****/
/*****

#define RXD2 16
#define TXD2 17
boolean transfer = false;
//HardwareSerial Serial2( 2 );
/*****
/***** MQTT CONFIG *****/
/*****

const char *mqtt_server = "broker.hivemq.com";
const int mqtt_port = 1883;
const char *mqtt_user = "";
const char *mqtt_pass = "";
const char *root_topic_subscribe = "read";
const char *root_topic_publish = "write";

/*****
/***** WIFICONFIG *****/
/*****

const char* ssid = "*****";
const char* password = "*****";

/*****
/***** GLOBALES *****/
/*****

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

```

```

char msg[50];
long count = 0;
String dato;

//*****
/** FUNCIONES **
//*****

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length);
void reconnect();
void setup_wifi();

float temp = 0;
float flujo = 0;
float flujo2 = 0;
float vibra = 0;
float corri = 0;
int cant = 0;

//*****
//*****BOMBA*****
//*****

int pin_led = 23;

//*****
//***SEPARADOR
//*****

Separador s;
int activate = 0;

void setup ()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial2.begin(115200, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
  //Serial1.begin(115200, SERIAL_8N1, RXD1, TXD1); //SERIAL_8N1 8-bit No parity 1 Stop bit
  //Serial1.begin(115200); //SERIAL_8N1 8-bit No parity 1 Stop bit
  setup_wifi();
  //ardi.begin(115200, SERIAL_8N1, 26, 25);
  client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
  client.setCallback(callback);
  Serial.println("conectado");
  pinMode(pin_led, OUTPUT);
}

void loop ()

```

```

{
while (Serial2.available())
{
char c = Serial2.read();
dato += c;
//n++;
if (c == '\n')
{
transfer = true;
}
}
//delay(1000);
//Serial.println(dato);
String v1 = s.separa(dato, '/', 0);
temp = v1.toFloat();
//Serial.println(temp);
String v2 = s.separa(dato, '/', 1);
flujo = v2.toFloat();
//Serial.println(flujo);
String v3 = s.separa(dato, '/', 2);
flujo2 = v3.toFloat();
//Serial.println(flujo2);
String v4 = s.separa(dato, '/', 3);
vibra = v4.toFloat();
//Serial.println(vibra);
String v5 = s.separa(dato, '/', 4);
corri = v5.toFloat();
//Serial.println(corri);
String v6 = s.separa(dato, '/', 5);
cant = v6.toInt();
//Serial.println(corri);
if (transfer)
{
dato = "";
transfer = false;
}
if (temp == 0 && flujo == 0 && flujo2 == 0 && vibra == 0 && corri == 0 && cant == 0)
{
activate = 1;
}
else
{
activate = 0;
}
}

```

```

if (!client.connected()) {
  reconnect();
}

if (client.connected())
{
  if (activate == 0)
  {
    String x = ",";

    String str = temp + x + flujo + x + flujo2 + x + vibra + x + corri + x + cant;
    str.toCharArray(msg, 50);
    client.publish(root_topic_publish, msg);
    //Serial.print("res -> " );
    Serial.println(msg);
    delay(100);
  }
}

client.loop();
}

//*****
//***  CONEXION WIFI  ***
//*****

void setup_wifi() {
  delay(10);
  // Nos conectamos a nuestra red Wifi
  Serial.println();
  //Serial.print("Conectando a ssid: ");
  //Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("Conectado a red WiFi!");
  Serial.println("Dirección IP: ");

```

```

Serial.println(WiFi.localIP());
}

//*****
/**  CONEXION MQTT  **
//*****

void reconnect() {

while (!client.connected()) {
Serial.print("Intentando conexión Mqtt...");
// Creamos un cliente ID
String clientId = "TEST";
clientId += String(random(0xffff), HEX);
// Intentamos conectar
if (client.connect(clientId.c_str(), mqtt_user, mqtt_pass)) {
Serial.println("Conectado!");
// Nos suscribimos
if (client.subscribe(root_topic_subscribe)) {
Serial.println("Suscripcion ok");
} else {
Serial.println("fallo Suscripción");
}
} else {
Serial.print("falló :( con error -> ");
Serial.print(client.state());
Serial.println(" Intentamos de nuevo en 5 segundos");
delay(5000);
}
}
}

//*****
/**  CALLBACK  **
//*****

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
String incoming = "";
Serial.print("Mensaje recibido desde -> ");
Serial.print(topic);
Serial.println("");
for (int i = 0; i < length; i++) {
incoming += (char)payload[i];
}
incoming.trim();
}

```

```
Serial.println("Mensaje -> " + incoming);
```

```
if (incoming=="paro")
```

```
{
```

```
  Serial2.println('p');
```

```
}
```

```
if (incoming=="reanudar")
```

```
{
```

```
  Serial2.println('r');
```

```
}
```

```
}
```

Anexo 4: Evidencia Fotográfica

