INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Diseño de un sistema de monitoreo de condición de modos de falla del equipo encargado del enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos de la compañía ElectroPlast

Informe de Práctica de especialidad para optar por el título de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

Carlos Mario Cubero Masís

I SEMESTRE 2022

Carrera evaluada y acreditada por: Canadian Engineering Accreditation Board Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes d'Ingénierie

Profesor Guía

Dr. Juan José Montero Jiménez

Asesor Industrial

Ing. Christian Andrés Vega Ramírez

Tribunal Examinador

Ing. Luis Felipe Córdoba Ramírez

Ing. Julio César Rojas Gómez

Datos personales

Nombre completo: Carlos Mario Cubero Masís
Número de cédula: 207550356
Número de carné: 2014082356
Edad: 25
Números de teléfono: 88057668
Correos electrónicos: cacubero@estudiantec.cr / carlosm15cubero@gmail.com
Dirección exacta de domicilio: 200 m oeste del complejo deportivo JM Cubero, calle San Rafael, Sarchí, Alajuela.

Datos de la Empresa

Nombre: Electroplast
Actividad Principal: Moldeo por inyección de plásticos para industria médica, farmacéutica y electrónica.
Dirección: Parque Empresarial la Ceiba, Orotina.
Contacto: mantenimiento@electroplast.com
Teléfono: 8526-5292

Diseño de un sistema de monitoreo de condición de modos de falla del equipo encargado del enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos de la compañía ElectroPlast. Por Carlos Mario Cubero Masis se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribution-NoComercial-Compartirlgual 4.0 International.

Carta de aceptación de la Empresa

Carta de aceptación de la empresa

La Ceiba, 29 de octubre de 2021

Estimado:

Ing. Ignacio Del Valle Granados

Hago de su conocimiento que he aceptado a Carlos Mario Cubero Masis, carné: 2014082356, cédula: 207550356, estudiante de la carrera Ingeniería en Mantenimiento Industrial para que realice el Trabajo Final de Graduación en la empresa ElectroPlast, cedula jurídica: 3-101-082440 y bajo el título "Diseño de un sistema experto de monitoreo de modos de falla basado en el pronóstico y evaluación de la vida útil para el mantenimiento del Chiller usado para el enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos de la compañía ElectroPlast". De antemano comento que contará con todo nuestro apoyo en lo referente a información y material para desarrollar el proyecto.

Quedo a su disposición para cualquier consulta.

Cordialmente,

CHRISTIAN ANDRES VEGA RAMIREZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por CHRISTIAN ANDRES VEGA RAMIREZ (FIRMA)
Fecha: 2021.10.29 23:20:35 -06'00'

Ing. Christian Vega Ramírez

Infraestructura

Dedicatoria

A mis padres, Marvin y Fanny, por su valentía, por siempre darme su apoyo, su amor incondicional y por todo el esfuerzo realizado para lograr que nunca me faltara nada. Siempre serán mi mayor inspiración.

A mis hermanas, Sofia y María, por haber estado ahí cuando más lo necesité, por toda la ayuda, y por todo ese amor y felicidad que siempre me han entregado. Ustedes dos para mí, siempre fueron y serán un modelo a seguir.

A Dios, por toda la sabiduría entregada durante mi proceso universitario y mi diario vivir.

Agradecimientos

Incansablemente, quiero agradecer a mis padres y a mis hermanas, ustedes fueron el pilar más importante en todo mi proceso de aprendizaje y, sobre todo, el pilar fundamental en mi vida.

Les agradezco a todos mis familiares que de una u otra forma siempre me brindaron su ayuda en todo el proceso para concluir mis estudios.

Les agradezco a todos esos amigos y compañeros que compartieron muchos momentos durante la carrera; gracias por haber hecho de esta experiencia de vida algo muy enriquecedor.

A mi profesor guía, el Dr. Juan José Montero Jiménez, quien siempre estuvo dispuesto y atento a brindarme ayuda y transmitirme su conocimiento; por aconsejarme y brindarme recomendaciones y observaciones durante todo el proceso llevado a cabo para culminar este proyecto.

A la empresa ElectroPlast, por abrirme las puertas para llevar a cabo este trabajo.

Gracias al Ing. Christian Vega Ramírez, quien me respaldó, ayudó y transmitió su conocimiento en todo lo que necesité.

Al Tecnológico de Costa Rica, profesores de las diferentes áreas de la carrera y a la Escuela de Electromecánica, quienes fueron la pieza fundamental en toda mi formación profesional.

Contenido

Índice de figuras x

Índice de tablas xii

Resumen 1

Abstract 3

1. Capítulo I. Introducción 5

1.1. Introducción 5

1.2. Antecedentes 6

1.3 Reseña de la empresa 8

1.3.1 Misión 8

1.3.2 Visión 8

1.3.3 Valores de la empresa 9

1.3.4 Estándares de servicio 9

1.3.5 Enfoque de objetivos de la empresa 9

2. Capítulo II. Planteamiento del problema 12

2.1 Planteamiento del problema 12

2.2 Objetivos del proyecto 14

2.2.1 Objetivo general 14

2.2.2 Objetivos específicos 14

2.3 Justificación 15

2.4 Metodología 17

2.5 Alcance 18

2.6 Limitaciones 18

3. Capítulo III. Marco teórico 20

3.1 Marco teórico 20

3.1.1 Mantenimiento industrial 20

3.1.2 Mantenimiento correctivo 20

3.1.3 Mantenimiento preventivo 20

3.1.4 Mantenimiento predictivo 21

3.1.5 Implementación de la norma ISO 17359:2018 22

3.1.6 Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) 24

3.1.7 Vida útil remanente (*Remaining Useful Life, RUL*) 27

3.1.8 Sistema de inyección de plásticos 28

3.1.9 Sistemas de enfriamiento de agua para procesos industriales 30

3.1.10 Sistema de monitoreo 33

3.1.11 LabView 35

4. Capítulo IV. Análisis del sistema de enfriamiento de agua 37

4.1 Funciones y estándares de desempeño de cada elemento 38

4.2 Identificación de los modos de falla 41

4.3 Identificación de métodos de detección y controles existentes 42

4.4. Efectos locales y finales 44

4.5 Identificación de las causas de falla 47

4.6 Análisis de criticidad 49

5. Capítulo V. Sistemas de monitoreo 58

5.1 Sistema recirculación de agua helada 59

5.1.1 Sensores y equipo 62

5.1.2 Base de datos y *software* para procesamiento y creación de la interfaz 62

5.2 Prototipo para la toma de datos en tiempo real 63

5.2.1 Implementación del dispositivo 65

5.2.2 Comunicación entre Adafruit y LabView 68

5.3 Implementación de LabView 70

5.3.1 Monitoreo de la corriente 71

5.3.2 Monitoreo de la eficiencia 73

5.3.3 Monitoreo del desbalance de la tensión 75

5.3.4 Monitoreo de la presión de salida de la bomba 77

5.3.5 Control de horas para engrase 79

5.3.6 Interfaz de usuario 80

5.3.7 Datos de la simulación realizada..... 81

5.4 Cuadro comparativo entre el sistema actual de monitoreo empleado en la empresa y el propuesto en este proyecto..... 83

6. Capítulo VII. Análisis financiero..... 85

7. Capítulo VII. Conclusiones..... 89

8. Capítulo XIII. Oportunidades de mejora..... 90

9. Capítulo IX. Bibliografía..... 91

10. Capítulo X. Apéndice..... 97

A. Cogido fuente del microcontrolador del prototipo..... 97

Anexos..... 100

A. Cotización de la empresa Multifrío para el mantenimiento preventivo de los equipos 100

B. Datos de sensores y equipo a utilizar según las cotizaciones realizadas..... 101

Índice de figuras

Figura 1. Organigrama del Departamento de Mantenimiento de la empresa. 11

Figura 2. Pasos para la implementación del mantenimiento preventivo 21

Figura 3. Curva P-F del comportamiento de una falla funcional 22

Figura 4. Diagrama de flujo de monitoreo de condición 23

Figura 5. Diagrama de flujo para realización de un AMFEC 25

Figura 6. Ejemplo de Matriz de Criticidad cualitativa 26

Figura 7. Ejemplo de la estimación de la vida útil remanente de equipos industriales 28

Figura 8. Unidades de una máquina de inyección 29

Figura 9 .Duración aproximada de las diferentes etapas del ciclo de inyección en una máquina inyectora convencional 30

Figura 10. Esquema de un sistema básico de refrigeración 31

Figura 11. Detalle de los elementos que forman el sistema de un Chiller 32

Figura 12. Representación de LabView para las pruebas de automatización 36

Figura 13. Chiller industrial marca Xiecheng de doble compresor Modelo XC-L120WS-2-R7 38

Figura 14. Diagrama y descripción de los elementos del Chiller según el manual Xiecheng 39

Figura 15. Arquitectura del sistema de monitoreo 58

Figura 16. Unidad de bombeo de agua helada 60

Figura 17. Diagrama del circuito implementado 63

Figura 18. Prototipo para la adquisición de datos de corriente del motor 64

Figura 19. Comparación en la toma de datos del dispositivo respecto al Fluke 323 66

Figura 20. Indicadores numéricos y gráfica de valores de corriente tomados por el dispositivo 67

Figura 21. Base de datos en Excel..... 68

Figura 22. Protocolo de conexión entre LabView y el IP de la página donde se desea extraer el contenido..... 69

Figura 23. Comunicación vía TCP entre Adafruit y LabView 70

Figura 24. Datos de placa del motor de la bomba a monitorear..... 71

Figura 25. Estructura para control y monitoreo de la corriente RMS en el motor..... 72

Figura 26. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción 74

Figura 27. Monitoreo de la eficiencia del motor..... 75

Figura 28. Simulador de señales de tensión para monitorear el desequilibrio de la tensión en las líneas de alimentación del motor 77

Figura 29. Alarma enviada al correo electrónico 77

Figura 30. Programa para alertas sobre una presión incorrecta en el sistema..... 79

Figura 31. Conteo de las horas para lubricación de los rodamientos del motor 80

Figura 32. Interfaz de usuario para el sistema de monitoreo 81

Figura 33. Datos almacenados producto de la simulación en formato Excel 82

Índice de tablas

Tabla 1 *Planteamiento del problema de acuerdo con la situación de la empresa* 13

Tabla 2. *Metodología usada para la ejecución del proyecto*..... 17

Tabla 3. *Funciones y estándares de desempeño de los componentes del equipo* 40

Tabla 4. *Modos de falla de cada elemento del equipo*..... 41

Tabla 5. *Métodos de detección y controles existentes para los modos de falla del equipo según el elemento* 43

Tabla 6. *Efectos locales y finales asociados a los modos de falla*..... 44

Tabla 7. *Causas de los modos de falla en los componentes del equipo*..... 47

Tabla 8. *Consecuencias que podrían generar los modos de falla descritos*..... 49

Tabla 9. Numeración según el nivel de severidad de los modos de falla 51

Tabla 10. *Tabla de criticidad según los modos de falla* 52

Tabla 11. *Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Producción*..... 54

Tabla 12. *Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Calidad*..... 55

Tabla 13. *Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Calidad*..... 56

Tabla 14 *Identificación de los elementos utilizados en el prototipo*..... 64

Tabla 15. *Ventajas y desventajas del modelo de sistema de monitoreo que se encuentra actualmente en la empresa*..... 83

Tabla 16. *Ventajas y desventajas del modelo de sistema de monitoreo propuesto en el presente proyecto*..... 84

Tabla 17. *Costo de los componentes del sistema de adquisición de datos* 85

Tabla 18. *Costo por instalación y mantenimiento* 87

Tabla 19. *Flujo de caja para proyecto en los próximos tres años* 88

Resumen

En el presente proyecto, se propone diseñar un sistema de monitoreo, según los modos de falla inaceptables, con base en el análisis de criticidad del equipo de refrigeración de agua para el enfriamiento de los moldes de las máquinas inyectoras de la empresa ElectroPlast.

Actualmente, en la empresa se implementa un sistema de monitoreo de las condiciones en las que debe estar el agua helada, tal como presión, temperatura y caudal; sin embargo, no hay un monitoreo que se enfoque en el equipo del sistema de refrigeración de agua. Se toma en cuenta que ElectroPlast posee un equipo con menos de un año de uso, lo que hace que este sea el momento ideal para empezar a tomar datos relevantes de los comportamientos de los elementos críticos para obtener históricos de las condiciones, un patrón del estado del equipo y poder determinar en un tiempo establecido qué tanta degradación se muestra con el paso del tiempo, así como contar con un sistema que presente un monitoreo en tiempo real del funcionamiento de los equipos y genere una alarma en caso de que algún parámetro medido esté fuera de lo normal.

Se implementa un Análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad (AMFEC) como herramienta para determinar los modos de falla más relevantes en el sistema y, por medio de estos, se relacionaron al elemento del equipo para identificar cuál es de suma importancia monitorear y qué se debe monitorear, con base en la categoría denominada como “Inaceptable”.

Posteriormente, se crea un prototipo para ejemplificar cómo sería un método de monitoreo aplicado capaz de tomar datos en tiempo real y que por medio de comunicación inalámbrica se transmitan los datos del comportamiento de las variables tomadas del equipo, que en este caso fue el de la corriente como propuesta para implementar a futuro un Análisis de la Firma de la Corriente del Motor, o AFCM por sus siglas.

Con el *software* LabView, por medio de una medición a través de simulación de variables importantes, según el AMFEC realizado y siguiendo el índice de salud del equipo o elemento, se crean rangos de parámetros en los cuales el equipo debe estar trabajando y, en caso de algún fallo o funcionamiento incorrecto, se notifica por medio de correo a las partes interesadas. Además, se

guarda un histórico de los datos, con el fin de una futura implementación de sistemas expertos en la empresa.

Finalmente, se realiza el análisis económico por medio de los indicadores VAN y TIR para determinar la viabilidad del proyecto, el cual dio como resultado la viabilidad del proyecto con una ganancia de un 48 % en tan solo un año, si se llegara a realizar su implementación.

Palabras clave: monitoreo de condición, modos de falla, sistema de refrigeración de agua, sistema de recirculación, elemento.

Abstract

In the present project, it is proposed to design a monitoring system, according to the unacceptable failure modes, extremely in the criticality analysis of the water cooling equipment for the cooling of the molds of the ElectroPlast company's injection machines.

Currently, the company implements a monitoring system for the conditions in which the chilled water must be, such as pressure, temperature and flow, however, there is no monitoring that focuses on the equipment of the water cooling system. It is taken into account that ElectroPlast has equipment with less than a year of use, which makes this the ideal time to start taking relevant data on the behavior of critical elements to obtain historical conditions, a pattern of the state of the equipment and to be able to determine in a set time how much degradation is shown over time, as well as having a system that presents real-time monitoring of the operation of the equipment and generates an alarm in the event that any parameter measured this is out of the ordinary.

An Analysis of Failure Modes, Effects and Criticality (FMECA) is implemented as a tool to determine the most relevant failure modes in the system, and through these, they were related to the element of the equipment to identify which one is of utmost importance. and monitor what should be monitored, broadly in the category called “Unacceptable”.

Subsequently, a prototype is created to exemplify what an applied monitoring method would be capable of taking data in real time and transmitting data on the behavior of the variables taken from the equipment by means of wireless communication, which in this case was that of the current. as a proposal to implement in the future a Motor Current Signature Analysis or AFCM for its acronym.

With the LabView software, by means of a measurement by means of simulation of important variables, according to the AMFEC carried out and following the health index of the equipment or element, ranges of parameters are created in which the equipment must be working, and in case of any failure or incorrect operation is notified by mail to the interested parties, in addition, a

history of the data is kept for the purpose of a future implementation of expert systems in the company.

Finally, the economic analysis is carried out through the NPV and IRR indicators to determine the viability of the project, which resulted in the viability of the project, leaving a profit of 48% in just one year if its implementation were carried out.

Keywords: condition monitoring, failure modes, water cooling system, recirculation system, element.

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Introducción

ElectroPlast es una empresa de moldeo de inyección de plásticos de ingeniería de clase mundial; compite en la búsqueda de la implementación de nuevos equipos y sistemas que logren cumplir con las demandas de calidad y eficiencia de una industria de primer mundo.

El control sobre el monitoreo de sus equipos es una de las áreas de mayor interés a trabajar, puesto que existe mayor eficiencia cuando se maximiza la producción y se evitan posibles paros no programados o pérdida parcial o total de algún equipo por falta de control en estos. Por ello, el hecho de tener el control sobre el monitoreo de variables de trabajo de los equipos hace que el departamento de mantenimiento proyecte a la implementación de sistemas basado en el monitoreo de la condición en tiempo real, para visualizar el comportamiento de los equipos desde cualquier otra área de la empresa ajena al cuarto de máquinas donde se encuentran los sistemas centralizados.

A pesar de que las fallas de un equipo son inevitables con un monitoreo continuo, una base de datos robusta del comportamiento de las variables medidas en el equipo, además de sistemas expertos capaces de aprender el comportamiento y predecir fallas, hacen que se puedan reducir al mínimo los fallos en los equipos (Quiroga, 2011). Por medio de un análisis profundo de modos de falla del equipo encargado del enfriamiento de agua para extraer el calor de los moldes del sistema de inyección, este proyecto pretende determinar cuál debe ser el modo de falla de carácter indispensable a monitorear, la cantidad y los tipos de sensores adecuados para el modo de falla del elemento crítico y crucial. Con esto se busca generar un sistema de monitoreo capaz de captar los datos del comportamiento de las variables, monitorear y establecer los protocolos de comunicación, transmisión de datos y por medio de un *software* dar un procesamiento de estos para generar alarmas en caso de funcionamiento incorrecto. Además, la idea es generar una base de datos de las variables a medir como oportunidad de mejora futura basados en la industria 4.0 y crear un sistema experto que garantice la predicción de una falla del sistema en un tiempo determinado con el histórico obtenido.

También se toma en cuenta un análisis financiero, en el cual se abarca el costo del equipo requerido, mano de obra y su mantenimiento, además del sistema de base de datos.

1.2. Antecedentes

El control y la detección de fallas en un equipo es de vital importancia para evitar algún peligro hacia los operarios, daños en un proceso o pérdida de un equipo costoso para una compañía, por lo cual diversos estudios e implementaciones de sistemas que diagnostiquen fallas se vuelven más usuales. Una manera de detección y diagnóstico de fallas se plantea en el artículo de Hurtado, Villareal & Villareal (2017), quienes por medio de la recolección de diferentes trabajos de mayor relevancia, realizados por otros actores que postulan técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales, lógica difusa y neurodifusa, agrupan sistemas inmunes para lograr un exitoso y confiable desarrollo de detección y diagnóstico de fallas.

Ahmed *et al*. (2021), en un amplio artículo, exponen sobre técnicas de inteligencia artificial para lograr el modelado y la optimización de sistemas de refrigeración; por medio de la inteligencia computacional se discute sobre técnicas de modelado en aplicaciones de refrigeración como las redes neuronales artificiales, el método de superficie de respuesta y análisis de regresión para optimizar el coeficiente de rendimiento o COP (por sus siglas en inglés) del sistema de refrigeración, donde según la técnica aplicada se demuestra el costo en la optimización del COP, costos totales, así como la eficiencia energética y la capacidad de enfriamiento.

Una investigación que da como ejemplo la implementación de sistemas expertos e inteligentes que puedan pronosticar una falla en el equipo es la de Coble & Hines (2011); en ella, los autores proponen un modelo basado en el pronóstico específico denominado Modelo de Ruta General con la actualización Bayesiana en el algoritmo, que lleva a cabo una serie de pasos que permiten la recolección de datos pertinentes, tomar en cuenta comportamientos anómalos, y así estimar la vida útil remanente de un equipo, así como la aplicación del pronóstico de fallas y gestión de la salud (PHM).

En el área de sistemas HVAC, Satta *et al*. (2017) implementaron un sistema donde se tomó un grupo de 17 sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado de un edificio hospitalario; a estos se les tomaron datos de temperatura, presión y corriente consumida durante un año con el objetivo de generar un mantenimiento predictivo, donde se generara un sistema capaz de pronosticar fallas y así asegurar la disponibilidad de los equipos analizados.

En el monitoreo de torres de enfriamiento, Blackburn, Tuttle & Powell (2020) propusieron en su artículo una novedosa aplicación de optimización de tiempo real basado en *self maintenance*, y la optimización de enjambre de partículas de una torre de enfriamiento que brinda servicio a una central eléctrica de carbón bajo una carga variable. Simularon 12 celdas de torres en paralelo por medio de datos históricos de operación agregados a una red neuronal artificial para que predijera el consumo de energía general, lo cual llegó a producir un ahorro de energía del 6.7 % de lo que se tenía anteriormente sin necesidad de agregar *hardware* extensos adicionales a la torre de enfriamiento.

Un ejemplo de la implementación de un sistema experto lo propusieron los autores Santoro, Mendoza & Rincon (2021). En su artículo exponen un modelo de control predictivo o MPC (por sus siglas en ingles) no lineal de bajo costo con un algoritmo de control de encendido y apagado para un edificio. La idea principal fue optimizar en tiempo real el consumo energético de los sistemas HVAC con metodologías sofisticadas y un enfoque de facilidad en el uso de una interfaz para los administradores de los equipos. Esta representa una propuesta muy actual para implementar este tipo de sistemas.

Uno de los elementos del sistema de refrigeración al que se propone llevar un control y monitoreo más rigurosos es a la torre de enfriamiento, ya que como lo proponen Schulze, Thiede, Thiede, Kurle & Blume (2019), en su artículo acerca de la gestión de torres de enfriamiento en empresas de fabricación con la implementación de sistemas cibernéticos, este tipo de torres son altas demandantes de agua y energía a nivel industrial. Enfatizan que la implementación de este tipo de equipos debe tener una gestión con objetivos estratégicos, tácticos y operativos, ya que es de suma

importancia en la relación de la confiabilidad de operación, eficiencia en recursos y energía, así como posibles impactos en la salud y medioambiente.

Mourtzis, Angelopoulos & Panopoulos (2021) plantean cómo los sitemas de refrigeración y almacenamiento de frío tienen la necesidad de una optimización del funcionamiento; señalan que, aplicando técnicas de la industria 4.0 con tecnología como el internet de las cosas a los equipos mencionados, se pueden monitorear de forma remota por medio de sensores inalámbricos, una adquisión de datos y algoritmos inteligentes para un mantenimiento predictivo, además de implementar interfases amigables para la observación y monitoreo de datos.

1.3 Reseña de la empresa

ElectroPlast es una empresa 100 % familiar y costarricense fundada en 1985. En las últimas tres décadas, se ha encargado de brindar el servicio de creación de piezas por inyección a base de diferentes tipos de plástico que son usadas en grandes industrias médicas, farmacéuticas y electrónicas. Empezó en un pequeño local ubicado en Santo Domingo de Heredia y con el pasar del tiempo fue creciendo hasta llegar a ser lo que es hoy día, una empresa ubicada en una zona Franca con instalaciones nuevas y adecuadas para aumentar la producción y clientes a nivel mundial. Su actual ubicación se encuentra en el parque Empresarial la Ceiba, Orotina.

1.3.1 Misión

La empresa ElectroPlast indica que su misión es: “Satisfacer las necesidades del mercado que demande un alto grado de calidad y especialidad en el campo de la inyección de plásticos, monitoreando a la vez el desempeño de nuestras actividades, reduciendo la contaminación y en apoyo a la conservación del ambiente” (ElectroPlast, comunicación personal, 22 de marzo de 2022).

1.3.2 Visión

La visión de la empresa es: “1. Ser líderes en el nicho de mercado de clientes que demande alta calidad, altas producciones y confiabilidad en las entregas de sus productos plásticos, sabiendo de

que estos han sido producidos reduciendo el impacto causado al ambiente. 2. Que clientes actuales y potenciales nos identifiquen como la mejor opción disponible debido a nuestro Sistema de Gestión Ambiental y nuestra imagen de empresa de 'Clase Mundial'" (ElectroPlast, comunicación personal, 22 de marzo de 2022).

1.3.3 Valores de la empresa

- Calidad: en las entregas
- Compromiso: con nuestras políticas
- Conducta: ética y honestidad

(ElectroPlast, comunicación personal, 22 de marzo de 2022)

1.3.4 Estándares de servicio

- Amabilidad: en todo momento
- Rapidez: de respuesta
- Cumplimiento: en los compromisos

(ElectroPlast, comunicación personal, 22 de marzo de 2022)

1.3.5 Enfoque de objetivos de la empresa

- Producción
- Calidad

- Ambiente

(ElectroPlast, comunicación personal, 22 de marzo de 2022)

1.3.6 Organigrama del Departamento de Mantenimiento

El departamento abarca dos áreas; una de ellas se enfoca en el mantenimiento y gestión de los equipos y la otra, en la infraestructura de la empresa. El área de mantenimiento industrial se divide en grupos de trabajo; uno es el mantenimiento correctivo, conformado por cuatro técnicos, quienes cuentan con mayor experiencia en las ramas técnicas como la eléctrica, la mecánica y la electrónica; el grupo de mantenimiento preventivo posee tres técnicos que se encargan única y exclusivamente de realizar tareas preventivas a los equipos según indicaciones de los manuales de estos, ya sean diarias, semanales, trimestrales, anuales o según se requiera. Por último, está el grupo de infraestructura que consta de dos técnicos encargados de mantener en óptimas condiciones las instalaciones de la empresa. En la figura 1 se muestra cómo está divido el departamento.

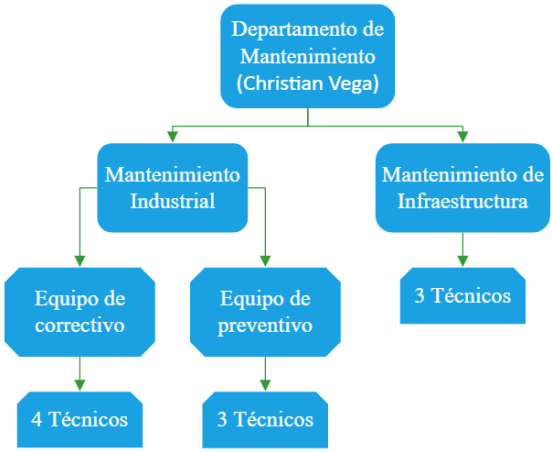


Figura 1. Organigrama del Departamento de Mantenimiento de la empresa. Fuente: ElectroPlast.

2. Capítulo II. Planteamiento del problema

2.1 Planteamiento del problema

Según la información brindada por el jefe de mantenimiento, Christian Vega Ramírez, actualmente el sistema de enfriamiento de agua es un equipo cuyo diseño e instalación estuvo a cargo de la empresa Multifrío, la cual se encarga de los mantenimientos preventivos del sistema y de los mantenimientos correctivos, esto último solamente cuando alguno de los técnicos de mantenimiento industrial de la empresa no logre resolver el problema. Se indica, además, que son los técnicos del grupo de mantenimiento preventivo quienes se encargan del monitoreo e inspección del sistema; en sitio, los equipos se revisan mínimo una vez por turno, y al ser una empresa que trabaja en turnos de 12 horas quiere decir que no se lleva un control riguroso del monitoreo del equipo.

Existe un sistema de monitoreo que la empresa Multifrío instaló y programó para tomar datos cada 15 minutos con respecto a las temperaturas del agua de entrada y salida del equipo, flujo, presión diferencial del agua en el Chiller y si las bombas están encendidas o apagadas. En caso de que se genere una alarma porque alguna de las variables tomadas está fuera de los parámetros establecidos, solo se activa una indicación de alerta en el sistema y la única manera de darse cuenta es al ingresar a la interfase creada en la página web, en las inspecciones en sitio o por el paro de alguna de las máquinas inyectoras. Este sistema no genera notificaciones de alarmas directas, como mensajes vía correo electrónico al personal a cargo del monitoreo del equipo, ni almacenamiento de variables de funcionamiento, por lo cual solo dispone de un monitoreo muy general de las condiciones de trabajo y no de los equipos en sí, puesto que de momento no se valoró tomar en cuenta la vida útil del equipo, sino solo su puesta en marcha. Cabe destacar que los técnicos con los que cuenta la empresa se encargan de muchas tareas en la empresa, pero no son especialistas del sistema de enfriamiento de agua, como lo es el Chiller o el sistema de recirculación de flujo, por lo que un elemento dañado implica no detectar ni dejar registro de una falla en el momento en que se da o, peor aún, un paro de tiempo no establecido por esperar al servicio de mantenimiento correctivo de la empresa Multifrío.

En este proyecto no se abarcará el monitoreo completo del equipo, pero se debe tomar en cuenta que lograr que la mayor parte de sus sistemas cuenten con estándares de una industria 4.0 generaría valor agregado, control de los procesos y posibles ahorros en consumo de mantenimientos preventivos de los equipos. A esto se refieren Mon & Del Giorgo (2021), quienes plantean que la industria 4.0 en cualquer ámbito de empresa, ya sea pyme o a nivel industrial, requiere de la integración de redes en las que las personas a cargo de los procesos tengan comunicación constante con los equipos para facilitar múltiples aspectos productivos, donde se disminuyen costos y se incrementa la complejidad de sus productos con la implentación de tecnologías a los sistemas,. Además, esto abre un mundo a las fábricas inteligentes donde se requieren *software* y *hardware* indicados para implemetar con presición los modelos de estos sistemas de la indutria 4.0.

Tabla 1.

Planteamiento del problema de acuerdo con la situación de la empresa

Debiera	Llegar a un nivel 4 de la industria en el cual los equipos estén conectados a un sistema de monitoreo de condición, donde se recolecte información para que en una oportunidad de mejora esta sea analizada por sistemas inteligentes de predicción de fallas.
Dato suministrado	95 % de las empresas que reportan implementación de un sistema de monitoreo, sumado a un mantenimiento predictivo 4.0, tienen un incremento de mínimo 9 % del tiempo efectivo de operación, reducción del costo un 12 %, disminución del riesgo en seguridad, salud y medioambiente 14 % y en mejoras en calidad de producto y extención de la vida útil de las máquinas hasta un 20 %. Además, según Duffuaa, Raouf y Campbell (2000), la distribución de trabajo de reparación del mantenimiento debe ser 70 % planeado y 30 % no planeado.
Referencias bibliograficas	Trujillo (2019); Duffuaa, Raouf y Campbell (2000).

Desviación	En ElectroPlast se reporta la implementación de un sistema de monitoreo general, no de los equipos en sí, que además no emite notificaciones de alarmas de manera directa al personal a cargo por algún medio, como correo electrónico, ni se da el almacenamiento de datos de las variables tomadas. Por lo tanto, solo se piensa en

	la operación del día a día y no en el funcionamiento futuro de los equipos, lo cual perjudica la competitividad y genera un posible aumento en las pérdidas por costos de paros no programados por mantenimiento correctivo, falta de criterio para el mantenimiento preventivo o inclusive por falta de datos históricos para un mantenimiento predictivo del equipo en la empresa.

Realidad	El equipo de enfriamiento de agua para los moldes cuenta con un sistema de monitoreo de temperatura, presión y caudal del agua enfriada por el Chiller; además, detecta si las bombas de recirculación de agua están detenidas. No se guardan datos de operación para históricos y el sistema genera alarmas que solo pueden visualizarse si se está dentro de la interfase creada. De momento, se toma en cuenta solo el mantenimiento correctivo, en su gran mayoría, y se plantea el preventivo; aún no se realiza mantenimiento predictivo.
Dato suministrado	El porcentaje de manteniemiento efectuado es del 80 % correctivo y 20 % preventivo, aproximadamente. No se efectúan mantenimientos predictivos.
Referencia	Departamento de Mantenimiento, ElectroPlast.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.2 Objetivos del proyecto

2.2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo de condición de modos de falla del equipo encargado del enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos de la compañía ElectroPlast.

2.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para un monitoreo basado en la condición de acuerdo con la norma ISO 17359:2018 para la determinación de los aspectos críticos y sus modos de falla en el equipo encargado del enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos instalado en la compañía.

  Indicador de logro: AMFEC del equipo de refrigeración de agua.

- Plantear un sistema de adquisición de datos óptimo para el monitoreo de las variables de los modos de falla del equipo de enfriamiento por medio de sensores y herramientas de comunicación inalámbricas para la transmisión de datos.

  Indicador de logro: Determinación de sensores y medios de comunicación de datos para el sistema.

- Determinar mediante un análisis financiero el costo y la viabilidad de la implementación del sistema de monitoreo de condición utilizando los indicadores financieros VAN y TIR.

  Indicador de logro: VAN y TIR

Nota aclaratoria: Se planteó el objetivo de "Diseñar un programa por medio de una herramienta computacional que se ajuste a las condiciones necesarias para el procesamiento y análisis de datos para la aplicación del sistema de monitoreo experto. Indicador de logro: Programa del sistema experto." Sin embargo, por motivos de tiempo y desarrollo del proyecto, no se logra alcanzar y queda como una futura oportunidad de mejora, pues lo alcanzado en este trabajo son las bases fuertes e indispensables para dar inicio al modelo del sistema experto.

2.3 Justificación

Según el estudio "Balance de las Zonas Francas: Beneficio Neto del régimen para Costa Rica 2014-2018", se tiene que para el 2018 el número de empresas activas en las zonas francas fue de 375, donde el 13 % corresponde a empresas de precisión y médica, obteniendo el tercer lugar con un 15 % del beneficio país neto (BPN). Además, por el tema de interés, se tiene que dentro de estas está la industria del plástico y sus manufacturas, que representan un 5 % del total de las empresas. También, de acuerdo con el estudio anterior, se determinó que, dentro del sector productivo de industrias de precisión y médica, se empleó de manera directa a trabajadores de las zonas francas en alrededor de un 19 % y de manera indirecta a un 30 %; la industria del plástico y sus manufacturas empleó un 2 % de manera directa y un 3 % de manera indirecta a trabajadores en las zonas francas (Medaglia y Mora, 2019). ElectroPlast, al ser una compañía dedicada a la

creación de implementos médicos, farmacéuticos y electrónicos por medio de moldeo por inyección de plásticos y estar ubicada dentro de un régimen de zona franca (RZF), se encuentra dentro de la categoría que representa un alto valor de beneficio país neto; lo anterior realza la importancia de cumplir con estándares como lo hace actualmente, al apegarse a las normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 13485.

Según Alcantara (2019), en su informe sobre la conferencia TECMA 2019, en el espacio del presidente de Copiman, Gerardo Trujillo, el conferencista destacó la idea de "huir" del mantenimiento preventivo e ir hacia una visión de industria 4.0, donde idealmente se debería tener en una empresa la tendencia de un 55 % de las tareas basadas en mantenimiento de la condición, un 25 % basadas en mantenimiento preventivo y solo un 20 % en mantenimiento correctivo, para con esto migrar poco a poco hacia la tendencia mundial de una industria inteligente.

Un ejemplo de la optimización por medio de un modelo basado en el monitoreo de la condición para la minimización del costo total de una planta de agua helada, en donde se analizaron cuatro enfriadores con cuatro torres de enfriamiento y dos tanques de agua enfriada, fue el estudio realizado por Wei, Xu & Kusiak (2014), el cual justifica de manera práctica que se logra reducir costos de operación con un monitoreo correcto.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la norma ISO 55000:2014, donde se proyecta la nueva visión de Gestión de Activos de una organización, la cual plantea la función de mantenimiento para optimizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos y así aportar un valor agregado a las industrias.

Según Hernández (2021), CEO de EVTECH Soluciones Integrales, empresa especialista en la aplicación de CBM en las industrias por medio de normas como la ISO 17359, menciona que este tipo de mantenimiento implica el uso de sensores para medir el comportamiento y estado del activo, y con esto utilizar los datos recopilados a largo plazo, con el fin de establecer tendencias, predecir fallas y calcular la vida util remanente de los equipos. Además, menciona que con la aplicación del CBM se reduce la necesidad de inspeciones manuales, lo que permite ahorrar tiempo, dinero y recursos, a pesar de que la inversion inicial de la implementación puede ser alto,

puesto que se toma en cuenta que el periodo de retorno de inversión es satisfactorio a corto plazo con base en la experiencia en aplicaciones hechas para proyectos implementados.

2.4 Metodología

Tabla 2.

Metodología usada para la ejecución del proyecto

Objetivo específico planteado	**Actividad por realizar**	**Fuente de información**	**Análisis de datos con criterios estadísticos**	**Resultados esperados (Entregables)**
Realizar un análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para un monitoreo basado en la condición de acuerdo con la norma ISO 17359:2018 para la determinación de los aspectos críticos y sus modos de falla en el equipo encargado del enfriamiento de los moldes por inyección de plásticos instalado en la compañía.	Identificación de los equipos que conforman el sistema de refrigeración. Recopilación de información del funcionamiento. Recopilar variables importantes de diseño y función.	Manuales técnicos de los equipos. Manual de usuario. Consulta al Departamento de Mantenimiento sobre operación. Asesor de ventas o fabricante. Aplicaciones como Danfoss Troubleshooting. Norma ISO 17359:2018. Norma IEC 60812:2018.	Uso de herramientas como tablas de funcionalidad de los elementos, modos de falla y criticidad.	Tabulación de datos y gráficos respectivos. AMFEC del equipo analizado. Matriz de criticidad.
Plantear un sistema de adquisición de datos óptimo para el monitoreo de las variables del equipo de enfriamiento por medio de sensores y herramientas de comunicación inalámbricas para la transmisión de datos.	Identificar sensores a implementar. Seleccionar los sensores y equipo para la toma y transmisión de datos vía wifi. Armar el prototipo del dispositivo. Implementar una simulación por medio de un *software* como demostración de la captación y procesamiento de datos.	Fuentes bibliográficas. Fichas técnicas de los instrumentos. Proveedores respectivos.	Uso de datos de placa de los equipos y, si fuera posible, uso de los datos históricos de los equipos según el funcionamiento, para la comparación de los datos catados con los debidos y así determinar el índice de salud del equipo.	Determinación de sensores y medios de comunicación de datos para el sistema. Parámetros dados por los sensores a través de la base de datos para análisis de un correcto funcionamiento.
Determinar mediante un análisis financiero el costo y viabilidad de la implementación del	Determinar los costos del sistema a implementar. Por medio del uso de herramientas como	Proveedor respectivo. Fuentes bibliográficas.	Análisis a partir de los resultados numéricos obtenidos.	Análisis de la obtención del VAN y TIR.

sistema de monitoreo de condición utilizando los indicadores financieros VAN y TIR.	Excel, realizar los análisis financieros respectivos.	Departamento Financiero.		

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.5 Alcance

En este proyecto, el alcance se desarrolla tal como lo exponen Hernández, Fernández y Baptista (2014). Para una investigación cuantitativa a partir de la revisión de múltiples lecturas y estudios realizados, se tendrán dos enfoques: el primero de carácter explorativo y el segundo de carácter descriptivo. Explorativo puesto que parte de investigar un problema que trae como solución una industria del monitoreo de variables, poco implementada hoy día en muchas empresas industriales y, por tanto, poco estudiada; el fin es incrementar y actualizar las mejoras en el área de mantenimiento del equipo de enfriamiento de los moldes de la empresa y con esto abrir un espacio para implementar a futuro sistemas de monitoreo experto en otras áreas de la organización. Por otro lado, el alcance de carácter descriptivo surge debido a que se busca especificar las características y propiedades de los equipos para medir y recolectar información de manera individual o grupal, además de parámetros de interés para describir la tendencia de operación que puede tener el equipo de enfriamiento de agua de la empresa.

2.6 Limitaciones

La industria 4.0 y lo que esta conlleva hace que sea un área casi sin explorar a nivel país e inclusive en la carrera de Ingeniería en Manteniendo Industrial, puesto que no se abarcan de forma extensiva los conceptos básicos aplicados a lo que requiere. Una limitación se ejemplifica en el hecho de que muchos temas, como los sistemas de monitoreo de condición que llevan a un camino hacia sistemas inteligentes o implementación de algoritmos computacionales que faciliten el manejo del tema, no son de conocimiento general para los estudiantes, por lo que se requiere dedicación y preparación externa para lograr desarrollar un sistema de monitoreo adecuado, ya que según Automática e Instrumentación (2019), dentro de la norma UNE, uno de los requisitos para ser una industria 4.0

se basa en utilizar tecnologías y técnicas para la transformación digital, lo que requiere recursos técnicos para lograr implementar sistemas necesarios para esta nueva revolución industrial.

En el área de recursos financieros, el uso de *softwares* puede generar una limitación, puesto que se pretende desarrollar el proyecto con la implementación de estos para reducir los costos iniciales y el acceso no siempre es libre si no se cuenta con una licencia para su utilización; estas suelen tener un alto valor, por lo que puede ser una limitante de importancia, dado que el *software* de acceso libre normalmente está reducido en capacidades para desarrollar programas y no es tan intuitivo como los que ofrecen la venta de una licencia (León y Muñiz, 2020).

Según Palomares (2021), en el área de Recursos Humanos, uno de los retos es el hecho de que la gestión del talento que se debe afrontar es tener conocimiento sobre *Big Data* y analítica de datos; al respecto, se tiene mucha información disponible con sensores captando datos empleados en diversas áreas, por lo que se requiere de competencias para interpretar los datos obtenidos, además de conocimiento sobre el internet de las cosas (IOT) y *Machine Learning*, con el fin de poder implementar un sistema que ayude a tener tecnologías conectadas que se basan en el comportamiento usual de los datos para obtener su propio procesamiento de toma de decisiones y optimización de los resultados.

Una variable de suma importancia es la situación mundial actual, pues la pandemia genera distanciamiento y limitación al desplazarse de manera segura. Esto puede comprometer la salud de las personas, lo que afecta la cantidad de visitas que se pueden hacer; por ello, la interacción con los equipos analizados o reuniones presenciales programadas para el tema específico a tratar deben suspenderse y optar por la virtualidad en muchos casos.

3. Capítulo III. Marco teórico

3.1 Marco teórico

3.1.1 Mantenimiento industrial

Según Pérez (2021), hay muchas maneras de definir el concepto de mantenimiento. Una de ellas indica que este corresponden a una serie de acciones que se deben realizar por parte de personas encargadas de un departamento con finalidad de asegurarse que equipos, componentes, máquinarias e instalaciones de un proceso industrial se encuentren en las condiciones adecuadas de funcionamiento de diseño y operación. Además, indica que existen varios tipos de mantenimiento; los más comunes y utlizados a nivel mundial son el correctivo, el preventivo y el predictivo. A continuación, se ofrece la descripción que Pérez (2021) hace de ellos.

3.1.2 Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento se aplica cuando un equipo o maquinaria deja de operar dado que se presentó una avería o falla. El objetivo principal de este es poner en marcha el funcionamiento del equipo que presentó el fallo o avería, tratando de afectar lo menos posible la productividad, pues se trata de hacerlo lo más rápido posible.

Se puede clasificar en dos tipos: el no programado, donde la avería se presenta de inmediato y se tiene que hacer la reparación; y el programado, en el cual se realiza el mantenimiento al equipo cuando se detecta que una falla está pronta a ocurrir, pero no está dentro de un plan específico.

3.1.3 Mantenimiento preventivo

Este conlleva una serie de labores o actividades en un periodo de tiempo definido; está diseñado para garantizar que los activos de las empresas trabajen bajo la mayor eficiencia posible con miras a prevenir y adelantarse a corregir posibles fallas en un tiempo planificado y establecido. Este se basa en aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

Para implementar un buen mantenimiento preventivo se puede tomar en cuenta lo que sugiere Pérez (2021), como se muestra en la figura 2, cuando divide este tipo de manteniemiento en dos clases: sistema de inspecciones, que se basa en inspecciones periódicas, cíclicas o programas; y servicio de trabajo de manteniemiento, que se basa de forma prevista y detectetada por las inspecciones realizas; ambos buscan detectar, prevenir o corregir las condiciones o estados inadecuados de los equipos. Cabe destacar que este tipo de manteniemiento se basa también en las indicaciones de los manuales según el fabricante de los activos.

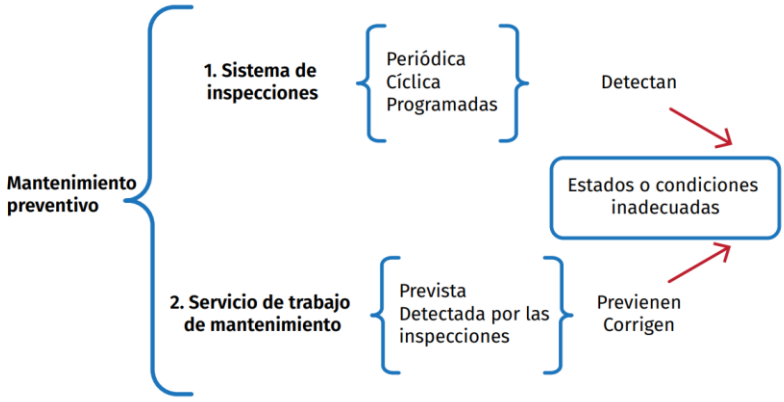


Figura 2. Pasos para la implementación del mantenimiento preventivo
Fuente: Pérez (2021).

3.1.4 Mantenimiento predictivo

Esta técnica se basa en el análisis de datos recolectados en donde se consigue o se procure identificar anomalías por medio de tendencias o patrones de funcionamiento asociados al desgaste del equipo en un periodo de tiempo. Se toma en cuenta medición, seguimiento, monitoreo de parámetros y circunstancias de operación.

Según Díaz (2004), la mayoría de los fallos de las máquinas aparece de forma incipiente, al grado de que es posible detectar una falla antes de que esta se convierta en un hecho de falla con repercusiones irreversibles tanto en la producción como en los costes de mantenimiento. Por esto,

el monitoreo de los parámetros puede avisar del comienzo de un deterioro. En la figura 3 se presenta una gráfica de una curva P-F que demuestra cómo un fallo comienza y continúa hasta llegar a un fallo funcional.

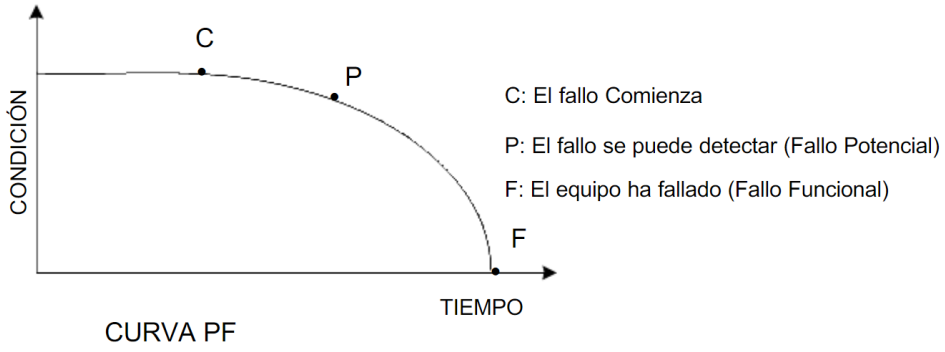


Figura 3. Curva P-F del comportamiento de una falla funcional
Fuente: Díaz (2004).

3.1.5 Implementación de la norma ISO 17359:2018

Esta norma dicta los pasos primordiales que se deben seguir para emplear un programa de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas o activos, para alinearlo con los objetivos de interés de la gerencia y de la organización de una empresa.

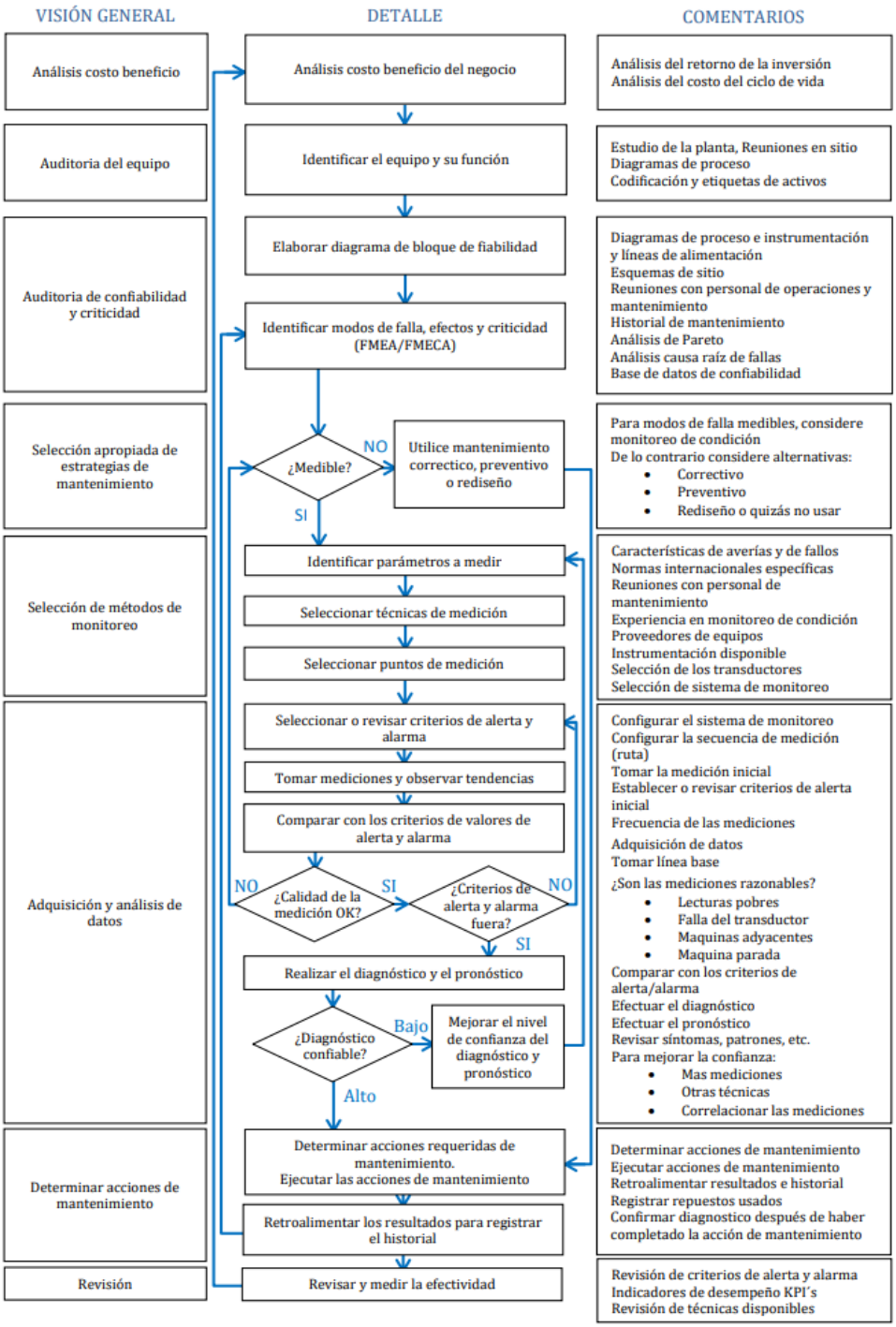


Figura 4. Diagrama de flujo de monitoreo de condición
Fuente: ISO 17359:2018.

Una manera de visualizar a modo de resumen los pasos de la norma se encuentra en la figura 4, donde se especifican por medio de un diagrama de flujo visiones generales de los procedimientos, como análisis de costo beneficio, auditorías de los equipos, confiabilidad y criticidad; además, se deben seleccionar de manera apropiada las estrategias de mantenimiento y métodos de monitoreo para después realizar una adquisición y análisis de datos, con el fin de determinar acciones de mantenimiento. En cada una de las etapas descritas anteriormente se muestra el detalle de cómo debe realizarse y comentarios para ampliar los detalles.

3.1.6 Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC)

Según la Asociación Española de Calidad (2019), este análisis es una metodología cuantitativa o cualitativa que consiste en analizar los modos de falla y sus efectos, considerando su probabilidad de ocurrencia y la gravedad de estos.

Este se emplea en búsqueda de escenarios que puedan representar un impacto negativo en un proceso de producción dentro de una industria, identificando diferentes aspectos que puedan provocar mayor riesgo y con esto emitir acciones para minimizarlos (Tapia, 2011).

Según la norma IEC 60812:2018, el AMFEC es un método sistemático de evaluación de un elemento o proceso usado para identificar las formas en que podría fallar potencialmente, y los efectos del modo de falla sobre el rendimiento del elemento o proceso del entorno y personal que lo rodea. Tiene como propósito tomar decisiones de mantenimiento que puedan evitar o reducir la probabilidad de las fallas y sus efectos.

Para planear el AMFEC, la norma IEC 60812:2018 indica que se debe identificar el equipo que se quiere medir y dividirlo en elementos que lo componen; se debe seguir una serie de pasos, entre ellos definir los objetivos y alcance del análisis, así como identificar los límites y posibles escenarios; además, se deben establecer decisiones y criterios para el tratamiento de modos de falla, como los recursos para el análisis. Una vez definidos los pasos anteriores para cada elemento que compone el equipo, se identifican sus funciones y estándares de desempeño, sus modos de falla, métodos de detección y controles existentes; también es necesario determinar los efectos

locales y finales de los modos de falla e identificar sus causas; así, una vez contemplado lo anterior, se procede a hacer el análisis de criticidad para determinar la severidad del efecto final de la falla, estimar la probabilidad del modo de falla y, si es posible, identificar otros parámetros de criticidad. En la figura 5 se muestra un resumen de cómo la norma indica en un diagrama de flujo los pasos para la implementación del AMFEC, el cual se identifica como FMECA por su versión en inglés.

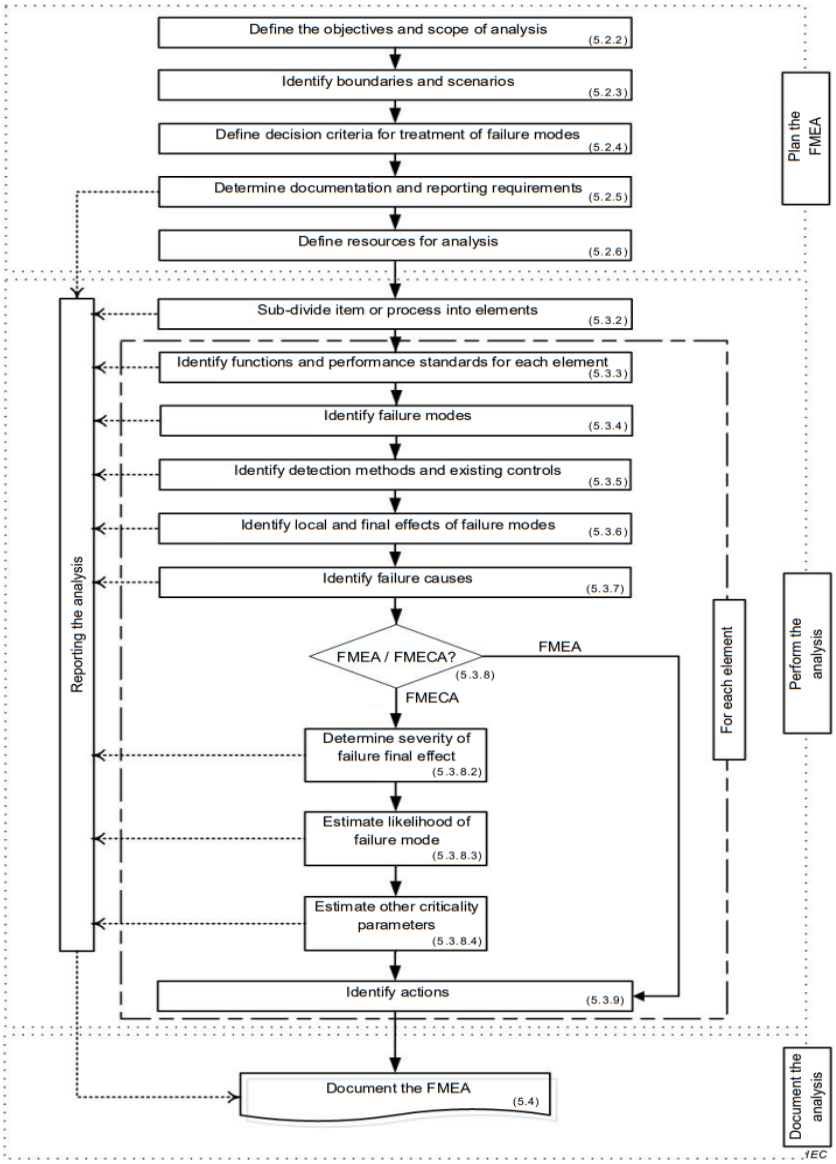


Figura 5. Diagrama de flujo para realización de un AMFEC
Fuente: UNE-EN IEC 60812:2018.

La norma UNE-EN IEC 60812:2018 muestra diferentes maneras de hacer el análisis de criticidad; la de mayor interés es la matriz de criticidad de forma cualitativa, donde se combina la probabilidad de la falla tomando como parámetros asignar en: Alta, Media, Baja, muy Baja y Remota, seguido por la severidad, para lo cual se dispone de las categorías: Catastrófica, Mayor, Marginal y Menor. Dentro de la matriz, las categorías se identifican por colores: Rojo para la Categoría X, que corresponde a: Inaceptable; Naranja para la Categoría 1, que corresponde a: Indeseable; Amarillo para la Categoría 2, que corresponde a: Aceptable; y, por último, Verde para la Categoría 3, que corresponde a: Menor, tal como se muestra en la figura 6.

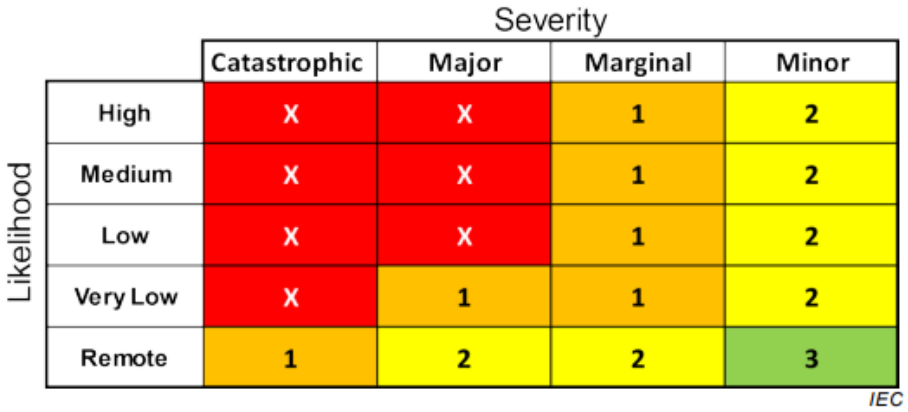


Figura 6. Ejemplo de Matriz de Criticidad cualitativa
Fuente: UNE-EN IEC 60812:2018.

Según Otero, Torres y Magaña (2010), los conceptos básicos de un AMFEC se definen como:

- **Definición de la intención del diseño**: consiste en conocer y entender la operación del equipo con el fin de poder identificar las condiciones bajo las cuales opera, así sea por su diseño como por las necesidades del usuario.
- **Análisis funcional**: es donde el equipo desempeña la función de operación según sus características de diseño y con base en lo que el usuario quiere o desea que su activo opere.
- **Modos de falla**: forma en la que el activo pierde su capacidad de desempeñar su función potencialmente.

- **Efectos y consecuencias del fallo**: los efectos son considerados como la forma en que la falla se muestra, de cómo se ve perjudicado el equipo, ya sea de manera local o final en el proceso, y las consecuencias son los impactos derivados de la falla en los receptores de áreas de interés.

3.1.7 Vida útil remanente (*Remaining Useful Life, RUL*)

De acuerdo con Siguenza (2017), el periodo de tiempo medido desde un pronóstico hecho hasta el tiempo pronosticado de la ocurrencia de una falla funcional en un equipo es lo que se denomina como vida útil remanente, y se toma como dato clave para la determinación de la toma de acciones para prevenir la ocurrencia de una falla que puede traer repecusiones negativas a una empresa o negocio. Por esto, se utiliza como herramienta para el pronóstico de equipos y así generar patrones para tomar decisiones de mantenimiento con mayor criterio.

El periodo de vida útil remanente es utilizado por el mantenimiento basado en el pronóstico de fallas y gestión de la salud o PHM (por sus siglas en inglés), para la toma de deciones en cuanto al mantenimiento respectivo de un equipo. Para el cálculo de la vida útil remanente (o RUL por sus siglas en inglés) es indispensable tener un sistema de monitoreo del equipo del cual se desea determinar las características particulares, con el fin de fijar un patrón de comportamiento con la adquisión de datos necesarios filtrados por herramientas computacionales que facilitan el procesamiento de los datos. En la figura 7 se muestra un ejemplo de cómo se estima el RUL con base en el índice de salud de un equipo monitoreado y cuándo se debe intervenir para lograr prevenir una falla.

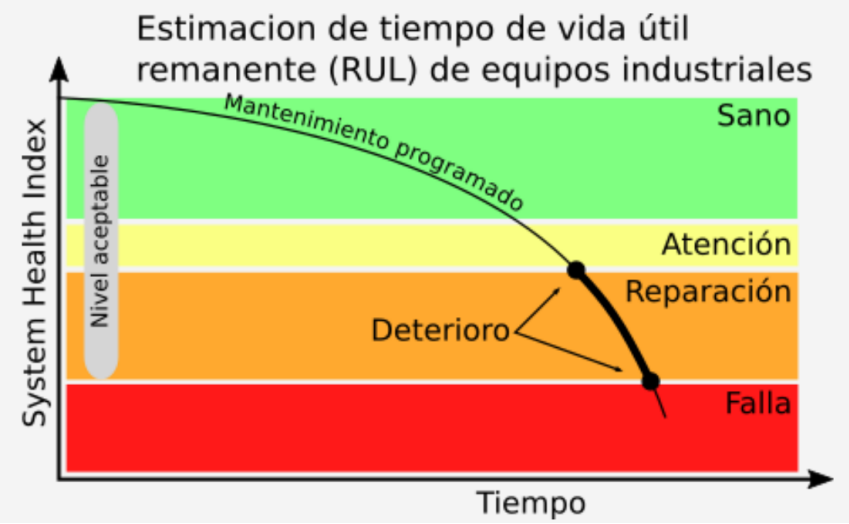


Figura 7. Ejemplo de la estimación de la vida útil remanente de equipos industriales
Fuente: MOCTECH (2018).

3.1.8 Sistema de inyección de plásticos

Este es un proceso de los más usados por las industrias donde la producción en masa de piezas a base de polímeros hace que se aumente la eficiencia en la producción en diversas áreas, como la automotriz, implementos médicos, procesos electrónicos, entre otros, debido a que los polímeros son versátiles, resistentes, ligeros y, a su vez, económicos (Jurado, Reveles, Plascencia y Aguilera, 2020).

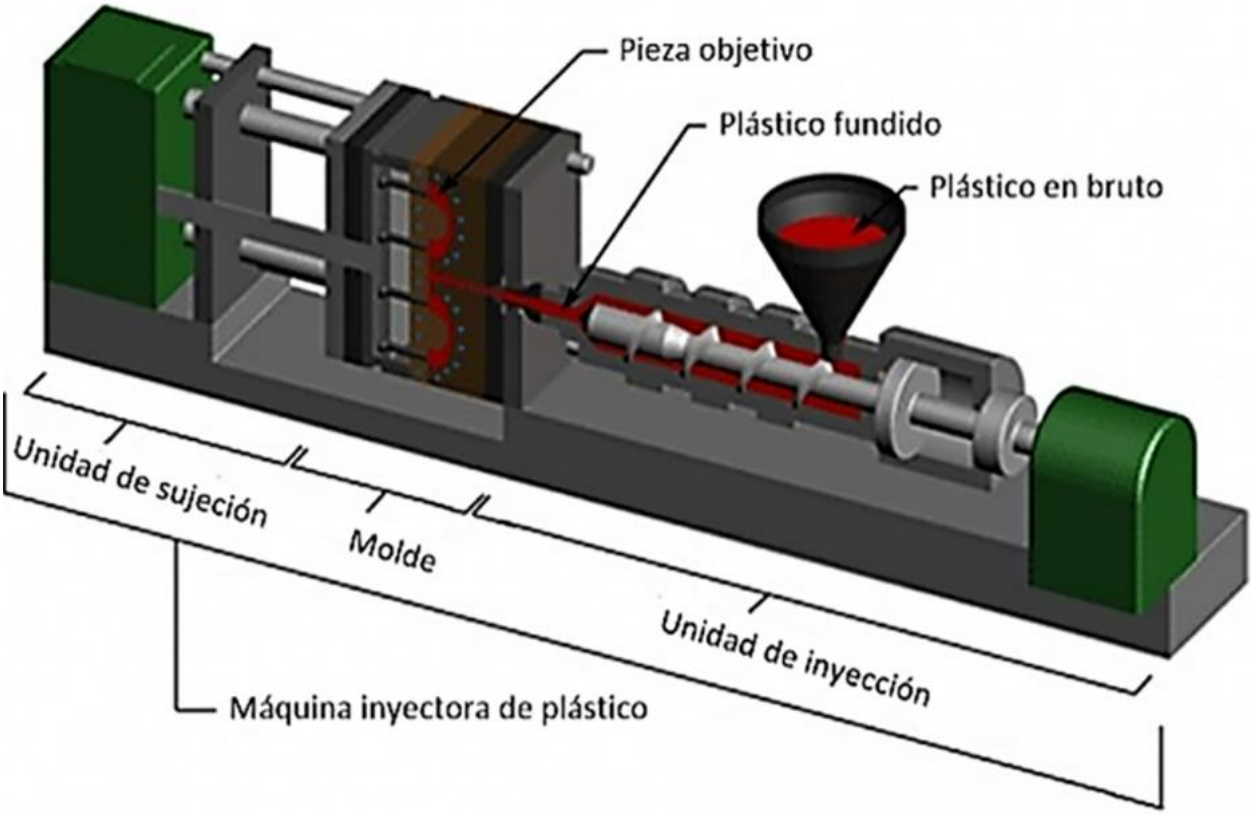


Figura 8. Unidades de una máquina de inyección
Fuente: Jurado, Reveles, Plascencia y Aguilera (2020).

Las partes principales de una máquina inyectora se basan en las unidades de acción, las cuales constan de cuatro etapas principales: sujeción, inyección, enfriamiento y eyección, como se muestra en la figura 8. La unidad de sujeción es la que posee el molde con la forma de la pieza deseada, la cual se cierra a la espera de la etapa de inyección del plástico; en la tolva se encuentra el plástico bruto que entra al cañón que posee las termocuplas calentando y fundiendo el plástico para mover el husillo por medio de la unidad de inyección; con esto desplaza el material fundido a lo largo del cañón y lo inyecta en las cavidades del molde. Una vez llenas todas las cavidades, se entra en la etapa de enfriamiento, donde el plástico fundido se solidifica por medio de la transferencia de agua helada a través de los ductos internos del molde; de esta forma, se extrae el calor, lo que enfría las piezas y las solidifica. Finalmente, se llega a la última etapa, la cual consiste

en eyectar las piezas del molde; el proceso anterior se repite cíclicamente y, de esta manera, se logra la producción en masa (Jurado, Reveles, Plascencia y Aguilera, 2020).

De acuerdo con Meltrán y Marcilla (2011), la figuara 9 explica las múltiples estapas de un ciclo de inyección; en ella se muestra la diferencia de tiempos en cada etapa realizada por una máquina de inyección convencional. En cada tiempo sucede una actividad específica completamente automatizada por el mismo sistema de control de la máquina inyectora.

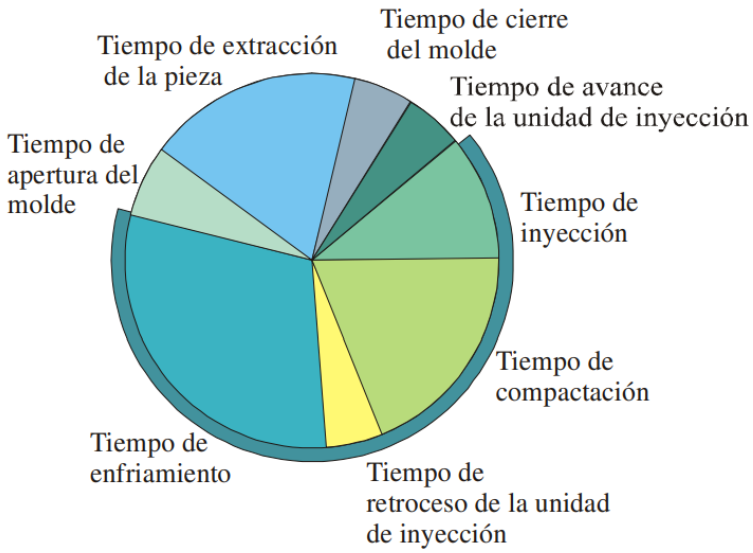


Figura 9 .Duración aproximada de las diferentes etapas del ciclo de inyección en una máquina inyectora convencional
Fuente: Meltrán y Marcilla (2011).

3.1.9 Sistemas de enfriamiento de agua para procesos industriales

Chiller

Para enfriar los moldes de las máquinas inyectoras se necesita un flujo de agua a una temperatura más baja que la temperatura ambiente, donde intervienen también variables como el flujo de agua y el tipo de polímetro a enfriar. El agua se enfría por medio de un equipo de acondicionamiento de

líquidos conocido como Chiller. Según Oberndorfer (2016), existen dos tipos de Chiller, como se describe a continuación:

- Enfriado por aire: estos poseen una unidad condensadora enfriada por aire y son usualmente seleccionados para aplicaciones donde se trabaja con un sistema centralizado de suministro de agua fría. Deben ubicarse en zonas con buena ventilación, dado que la falta de ventilación, así como la limpieza de los intercambiadores de calor reducen su eficiencia.

- Enfriados por agua: el calor del evaporador es extraído por medio de agua; son más eficientes por remover el calor en el condensador por medio de agua con agua. En ellos se puede cambiar la temperatura del agua suministrada sin tener que cambiar el flujo del agua, lo cual hace que se hayan sofisticado más con el pasar del tiempo.

El Chiller trabaja con los principios básicos de funcionamiento; cuenta con los elementos indispensables de un sistema de refrigeración, que consisten en el compresor, el evaporador, el condensador y la válvula de expansión, como se muestra en la figura 10.

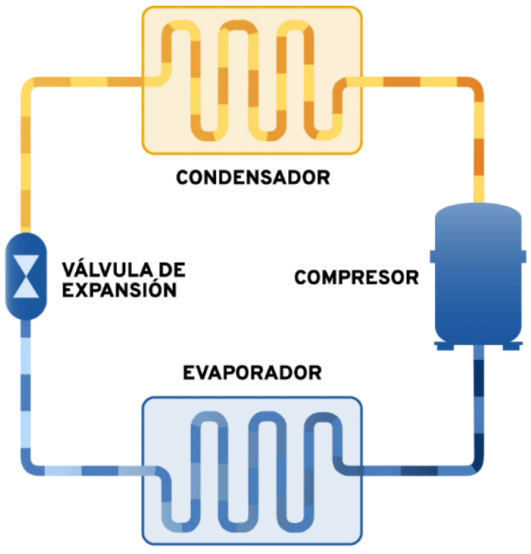
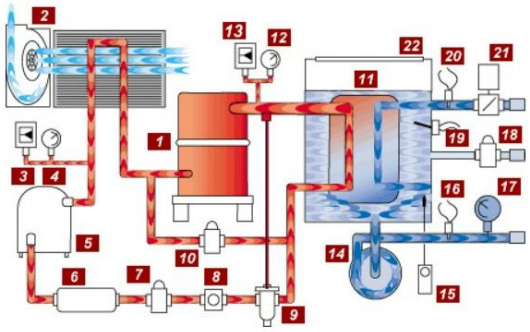


Figura 10. Esquema de un sistema básico de refrigeración
Fuente: Froztec (2022).

El ciclo de operación del sistema de refrigeración se basa en cuatro etapas. Para iniciar, el refrigerante en estado de vapor entra al compresor, el cual comprime el refrigerante en estado gaseoso a baja presión y baja temperatura a uno en alta presión y alta temperatura; así se entra a la segunda etapa, que va hacia el condensador, en el cual se convierte en vapor al recorrer los serpentines del condensador. En la tercera etapa, el refrigerante pasa a estado líquido a alta presión a través de la válvula de expansión; esta le disminuye la presión y lo transforma en estado líquido para concluir con la cuarta etapa, donde el refrigerante entra al evaporador y continua a baja presión, pero se convierte en estado gaseoso. Así vuelve a la etapa 1 y completa el ciclo de refrigeración (Froztec, 2022).

Una representación más detallada de las partes o elementos que implica un sistema de enfriamiento de agua se muestra en la figura 11. En ella se observan los elementos con los cuales realmente trabaja un Chiller para abarcar las funciones industriales de alta demanda para las cuales han sido diseñados.



1. Compresor
2.Condensador
3. Límite de alta presión
4. Manómetro de presión alta
5. Receptor de líquido
6. Filtro Secador
7. Solenoide de línea de líquido
8. Vista de refrigerante
9. Válvula de expansión
10. Válvula de derivación de gas caliente
11. Evaporador
12. Indicador en baja presión
13. Límite de presión baja
14. Bomba de refrigerante
15. Límite de Freezestat
16. Sonda del sensor
17. Manómetro de refrigerante
18. Solenoide,
19. Interruptor flotador nivel depósito
20. La Sonda del sensor de proceso
21. Interruptor de flujo del evaporador
22. Depósito.

Figura 11. Detalle de los elementos que forman el sistema de un Chiller
Fuente: Airson Ingenieros (2022).

3.1.10 Sistema de monitoreo

Un sistema de monitoreo o sistema de adquisición de datos, según Di Polo (2013), se basa en la toma de variables de interés de un equipo o máquina por medio de dispositivos que logren captar las señales. Además, este sistema tiene como elementos básicos para la toma de datos los siguientes componentes:

- Sensores y transductores
- Acondicionador de señal
- *Hardware* del sistema de adquisición
- *Software* del sistema de adquisición
- Computador con sistema operativo

3.1.10.1 Sensores y transductores

Estos se utilizan dado que logran convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica que luego se convertirá en digital. Los sensores producen una señal de tensión o de corriente respecto a los fenómenos físicos que están midiendo, de los cuales existen dos tipos: los activos, que requieren de una fuente de alimentación externa para funcionar; y los pasivos, que no requieren de una fuente de alimentación externa (Di Polo, 2013).

Los transductores tienen la capacidad de convertir una variable física en otra que tiene un dominio diferente; lo que hace es básicamente cambiar el dominio de la variable (Corona, Abarca y Mares, 2014).

3.1.10.2 Acondicionador de señal

Según Corona, Abarca y Mares (2014), estos son los que se encargan de adecuar la señal en un dato útil para un sistema de medición. Los tipos comunes de acondicionamiento de la señal son:

Amplificación

Este se encarga de aumentar el nivel de tensión que entrega la salida del transductor, con el fin de mejorar la adaptación al rango que tiene el convertidor lógico digital. Se deben colocar cerca de la fuente de la señal antes de que se vea afectada por el ruido externo.

Lineación

Convierte una señal cuyo comportamiento es no lineal en una lineal o linealizada.

Filtrado

Es el proceso en el cual se desprecian componentes no deseados de una señal. Tiene diferentes configuraciones de filtrado de acuerdo con los componentes que se desean en una señal, por lo cual puede eliminar o conservar esos componentes.

Conversión

Es aquel proceso en el cual la señal continua o analógica se requiere de forma discreta o digital para un posterior procesamiento de un dispositivo, como un microprocesador. Esto se expresa cuando se convierte una señal sinusoidal en una cuadrada, por ejemplo.

Aislamiento eléctrico

Es cuando se interrumpe la señal en la entrada y la salida, sin un cable físico. Esto genera que la entrada de datos no deseada lleguen hasta la salida mediante una señal óptica o magnética.

Excitación

Muchas veces se requiere en sensores que consumen alguna forma de excitación para su correcto funcionamiento; se trata de sensores con principio de transducción de reluctancia variable que requieren una señal en corriente alterna.

3.1.10.3 *Hardware* del sistema de adquisición

Según Di Polo (2013), el *hardware* del sistema de adquisición de datos ejecuta las funciones de entrada para el procesamiento y conversión a formato digital por medio de ADC; seguidamente, los datos son transferidos a la computadora para su visualización, analisis y procesamiento.

3.1.10.4 *Software* del sistema de adquisición

Un *software* de adquisición de datos es el componente principal que necesita el *hardware* para interactuar con un computador con sistema operativo, donde se pueden desarrollar múltiples programas con distintos lenguajes de programación, lo que hace que sea muy amplio en su aplicación (Di Polo, 2013).

3.1.11 LabView

Este es un *software* creado por National Instruments, el cual es una herramienta en torno a la programación gráfica, usada en áreas como la ingeniería para realizar pruebas de carácter automático, investigativo, de validación y de producción (National Instruments, 2022).

Este *software* además es utilizado para realizar pruebas y medidas donde se encuentran miles de funciones de análisis disponibles, elementos de fácil interacción y configuración, y controladores para la automatización de cada uno de los instrumentos. Algo muy importante es la compatibilidad y conectividad con otros lenguajes y protocolos estándares de la industria actual, lo que brinda la posibilidad de crear una interfaz amigable con el usuario sin este ser experto en el uso del *software*.

El programa cuenta con una serie de módulos como Real-Time, usado para la creación e implementación de aplicaciones de sistemas de pruebas en tiempo real, monitoreo y control. Es de carácter fiable y preciso ante un sistema independiente.

Figura 12. Representación de LabView para las pruebas de automatización
Fuente: National Instruments (2022).

4. Capítulo IV. Análisis del sistema de enfriamiento de agua

Para un modelo basado en la condición, tal como se presentó en la sección 3.1.5, se toma como base el enfoque indicado en la norma ISO 17359:2018, específicamente en la sección que señala analizar los equipos por medio de la herramienta AMFEC. Se utiliza la norma IEC 60812:2018 como guía, la cual especifica los pasos adecuados para realizar un AMFEC, como se mostró en la sección 3.1.6, donde muchos de sus elementos se dirigieron a la guía propuesta para la correcta implementación de la herramienta y así considerar todos los aspectos posibles dentro de este.

En ElectroPlast, múltiples sistemas trabajan en conjunto para realizar el proceso de inyección que se lleva a cabo; uno de los procesos de interés fue el sistema encargado del enfriamiento del agua. Por medio de la transferencia de calor, se logra extraer este de los moldes generados por la resina previamente calentada para poder ser inyectada y moldeada con la mayor precisión posible; sin embargo, el molde debe enfriarse antes de la expulsión de las piezas moldeadas para abrir paso al próximo ciclo de inyección y evitar que se sobrecaliente el molde y las piezas vayan a quedar defectuosas.

El estudio se realiza con el objetivo principal de explorar el equipo encargado del proceso de acondicionamiento de agua usada para el enfriamiento de los moldes de inyección y, además, para definir la criticidad del equipo y componentes del sistema, con el fin de que haya un control más riguroso de este proceso, identificar el elemento o equipo que deba tener una mayor atención o monitoreo y reconocer qué tipo de factor debe ser monitoreado en este. Cabe destacar que en dicho análisis se tiene como límite la aplicación para el Chiller de enfriamiento de agua, lo cual deja como futura implementación el estudio de la torre de enfriamiento.

Se definieron los posibles modos de falla que se desarrollan para tomar la decisión y criterios en cuanto al tratamiento que se le tenga que dar a los modos de falla, que en este caso es monitorear en tiempo real las variables más importantes que determine el análisis aplicado. Para lo anterior, según la norma IEC 60812:2018, se deben conocer los recursos disponibles para realizar el análisis, por lo que se consulta a manuales de fabricantes, aplicaciones como la de Danfoss Troubleshooting y consultas al personal que se relacione y conozca más las funciones y parámetros

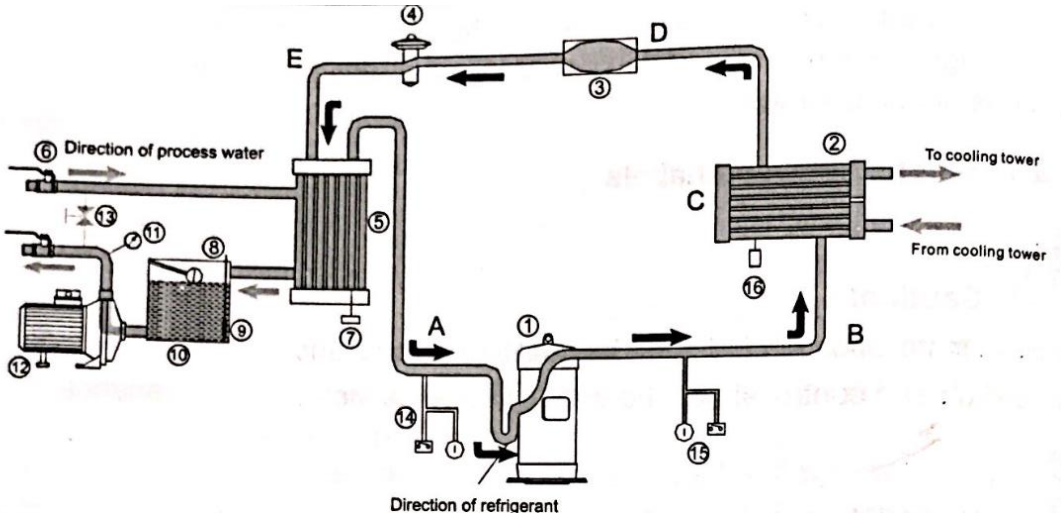
en los que se debe encontrar el equipo en cada inspección para saber si se encuentra trabajando bajo las condiciones esperadas.

4.1 Funciones y estándares de desempeño de cada elemento

En el sistema de enfriamiento implementado en ElectroPlast, se identifica el equipo, sus partes y se subdivide en elementos. A cada elemento del sistema se le identifican funciones y estándares de desempeño para los cuales son sus funciones de diseño. El equipo se muestra en la figura 13.

Figura 13. Chiller industrial marca Xiecheng de doble compresor Modelo XC-L120WS-2-R7
Fuente: Xiecheng (2021).

Para determinar los componentes se usa como referencia la imagen en el manual de usuario del equipo, la cual se muestra en la figura 14, donde se encuentran las partes indicadas por el fabricante que componen el Chiller. En este caso, es notorio que el modelo es distinto; sin embargo, en cuanto a funcionamiento y elementos para el fin del análisis, se trabaja como si fueran el mismo.



N.º	Descripción	N.º	Descripción
1	Compresor	9	Sensor de temperatura
2	Condensador	10	Tanque de agua
3	Filtro secador	11	Medidor de presión de la bomba
4	Válvula de expansión	12	Bomba
5	Evaporador	13	Válvula de derivación
6	Válvula de bola	14	Interruptor de baja presión
7	Interruptor anticongelante	15	Interruptor de alta presión
8	Sensor de nivel	16	Válvula de liberación de presión

Figura 14. Diagrama y descripción de los elementos del Chiller según el manual Xiecheng
Fuente: Xiecheng (2021).

Una vez identificados los elementos importantes del sistema, se toma en cuenta la función de cada elemento y cuál es el estándar de desempeño en caso de poseerlo, con el fin de identificar rangos y condiciones saludables en que los elementos de los equipos deberían estar trabajando, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3.

Funciones y estándares de desempeño de los componentes del equipo

Elemento	Función y estándar de desempeño
1. Compresor	Incrementar la presión del refrigerante para generar el ciclo en el sistema a una presión en alta de 1.5 MPa y una presión en baja de 0.45 MPa, aproximadamente. Con una tensión de 220 V.
2. Condensador	Disipar el calor absorbido por el agente refrigerante en el evaporador y el calor convertido por el compresor al consumir la energía del refrigerante; la temperatura extraída debe estar dentro del rango de 22 °C y los 27.5 °C.
3. Evaporador	Extraer el calor del flujo de agua proveniente de los moldes a refrigerar por medio del refrigerante que absorbe el calor en los serpentines de este. Temperatura de salida del evaporador de 15 °C, aproximadamente.
4. Válvula de expansión	Controlar el caudal de refrigerante en estado líquido que ingresa al evaporador y generar el efecto de aceleración y alivio de presión a aproximadamente 0.8 MPa.
5. Bomba	Mover el agua a refrigerar por todo el sistema a una presión de 50 psi con un caudal de 100 gal/min, aproximadamente.
6. Filtro secador	Filtrar impurezas del agente refrigerante y aceite, como humedad, ácidos y partículas sólidas que fluyen por el circuito del sistema.
7. Válvula de bola	Abre el paso al líquido circulante en el sistema, en este caso el agua.
8. Interruptor anticongelante	Evita el sobreenfriamiento o glaseado de las bobinas de enfriamiento y tuberías de manipulación de líquidos.
9. Sensor de temperatura	Indica cuál es la temperatura de entrada y salida del Chiller a la que se encuentra el agua, la cual debe ser no menor a 10.00 °C y no mayor a 17.50 °C.
10. Medidor de presión de las bombas	Indica las presiones a la entrada igual a 20 psi y de salida igual a 50 psi de la bomba. Contiene escala en bar.
11. Interruptor de presión baja	Se activa y detiene el sistema para proteger al equipo cuando la presión esté más baja de lo establecido en la presión de succión del refrigerante que va hacia el compresor, la cual no debe ser menor a 0.3 MPa.
12. Interruptor de presión alta	Se activa y detiene el sistema para proteger al equipo cuando este supera la presión de salida de refrigerante del compresor, la cual es de 1.7 MPa.
13. Válvula de desahogo	Libera presión del sistema en caso de que el fluido sobrepase un límite establecido.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2 Identificación de los modos de falla

La parte principal del AMFEC es identificar los principales modos de falla que podrían tener los componentes o elementos en operación. Por esto, con base en las fuentes consultadas, se realiza la tabla 4 donde se exponen los principales modos de falla a considerar.

Tabla 4.

Modos de falla de cada elemento del equipo

Elemento	Modo de falla
1. Compresor	1.1. El interruptor de sobrecarga del compresor se acciona cada cierto tiempo de trabajo.
	1.2. El compresor se sobrecalienta cuando está en operación.
	1.3. El compresor no logra arrancar o se detiene después de arrancar.
	1.4. Los ciclos del compresor son demasiado extensos o muy cortos cuando está operando.
	1.5. El compresor funciona constantemente durante un periodo mayor de 1 hora.
	1.6. Se percibe un sonido de golpeteo en el interior del compresor.
2. Condensador	2.1. Se tiene una presión de condensación demasiado alta en el sistema.
	2.2. Se tiene una presión de condensación demasiado baja en el sistema.
	2.3. La presión de condensación no se mantiene estable entre 1.5 y 0.4 MPa.
3. Evaporador	3.1. La temperatura de salida del agua del evaporador está fuera del límite establecido.
	3.2. Se percibe congelamiento en la estructura del evaporador.
	3.3. La capacidad del evaporador es insuficiente en el sistema.
4. Válvula de expansión	4.1. Se percibe congelamiento en la tubería o sobrecalentamiento demasiado alto.
5. Bomba	5.1. La bomba no alcanza la presión establecida de 50 psi a la que debe estar trabajando.
	5.2. Hay un notorio aumento de ruido y temperatura en la bomba.
	5.3. El interruptor de sobrecarga de la bomba se dispara.
	5.4. La bomba se detiene y no enciende.
6. Filtro secador	6.1. El filtro se censa por debajo de los 0 °C, con posible rocío y escarcha en la superficie de este.
	6.2. La salida del refrigerante por la tubería luego de pasar el filtro se siente más fría que la entrada de este, con una diferencia mayor a los 6 °C.

7. Válvula de bola	7.1. La válvula no gira.
8. Interruptor anticongelante	8.1. Se percibe congelamiento o glaseado en la tubería de manipulación de líquidos.
9. Sensor de temperatura	9.1. Los sensores marcan temperaturas muy por encima o muy por debajo de una temperatura razonable, o inclusive no marcan la temperatura.
10. Medidor de presión de las bombas	10.1. No se cuenta con la lectura de la presión a la que está trabajando el sistema.
11. Interruptor de presión baja	11.1. El interruptor no se acciona a la presencia de una presión por encima de lo establecido.
12. Interruptor de presión alta	12.1. El interruptor no se acciona ante la presencia de una presión por debajo de lo establecido.
13. Válvula de desahogo	13.1. La válvula se acciona para liberar presión, pero no sella.
	13.2. La válvula no se acciona en una sobrepresión en el sistema.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.3 Identificación de métodos de detección y controles existentes

Parte de lo que la norma IEC 60812:2018 especifica es que se deben considerar los métodos con que cuenta un sistema o equipo para avisar o dar alarma de que algo no está funcionando de la mejor manera y proteger el equipo según los modos de falla existentes. Por esto, en la tabla 5 se considera cuáles métodos de detección y controles tiene el equipo para este tipo de situación.

Tabla 5.

Métodos de detección y controles existentes para los modos de falla del equipo según el elemento

Modo de falla	Métodos de detección y controles existentes
1.1	Interruptor de sobrecarga.
1.2	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
1.3	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
1.4	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
1.5	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
1.6	Sin método de detección automático. Inspecciones diarias al equipo.
2.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
2.2	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
2.3	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
3.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
3.2	Alarma en el BMS de la empresa por bajo caudal.
3.3	Alarma en el BMS por temperatura irregular en la salida del evaporador.
4.1	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
5.1	En el BMS se indica la pérdida de caudal.
5.2	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
5.3	Alarma en el BMS por bomba detenida.
5.4	Alarma en el BMS por bomba detenida.
6.1	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
6.2	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
7.1	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
8.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.

9.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
10.1	Sin método automático de detección. Solo personal a cargo de las inspecciones diarias del equipo.
11.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
12.1	Alarma audible y visible en pantalla de control del Chiller que indica incorrecto funcionamiento.
13.1	El sistema indica alarma por reducción en el caudal.
13.2	El sistema se alarma por sobrepresión en el sistema.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.4. Efectos locales y finales

En esta sección se determinaron los efectos que pueden provocar daños o perjuicios al equipo y, a su vez, el efecto que trae el hecho de que llegase a fallar el elemento del sistema. Por ello, según cada modo de falla, se muestra cuál sería la reacción negativa tanto en pérdida de elementos, si fuera el caso, como en la producción en cuanto a posibles paros a la que está ligado el proceso en la empresa, tal como se detalla en la tabla 6.

Tabla 6.

Efectos locales y finales asociados a los modos de falla

Modo de falla	Efectos locales y finales
1.1	Efecto local: Interrupción en el trabajo estándar del compresor.
	Efecto final: Paro en la producción por falta de estándar adecuado de trabajo.
1.2	Efecto local: Baja la eficiencia de funcionamiento del compresor.
	Efecto final: Posible paro a corto o mediano plazo en la producción para inspección del compresor.
1.3	Efecto local: Funcionamiento interrumpido del compresor.
	Efecto final: Se dura más tiempo en alcanzar el estándar de enfriamiento del agua, por lo que se puede presentar un paro en la producción hasta alcanzar las condiciones adecuadas.

1.4	Efecto local: En periodos demasiado extensos, la temperatura de enfriamiento será baja, se puede sobrecalentar el compresor. En periodos muy cortos, el enfriamiento del agua puede ser más lento.
	Efecto final: Si la temperatura es más baja que el estándar, se puede seguir con la producción, pero se tiene un mayor consumo de energía eléctrica; si es demasiado alta, se baja la calidad de producción, por lo que se debe detener la producción.
1.5	Efecto local: Sobrecalentamiento del compresor. Posibles daños permanentes.
	Efecto final: Sobreenfriamiento del agua de proceso. Aumento en el consumo de energía.
1.6	Efecto local: Posibles daños en el compresor en un tiempo no establecido.
	Efecto final: Baja la eficiencia de enfriamiento del agua del proceso.
2.1	Efecto local: Reducción en la eficiencia de condensación del agua del proceso.
	Efecto final: Aumento en la temperatura del agua del proceso por incorrecto intercambio de calor.
2.2	Efecto local: Reducción en la eficiencia de condensación del agua del proceso.
	Efecto final: Disminución en la temperatura del agua del proceso por excesivo intercambio de calor.
2.3	Efecto local: Error de diseño.
	Efecto final: Variación en el enfriamiento del agua del proceso.
3.1	Efecto local: Reducción en la eficiencia de extracción de calor del agua de proceso.
	Efecto final: Mayor tiempo en llegar a la temperatura adecuada. Posibles imperfecciones en el producto final.
3.2	Efecto local: Posible daño en la estructura.
	Efecto final: La temperatura del agua es más baja de lo establecido.
3.3	Efecto local: Posible daño a la estructura.
	Efecto final: No se logra alcanzar la temperatura establecida en un tiempo reducido.
4.1	Efecto local: Posible daño en la estructura.
	Efecto final: Desajuste variable en la temperatura requerida, el producto se puede ver afectado.
5.1	Efecto local: Daño en un tiempo reducido o prolongado de la bomba por operación no adecuada.
	Efecto final: No se logra mover el caudal establecido, por lo que no se cumple con la demanda de enfriamiento que requieren los moldes.
5.2	Efecto local: La bomba se sobrecalienta, aumenta el consumo de energía y baja la eficiencia. Daño en los alabes del impulsor.
	Efecto final: No se logra mover el caudal establecido, por lo que no se cumple con la demanda de enfriamiento que requieren los moldes.
5.3	Efecto local: La bomba se sobrecalienta, aumenta el consumo de energía y baja la eficiencia. Daño en los devanados del motor. Daño en el interruptor de sobrecarga.

	Efecto final: Paro en la producción por falta del equipo que mueve el agua del proceso.
5.4	Efecto local: No se puede hacer uso de la bomba para mover el caudal.
	Efecto final: Paro total en la planta por falta de equipo que mueva el caudal requerido.
6.1	Efecto local: Daño en el elemento filtrante.
	Efecto final: Posible daño a largo plazo en el compresor o sistema por agentes contaminantes.
6.2	Efecto local: Elemento filtrante dañado.
	Efecto final: Disminución de la extracción de calor del proceso. Posible paro programado para limpieza o cambio de filtro.
7.1	Efecto local: Daño en el elemento.
	Efecto final: No se logra regular el caudal adecuado por lo que provoca baja eficiencia en el sistema.
8.1	Efecto local: Daño en el interruptor.
	Efecto final: Posible paro programado en la producción para la inspección del elemento.
9.1	Efecto local: No se tiene control de la temperatura real a la que se encuentra el sistema.
	Efecto final: Posibles daños en la calidad del producto por falta de control de temperatura.
10.1	Efecto local: No se tiene control de la presión real a la que se encuentra el sistema.
	Efecto final: Posible reducción o aumento del caudal que pueda afectar la calidad del producto.
11.1	Efecto local: No se da alerta ni se protege al equipo por una presión baja, por lo que puede provocar posibles daños en el equipo por falta de presión.
	Efecto final: Falta de caudal en el sistema. No se cumple con la demanda de caudal requerida.
12.1	Efecto local: No se da alerta ni se protege el equipo por una presión alta, por lo que puede provocar posibles daños en el equipo por falta de presión.
	Efecto final: Falta de caudal en el sistema. No se cumple con la demanda de caudal requerida.
13.1	Efecto local: Fugas de agua en la válvula que puedan dañar otros equipos por falta de caudal suficiente.
	Efecto final: Falta de caudal en el sistema. No se cumple con la demanda de caudal requerida.
13.2	Efecto local: Posibles daños en equipo o estructura, o posibles fugas en otros elementos por presión demasiado alta en el sistema.
	Efecto final: Peligro de fugas explosivas, reventadoras que afecten el caudal y enfriamiento del sistema. Posibles paros en la producción.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.5 Identificación de las causas de falla

En la tabla 7 se muestra cómo a cada modo de falla se le asocia una o más posibles causas que lo generan; estas se ligan de manera directa o indirecta con cada elemento, por lo que es de vital importancia identificarlas para dar con un análisis riguroso que permita identificar cómo se puede desencadenar o generar el fallo de un elemento del equipo.

Tabla 7.

Causas de los modos de falla en los componentes del equipo

Modos de falla	Causas de la falla
1.1	Sobrecorriente.
	Falla del compresor.
	Fallo del controlador de sobrecarga del compresor.
1.2	El grado de calor del refrigerante en el tubo de retorno de aire es demasiado alto.
	La presión alta está demasiado elevada.
	La presión baja está demasiado baja.
1.3	El cable de la alimentación está roto o la tensión está fuera de lo normal.
	La temperatura de los instrumentos de control no está configurada correctamente.
	El protector de sobrecarga no ha sido reiniciado.
	El flujo ultrabajo de agua refrigerada provoca una temperatura ultrabaja del agua.
	El control de temperatura está configurado demasiado bajo o tiene algunas fallas.
	El interruptor de protección contra congelamiento no está configurado correctamente o tiene algunas fallas.
1.4	Presión de condensación demasiado alta.
	Control de presión alta defectuoso.
	Ajuste de corte de control de alta presión demasiado bajo.
	Capacidad de compresor demasiado alta en relación con la carga en un momento dado.
	Presión de apertura del regulador de presión de evaporación ajustada demasiado alta.
1.5	Fuga de la aspiración del compresor o las válvulas de descarga.
	El termostato no funciona de la manera adecuada.
	Capacidad de compresor demasiado baja en relación con la carga en un momento dado.
	Incorrecto funcionamiento del termostato.
1.6	Golpe de ariete en el cilindro debido a flujo de líquido al compresor.

	Aceite hirviendo debido a la acumulación de líquido en el Carter.
2.1	Temperatura del agua de refrigeración demasiado alta.
	Cantidad de agua muy pequeña.
	Depósitos dentro de la tubería de agua.
	Bombas de agua defectuosas o no conectadas.
	Mal ajuste de la válvula de agua por lo que la cantidad de agua es reducida.
	Filtro delante de la válvula de agua bloqueado.
	Tubo capilar entre la válvula de agua y el condensador bloqueado o defectuoso.
	Fuga en el muelle de la válvula de agua.
	Válvula de agua se cierra debido a un defecto del diafragma superior.
2.2	Caudal de agua demasiado bajo.
	Temperatura del agua de refrigeración demasiado baja.
	Válvula de agua se cierra debido a un defecto del diafragma inferior.
	La válvula de agua no puede cerrarse debido a suciedad en el asiento.
2.3	Válvula de agua demasiado grande.
3.1	Evaporador sucio, lo que no permite el intercambio de calor.
	Baja carga de refrigerante en el ciclo de refrigeración.
	Falla de los sensores de temperatura del agua.
3.2	Bajo caudal de agua a enfriar.
3.3	Caída de presión a través del filtro demasiado alta.
	Filtro seco obstruido.
4.1	Ajuste inadecuado en el vástago de la válvula de expansión.
5.1	Daño en el impulsor de la bomba.
	Entrada de aire en la tubería de succión o fuga excesiva en el área de impulsión.
5.2	Selección inadecuada de los materiales del sello o empaquetadura.
	Desbalanceo generado por el impulsor.
	Falta de lubricación en los rodamientos del motor.
5.3	Sobrecorriente.
	Falla de la bomba.
	Fallo del controlador de sobrecarga de la bomba.
	Bajo aislamiento en las bobinas del motor.
5.4	Falla en los devanados del motor.
6.1	Obstrucción parcial del filtro.
	Filtro completa o parcialmente saturado con agua o ácido.
6.2	Filtro obstruido.
7.1	Obstrucción en el asiento de la válvula.
8.1	El interruptor no se acciona, fallo en el interruptor.
9.1	Falla del sensor.
	Fallo en la comunicación con el sensor.
10.1	Desajuste por vibraciones.

	Corrosión.
11.1	Interruptor dañado.
12.1	Interruptor dañado.
13.1	Corrosión.
	Asiento de la válvula dañado.
13.2	Asiento de la válvula dañado.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.6 Análisis de criticidad

Para hacer este análisis, se toma como factores los modos de falla y se determina qué consecuencias genera cada uno de los identificados, con énfasis en los objetivos de interés de la empresa, los cuales se basan en producción, calidad del producto y ambiente. Algunos efectos de peso son factores como pérdida en la producción por bajo estándar en la calidad y paros en la producción para cambiar condiciones de trabajo que no están cumpliendo con las especificaciones del producto o del cliente. La tabla 8 muestra esas consecuencias que afectarían a la empresa, de una u otra forma, y podrían generarle pérdidas.

Tabla 8.

Consecuencias que podrían generar los modos de falla descritos

Modo de falla	**Consecuencias**
1.1	Al no cumplirse con un tiempo requerido para lograr extraer el calor al agua proveniente de los moldes, y si los ciclos del compresor son demasiado cortos, se puede ver afectada la calidad de la producción. Posible paro no programado.
1.2	Se puede llegar a dañar el compresor en un tiempo no establecido, lo que hace que se tenga que parar la producción total de la planta.
1.3	No se puede completar con el ciclo de enfriamiento de agua, por lo que el sistema no funciona como se debe. Posible paro no programado.
1.4	Aumenta el consumo de energía, la eficiencia del equipo disminuye y el enfriamiento del sistema puede llegar a ser muy bajo.

1.5	Se aumenta el consumo de energía, baja la eficiencia y el sistema no enfría según el estándar adecuado. Posible paro no programado.
1.6	En periodos muy extensos de trabajo bajo esas condiciones, el equipo se puede llegar a dañar, por lo que se tendría un paro total de la planta.
2.1	Se llega a tener alzas en la temperatura del sistema, por lo que no se trabaja a las condiciones requeridas.
2.2	El proceso de enfriamiento del agua es excesivo, pero el equipo se puede ver comprometido por falta de presión.
2.3	El proceso de enfriamiento del agua es, por lo tanto, muy irregular.
3.1	Afectación en la calidad por posibles imperfecciones en el producto final.
3.2	Se reduce la eficiencia del equipo.
3.3	Se pueden producir fugas en el sistema por daños en la estructura, lo que reduce la vida útil de esta y posible paro programado para su reparación.
4.1	Reducción de la eficiencia de enfriamiento del agua del proceso.
5.1	No se logra suplir la demanda de caudal requerida por las inyectoras para el eficiente enfriamiento.
5.2	Daño permanente en la bomba o alabes en un tiempo indefinido, por lo que se vería afectada la producción por un paro total de la planta.
5.3	Daño en los devanados del motor por aumento de arranques. Paro total de la planta.
5.4	Daño total la bomba. Paro total de la planta
6.1	Se baja la eficiencia del sistema. El efecto puede corregirse, pero depende de un paro programado para inspección o limpieza del filtro; por lo tanto, un paro de la producción.
6.2	Se baja la eficiencia del sistema. El efecto puede corregirse, pero depende de un paro programado para inspección o limpieza del filtro; por lo tanto, un paro de la producción.
7.1	En caso de fugas en las que se deba para el equipo, se pierde la purga parcial total del sistema y aumenta el derrame de agua.
8.1	Posible paro programado en la producción para la inspección del elemento.
9.1	No se tiene noción de cuáles son las condiciones en las que están trabajando los equipos. Puede haber un daño en la producción o sistema.
10.1	No se tiene noción de cuáles son las condiciones en las que están trabajando los equipos. Puede haber un daño en la producción o sistema.
11.1	El equipo está desprotegido ante una falla por aumento en la presión. Se llega a ver afectado el sistema por trabajar bajo condiciones no deseadas.

12.1	El equipo está desprotegido ante una falla por reducción en la presión. Se llega a ver afectado el sistema por trabajar bajo condiciones no deseadas.
13.1	Derrame de agua de enfriamiento que provoca la reducción en el caudal y posibles daños en equipos periféricos a este.
13.2	Daños en el sistema de enfriamiento estructurales o de los equipos por presión excesiva.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Cuando se identifican las consecuencias, se procede a realizar el análisis de criticidad para identificar cuál es el elemento de mayor importancia a inspeccionar. Para ello se crea la tabla 9, en la cual, con base en los tres pilares de interés de la empresa, que son Producción, Calidad y Ambiente, se demuestra qué tan crítico sería cada modo de falla por la consecuencia generada en caso de que llegase a ocurrir. Para aproximar el análisis lo mejor posible, se toman en cuenta las opiniones del jefe del Departamento de Producción, del jefe del Departamento de Calidad y del jefe del Departamento de Mantenimiento. Se definió la Severidad según la categoría indicada con un número del 1 al 4, donde 1 corresponde a Menor, 2 a Marginal, 3 a Mayor y 4 a Catastrófica; y finalmente se asignó la Probabilidad usando las categorías: Alta, Media, Baja, Muy baja y Remota, según lo indica la norma IEC 60812:2018 en la que se está basando el AMFEC.

Tabla 9.

Numeración según el nivel de severidad de los modos de falla

Severidad			
Catastrófica	Mayor	Marginal	Menor
4	3	2	1

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 10.

Tabla de criticidad según los modos de falla

	Consecuencias			
Modos de falla	**Producción**	**Calidad**	**Ambiente**	**Probabilidad**
1.1. El interruptor de sobrecarga del compresor se acciona cada cierto tiempo de trabajo.	3	2	1	Remota
1.2. El compresor se sobrecalienta cuando está en operación.	2	2	1	Muy baja
1.3. El compresor no logra arrancar o se detiene después de arrancar.	3	2	1	Muy baja
1.4. Los ciclos del compresor son demasiado extensos o muy cortos cuando está operando.	3	3	2	Muy baja
1.5. El compresor funciona constantemente.	2	3	2	Muy Baja
1.6. Se percibe un sonido de golpeteo en el interior del compresor.	2	2	1	Remota
2.1. Se tiene una presión de condensación demasiado alta en el sistema.	2	3	1	Muy baja
2.2. Se tiene una presión de condensación demasiado baja en el sistema.	2	3	1	Muy baja
3.1 La presión de condensación es muy irregular.	2	3	1	Muy baja
3.2. La temperatura de salida del agua del evaporador está fuera del límite establecido.	3	3	1	Muy baja
3.3. Se percibe congelamiento en la estructura del evaporador.	1	1	3	Remota
3.4. La capacidad del evaporador es insuficiente en el sistema.	3	2	1	Remota
4.1. Se percibe congelamiento en la tubería o sobrecalentamiento.	2	2	1	Remota
	3	3	1	Baja

5.1. La bomba no alcanza la presión establecida de 50 psi a la que debe estar trabajando.				
5.2. Hay un notorio aumento de ruido y temperatura en la bomba.	2	2	1	Media
5.3. El interruptor de sobrecarga de la bomba se dispara.	3	3	1	Muy baja
5.4. La bomba se detiene y no enciende.	4	3	1	Media
6.1. El filtro se censa frío, con posible rocío y escarcha en su superficie.	2	2	2	Muy baja
6.2. La salida del refrigerante por la tubería luego de pasar el filtro se siente más fría que la entrada de este.	1	1	1	Muy baja
7.1. La válvula no gira.	1	1	2	Remota
8.1. Se percibe congelamiento o glaseado en la tubería de manipulación de líquidos.	2	2	2	Remota
9.1. Los sensores marcan temperaturas muy por encima o muy por debajo de una temperatura razonable, o inclusive no marcan la temperatura.	3	3	2	Remota
10.1. No se cuenta con la lectura de la presión a la que está trabajando el sistema.	3	3	2	Remota
11.1. El interruptor no se acciona a la presencia de una presión por encima de lo establecido.	2	2	1	Remota
12.1. El interruptor no se acciona a la presencia de una presión por debajo de lo establecido.	2	2	1	Remota
13.1. La válvula se acciona para liberar presión, pero no sella.	2	2	3	Remota
13.2. La válvula no se acciona en una sobrepresión en el sistema.	3	2	1	Muy baja

Fuente: Elaboración propia (2022).

Con la tabla 10 generada se puede realizar la asignación de una matriz de criticidad sugerida por la norma IEC 60812:2018. Por medio de todo el análisis respectivo, se tiene un resumen más representativo de forma visual que genera una matriz de criticidad, con la cual se asigna una categoría (Inaceptable, Indeseable, Aceptable y Menor) a cada uno de los objetivos de enfoque de la empresa. Para el caso de Producción se tiene la matriz representada en la tabla 10; en esta se puede determinar que el modo de falla 5.4 es el que debe presentar un mayor monitoreo, dado que la criticidad que presenta es de alta importancia por la categoría de inaceptable en la que quedó asignada; a este le sigue el modo de falla 5.1, el cual se ubica de segundo en la categoría de inaceptable. Estos modos de falla están asignados a las bombas del sistema de recirculación de agua helada.

Tabla 11.

Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Producción

		Severidad			
		Catastrófica	Mayor	Marginal	Menor
Probabilidad	Alta				
	Media	#5.4		#5.2	
	Baja		#5.1		
	Muy baja		#1.3 #1.4 #3.2 #5.3 #13.2	#1.2 #2.1 #2.2 #2.3 #6.1 #1.5	
	Remota		#1.1 #3.4 #9.1 #10.1	#1.6 #4.1 #8.1 #11.1 #12.1 #13.1	#3.3 #6.2 #7.1

Fuente: Elaboración propia (2022).

Para el siguiente objetivo de la empresa, el cual es la Calidad, se procede a hacer la misma matriz que el caso anterior, pero acoplada a las condiciones y requerimientos exigidos. Los resultados de esta matriz se representan en la tabla 11; en ella se puede observar que los modos de falla críticos son los mismos que en el caso de la matriz de Producción; incluso, quedaron igual en categoría de inaceptable, por lo que suma como indicador que el sistema crítico en este análisis es el sistema de recirculación de agua helada.

Tabla 12.

Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Calidad

		Severidad			
		Catastrófica	Mayor	Marginal	Menor
Probabilidad	Alta				
	Media	#5.4			
	Baja		#5.1	#5.2	
	Muy baja		#1.4 #1.5 #2.1 #2.2 #3.1 #3.2 #5.3	#1.2 #1.3 #6.1 #13.2	#6.2
	Remota		#9.1 #10.1	#1.1 #1.6 #3.4 #4.1 #8.1 #11.1 #12.1 #13.1	#3.3 #7.1

Fuente: Elaboración propia (2022).

Por último, el objetivo prioritario para la empresa es el medioambiente, por lo que de igual forma se aplica la herramienta de la matriz de criticidad para determinar si alguno de los modos de falla está dentro de la categoría inaceptable, que en este caso es la de interés para el monitoreo. El

resultado de esta matriz se presenta en la tabla 12, y se puede determinar que para el objetivo de Ambiente los modos de falla, según la categoría encajada, no representan un alto grado de criticidad. Por esta razón, en este caso no se selecciona ninguno de los elementos asignados a los modos de falla presentes.

Tabla 13.

Matriz de criticidad reflejada en los modos de falla respecto a Calidad

		Severidad			
		Catastrófica	Mayor	Marginal	Menor
Probabilidad	Alta				
	Media				#5.2 #5.4 #6.1
	Baja				#5.1
	Muy baja			#1.4 #1.5	#1.2 #1.3 #2.1 #2.2 #3.1 #3.2 #5.3 #6.2 #13.2
	Remota		#3.3 #13.1	#7.1 #8.1 #9.1 #10.1	#1.1 #1.6 #3.4 #4.1 #11.1 #12.1

Fuente: Elaboración propia (2022).

Como resumen, se llega a la conclusión de que el elemento de mayor criticidad demostrado a través de la herramienta AMFEC es el sistema de recirculación de bombeo de agua helada. Por ello, con base en los modos de falla, se cuenta con una idea de qué se debe monitorear en el sistema analizado, puesto que la criticidad del equipo así lo solicita. Se debe tomar en cuenta que para este proyecto solo serán de peso los modos de falla en la categoría Inaceptable, con el fin de generar un enfoque mayor en este tipo de modo de falla; se dejan de lado aquellos que se encuentran en

otras categorías, como la de indeseable, para una futura implementación para un monitoreo más riguroso.

5. Capítulo V. Sistemas de monitoreo

Se decide diseñar un sistema que se acople lo mejor posible al modo de falla crítico, por lo que se toma en cuenta la implementación de un prototipo capaz de captar señales para obtener datos reales del funcionamiento de este. Posteriormente, se decide en conjunto el uso del *software* LabView para tener un mayor control de los datos tomados, además de ser una herramienta compatible con diferentes programas y módulos de comunicación, capaz de procesar las señales de entrada de múltiples maneras para su respectivo análisis de interés, así como tener una interfaz amigable con el usuario sin necesidad de contar con una persona con amplio conocimiento en el manejo de este.

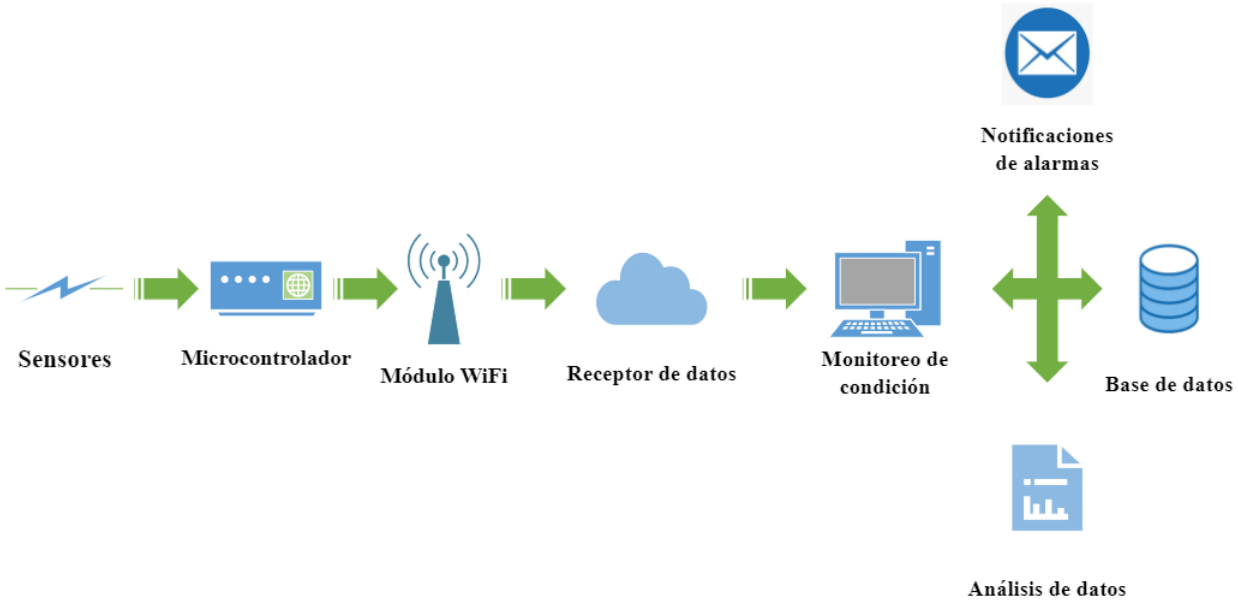


Figura 15. Arquitectura del sistema de monitoreo
Fuente: Elaboración propia (2022).

En un sistema de monitoreo existen elementos indispensables para que sea funcional. Como se muestra en la figura 15, lo primero es captar lo deseado de manera idónea con la instalación de sensores que detecten las señales físicas y las traduzcan a señales digitales; a esto le sigue un microprocesador, el cual funciona como medio traductor de las señales enviadas por los sensores y, a su vez, como transmisor a un ordenador para su respectivo procesamiento. Para que el

microcontrolador logre transmitir las señales, se debe emplear un sistema de comunicación; en este caso, la vía wifi es la óptima por las largas distancias entre el cuarto de máquinas y la oficina del Departamento de Mantenimiento de la empresa; por ello se utiliza un módulo wifi, ya que se trata de un medio inalámbrico y confiable. Se puede realizar la comunicación directa del módulo a una plataforma en la nube que guarde los datos, y de esta misma se pueden enviar los datos al *software* LabView para controlar y verificar en tiempo real el funcionamiento y la operación del equipo o elementos en monitoreo.

Una vez que los datos están en LabView, se inician las funciones del sistema creado, en el cual, por parámetros previamente establecidos, las personas encargadas del monitoreo del equipo podrán ver su funcionamiento en tiempo real, así como ser alertadas vía correo electrónico de manera inmediata si algo no está trabajando de la forma en que debería. Además, se genera una bases de datos con los indicadores de interés que se guardan en un archivo de fácil manipulación, como lo es un archivo Excel; este, a su vez, puede estar guardado en una carpeta con acceso directo a la base de datos de la empresa donde se pueden consultar los datos cuando se desee.

Uno de los objetivos clave de un sistema capaz de captar y guardar datos de manera óptima sobre la operación de un equipo es crear una base de datos lo suficientemente sólida para establecer parámetros más precisos de funcionamiento y con esto que sea más notorio una posible falla o un funcionamiento incorrecto. Además, se trata de tener la suficiente data para un modelo predictivo que logre indicar con antelación una falla futura del equipo monitoreado, y con un límite de tiempo establecido para poder tomar decisiones importantes de mantenimiento, aumentando así la confiabilidad y el control del activo.

5.1 Sistema recirculación de agua helada

Según lo indicado en el AMFEC, para el sistema de enfriamiento de agua se obtuvo que el equipo de prioridad de monitoreo son las bombas que hacen circular el agua helada por todo el circuito del sistema. Estas bombas deben enviar el agua helada a los moldes de las inyectoras, controladas cada una por medio de un variador de frecuencia marca Danfoss, a una frecuencia de 40 Hz y a una presión de 50 psi, para mover un flujo aproximado de 110 gal/min según las indicaciones de

diseño de la empresa encargada de la instalación del sistema de enfriamiento de agua. El sistema de bombeo cuenta con tres bombas, las cuales funcionan por medio de motores eléctricos trifásicos, como se muestra en la figura 16; dos bombas están en actual funcionamiento y una en *back-up*, por si alguna de las otras dos llegase a fallar.

Figura 16. Unidad de bombeo de agua helada
Fuente: Elaboración propia (2022).

Cabe destacar que se tomarán en cuenta los modos de falla catastróficos; según el AMFEC, uno de los modos de falla catastrófico es el #5.1, donde la bomba no logra alcanzar la presión establecida de 50 psi, por lo que es de suma importancia tomar en cuenta la presión de trabajo de

las bombas, así como implementar un sistema para el modo de falla #5.4, en el que la bomba se detiene y no vuelve a arrancar, detalle que entró en la característica de catastrófico.

Una manera para monitorear y controlar el funcionamiento de los motores eléctricos es por medio del análisis de la firma de corriente del motor conocido como AFCM. Chingal (2018) determina múltiples trabajos realizados en los últimos 40 años acerca de daños detectados y diagnosticados por medio del análisis de la corriente en un motor de inducción, usando los datos históricos de la corriente consumida. Indica que los motores tienen un registro eléctrico y este cambia con el tiempo, lo que se vuelve semejante a un análisis de vibraciones, por lo que un histórico de datos de la corriente en los motores funcionaría como base para determinar daños en rodamientos, ruptura de barras, pérdida de excentricidad del entrehierro e inclusive problemas en engranes. Esto abre la oportunidad de desarrollar e introducir el tema, por medio del análisis de la corriente, para estudiar la condición del motor conforme el tiempo; además, Chingal (2018) indica una serie de normas para realizar adecuadamente este análisis, entre las cuales están las normas ISO 20958:2013, IEC 61000-4-30, IEC 17025:2005, IEC 61010-031:2002, entre otras, y la IEEE Standard 519:1992.

Por lo anterior, se decide implementar un sistema que se acople lo mejor posible al modo de falla crítico y catastrófico del equipo. En el caso del modo de falla #5.4 del motor, se toma como opción el monitoreo energético para considerar una futura implementación de un análisis de corriente del motor. Según la marca Fluke, lo ideal en este tipo de sistema de monitoreo es tomar la medición de tensión y corriente en las tres líneas de alimentación para lograr un mayor control del consumo por parte del motor a las condiciones de trabajo sometido, además de obtener parámetros importantes, como elevaciones en el consumo de energía a lo largo del tiempo bajo las mismas condiciones de trabajo, así como variaciones de consumo en las líneas de alimentación, lo que provoca desgastes prematuros y aumento de la probabilidad de falla de los elementos eléctricos y mecánicos del motor, con el fin de crear una base de datos para generar un índice de salud de las bombas.

5.1.1 Sensores y equipo

La propuesta para el dispositivo de monitoreo se basa en la implementación para una de las bombas del sistema de recirculación de agua helada, pues al contar con tres iguales, el modelo se puede amplificar en las mismas condiciones para el resto de los motores.

Los sensores y el equipo propuestos para la implementación del sistema de monitoreo se basan en tres sensores para la toma de corriente marca YHDC modelo SCT-013, el cual posee la capacidad de medir rangos de corriente alterna de 0A hasta 100A. Para el caso de los sensores de medición de tensión se propone tres de la marca UNIT Electronics, el modelo ZMPC101B con capacidad de medición desde los 0V hasta los 1000V. Para el caso del sensor para la toma de presión se propone la marca EARU EL DC5V G1/4., con la capacidad de medir hasta 1.2 MPa de fluidos como aire, agua, aceite, gas, lo cual lo hace muy versátil.

Para la implementación del microcontrolador se propone el uso de un Arduino Mega 2560 R3, dado que posee múltiples entradas para captar datos de los sensores al mismo tiempo, lo cual hace viable la implementación de este microcontrolador. Además, puede trabajar en conjunto con el uso de un módulo de wifi ESP8266 para la transmisión de datos de manera inalámbrica.

Como complementos, se agregan datos de elementos como capacitores de 10 uF, resistencias de 100 Ohm a 0.25 W de potencia, cableado para conexiones y la placa o PCB para hacer más aproximado el coste del sistema que se propone implementar.

5.1.2 Base de datos y *software* para procesamiento y creación de la interfaz

Para el presente proyecto se debe utilizar una base de datos a nivel profesional que pueda almacenar los datos en formato MySQL, el cual permite ver en columnas y filas la información registrada. Una propuesta de base de datos robusta que varía según la cantidad de espacio de almacenamiento que se deseé es Hostinger.com.

Para el uso de un *software* se propone el detallado en la sección 3.1.11, donde se describe a LabView como una herramienta útil en este tipo de aplicaciones, ya que además crea un protocolo

de comunicación y almacena los datos tomados para ser extraídos por el *software* LabView vía TCP/IP de conexión abierta desde la base de datos.

5.2 Prototipo para la toma de datos en tiempo real

Para efectos de este proyecto se toma la opción del monitoreo de la corriente con un prototipo, dejando como futura oportunidad de mejora la toma de tensión real, sustituyéndola de igual manera en una simulación por medio de LabView.

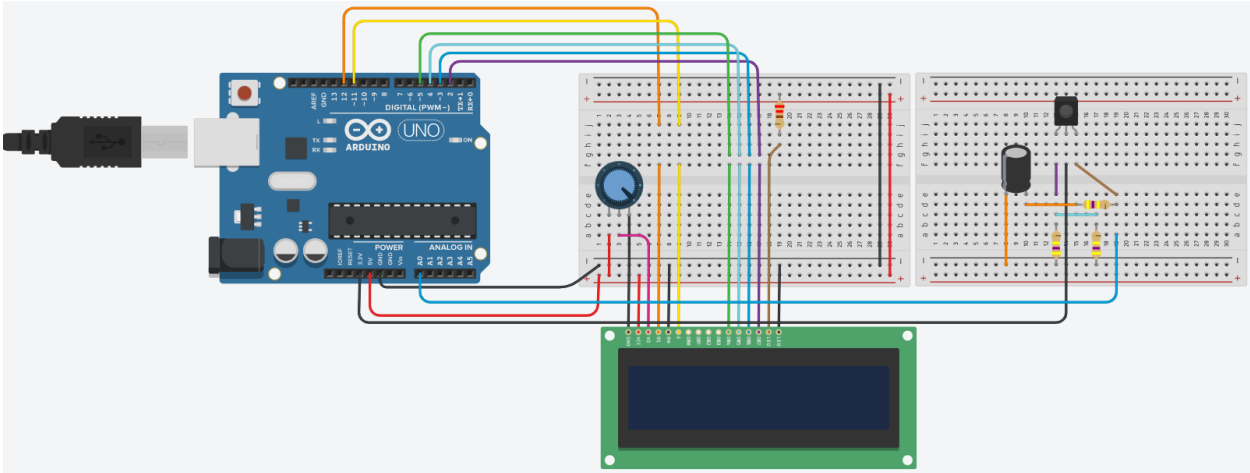


Figura 17. Diagrama del circuito implementado
Fuente: Elaboración propia (2022).

Se crea un prototipo basado en una amplia investigación de modelos propuestos para la medición de corriente usando dispositivos de bajo costo y fácil adquisición. En la figura 17 se muestra una representación del diseño que se llevó a cabo para el ensamble de los diferentes elementos del dispositivo y en la figura 18 se muestra cómo el prototipo queda terminado en físico con la numeración de los componentes que se especifican en la tabla 14.

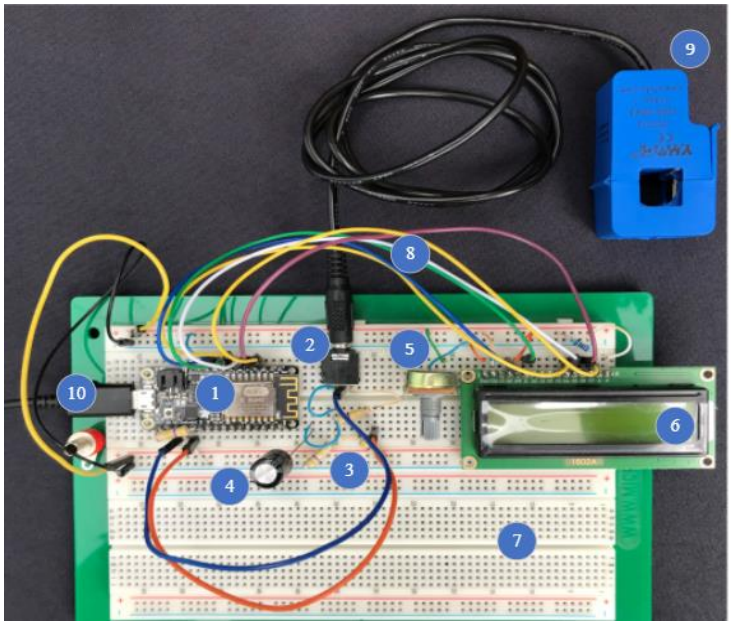


Figura 18. Prototipo para la adquisición de datos de corriente del motor
Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 14.

Identificación de los elementos utilizados en el prototipo

Número	**Dispositivo**
1	Microcontrolador con módulo wifi incluido marca Adafruit
2	Acople para espiga del sensor de corriente SCT-013
3	Resistencias de 100 Ohm, 0,25 W
4	Capacitor de 10 µF
5	Potenciómetro
6	*Display* LCD 16x2
7	*Breadboard*
8	*Jumpers* o cables de conexión
9	Sensor de corriente SCT-013
10	Cable de fuente de alimentación a 5V

Fuente: Elaboración propia (2022).

El dispositivo es capaz de captar las señales de corriente por medio de un sensor SCT-013 en una de las líneas de alimentación, el cual toma los datos de manera no invasiva en el motor. De esta

forma se facilita el proceso de captación en tiempo real del consumo de corriente sin afectar la operación del motor o modificarlo para su instalación. Una vez lo anterior, este envía los datos de forma alámbrica a un microcontrolador; para este caso se utiliza un microcontrolador de la marca Adafruit Feather Huzzah, que cuenta con el módulo ESP8266 incorporado para la transmisión de datos vía wifi, el cual se puede programar desde la aplicación de Arduino descargando las librerías de Adafruit respectivas para su uso, como se puede ver en el código en la sección de apéndice, lo que hace que cumpla con las funciones básicas necesarias para transmitir los datos. En el código de la programación, es indispensable introducir el nombre y la clave de la red a la que se conectará el Arduino para transmitir los datos vía wifi, así como el usuario y una clave proporcionada de la página web a donde se dirigirán los datos, que en este caso se hace por medio de la página web Adafruit.com, donde se adquiere una cuenta de manera gratuita. A pesar de que tiene capacidad reducida de funciones, esta página sirve como mediador entre el microcontrolador y los diferentes programas, como el LabView. No obstante, también cuenta con la disponibilidad de recibir, almacenar y graficar el comportamiento de la señal tomada para monitorear los datos enviados por el dispositivo en tiempo real. Por último, se le debe dar un tratamiento a la señal enviada por el sensor al código fuente para lograr calibrar los datos captados.

5.2.1 Implementación del dispositivo

Para poder implementar el dispositivo de manera óptima, se instala en el panel eléctrico donde se encuentra la conexión del interruptor manual, que corta el paso de corriente del variador de frecuencia implementado para el control de velocidad del motor en una de las líneas de alimentación. Una vez colocado el sensor, en la misma línea se utiliza el multímetro marca Fluke modelo 323 de tenazas para comparar la toma de datos de un dispositivo de alta calidad con el dispositivo propuesto, lo cual se comparó, a la hora de tomar los datos, para inspeccionar la aproximación de la toma de corriente, como se muestra en la figura 19.

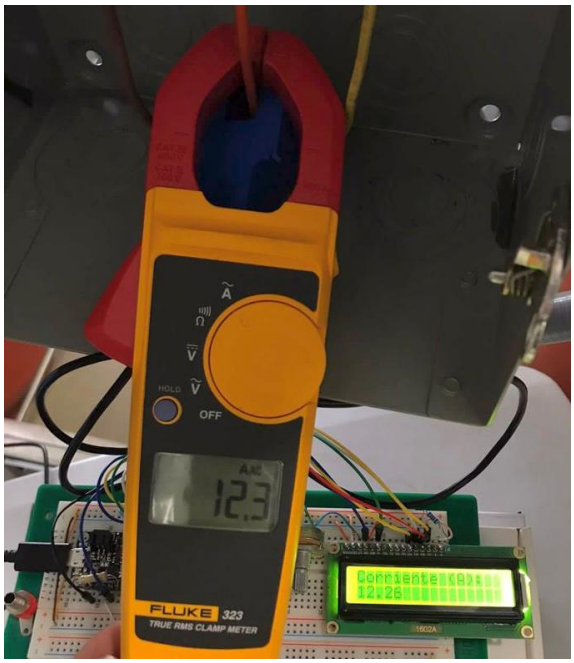


Figura 19. Comparación en la toma de datos del dispositivo respecto al Fluke 323
Fuente: Elaboración propia (2022).

Se tomaron datos de corriente cada cinco segundos durante dos horas, aproximadamente, para tener una idea del comportamiento de la corriente, así como de las lecturas tomadas por el sensor. Sin embargo, a la hora de implementar este sistema, se puede sustituir este tiempo de toma de datos a uno más prolongado, ya que no se encuentra una regla o ley que indique cuál debe ser el tiempo entre lectura y lectura, y de paso se puede evitar el almacenamiento de datos innecesarios. En cuanto al monitoreo, puede ser una toma constante de datos para llevar un control en tiempo real del comportamiento del consumo de corriente y cómo está trabajando el sistema, pero en el almacenamiento de estos se puede tomar en cuenta una lectura cada hora de trabajo, lo cual dejaría una base de datos robusta del comportamiento de las variables y, a su vez, a la hora de analizar estos datos, la tendencia del comportamiento no estaría tan sesgada.

En cuanto al código fuente, se realiza la calibración adecuada para obtener un valor de corriente óptimo y este factor de la corriente se multiplica por otro, el cual es de 305 voltios; este es el valor RMS tomado de la tensión suministrada por el variador. Por medio de esta multiplicación, se logra hacer una aproximación del cálculo de la potencia consumida por la bomba en la línea donde se tomaron los datos, por lo que la potencia no es trifásica. Estos datos fueron enviados a la plataforma Adafruit, en la cual, por medio de las funciones de la página, se crea una gráfica e indicadores numéricos con rangos extraídos del dato de placa del motor, todo para obtener en tiempo real el comportamiento de la señal censada, tal como se puede apreciar en la figura 20.

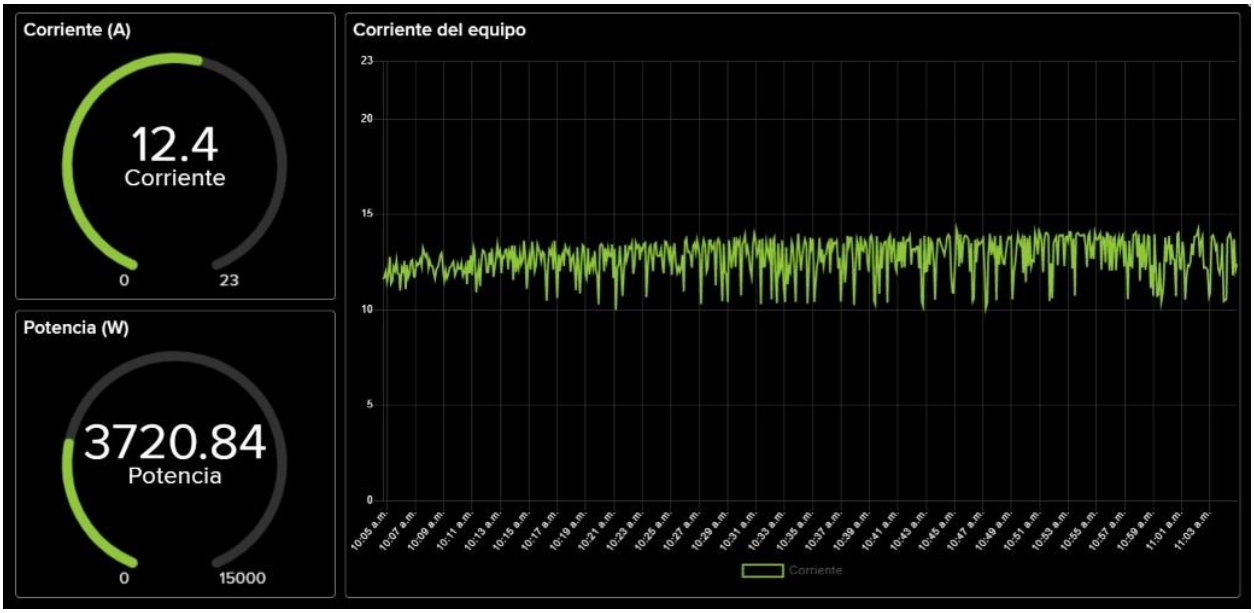
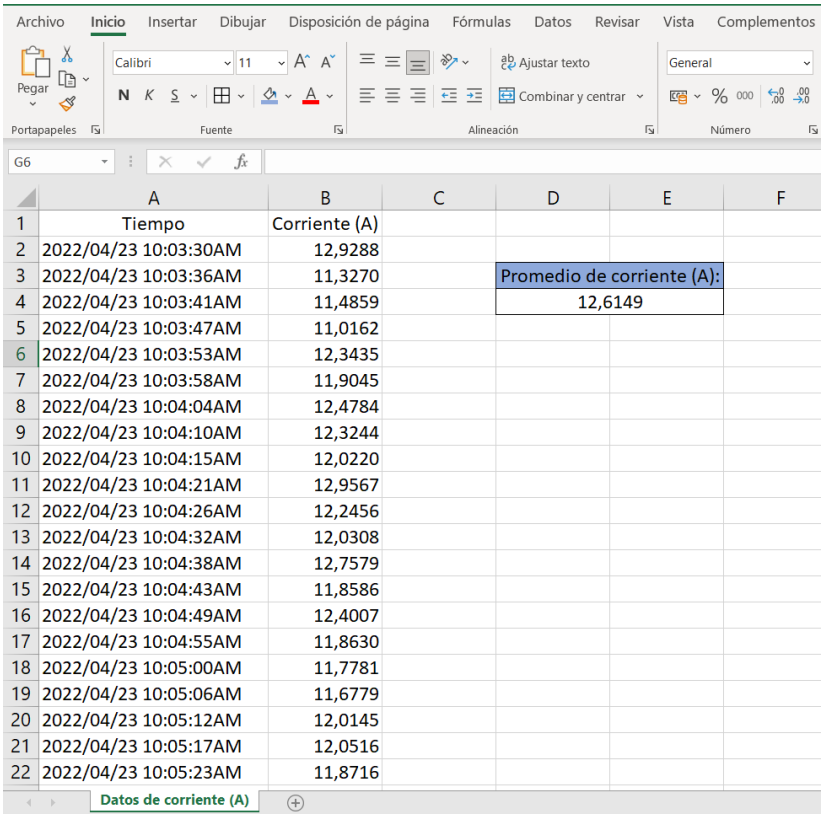


Figura 20. Indicadores numéricos y gráfica de valores de corriente tomados por el dispositivo
Fuente: Elaboración propia (2022).

Como se puede observar en la gráfica de la figura 20, estos datos enviados por el dispositivo tuvieron una serie de variaciones, las cuales se pueden interpretar como ruido en la red o falta de una mejor calibración del sensor o dispositivo, lo que implica que se necesite una mayor cantidad de datos históricos para lograr interpretar por medio de herramientas de análisis de datos, como por ejemplo Rapidminer, con la cual se sabe si el comportamiento de los datos obtenidos es el indicado, o si hay una variación en la que se puede interpretar que la precisión del sensor puede

afectar la toma de datos. Seguidamente, después de tomar la información, Adafruit la almacena según la fecha en que se adquirió y da la posibilidad de descargarla en formato Excel con extensión CSV en rangos de tiempo. Del procedimiento de toma de datos se obtuvo la tabla en Excel presentada en la figura 21; para efectos demostrativos se realizó un cálculo del promedio de la corriente obtenida, a saber 12.61 A, y como se demostró en la figura 18 la corriente RMS tomada con el instrumento de medición Fluke era de 12.3 A; así se obtiene un porcentaje de error de 2.4 % de los datos tomados respecto al multímetro.



	A	B	C	D	E	F
1	Tiempo	Corriente (A)				
2	2022/04/23 10:03:30AM	12,9288				
3	2022/04/23 10:03:36AM	11,3270		Promedio de corriente (A):		
4	2022/04/23 10:03:41AM	11,4859		12,6149		
5	2022/04/23 10:03:47AM	11,0162				
6	2022/04/23 10:03:53AM	12,3435				
7	2022/04/23 10:03:58AM	11,9045				
8	2022/04/23 10:04:04AM	12,4784				
9	2022/04/23 10:04:10AM	12,3244				
10	2022/04/23 10:04:15AM	12,0220				
11	2022/04/23 10:04:21AM	12,9567				
12	2022/04/23 10:04:26AM	12,2456				
13	2022/04/23 10:04:32AM	12,0308				
14	2022/04/23 10:04:38AM	12,7579				
15	2022/04/23 10:04:43AM	11,8586				
16	2022/04/23 10:04:49AM	12,4007				
17	2022/04/23 10:04:55AM	11,8630				
18	2022/04/23 10:05:00AM	11,7781				
19	2022/04/23 10:05:06AM	11,6779				
20	2022/04/23 10:05:12AM	12,0145				
21	2022/04/23 10:05:17AM	12,0516				
22	2022/04/23 10:05:23AM	11,8716				

Figura 21. Base de datos en Excel
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.2.2 Comunicación entre Adafruit y LabView

LabView tiene la posibilidad de conectarse con diferentes dispositivos e implementar diferentes vías de comunicación. Para el proyecto actual se propone que la comunicación entre los diferentes

medios sea por un enlace vía TCP/IP; para ello, en el código fuente se define un puerto servidor y la función WiFiserver, además de que se debe conocer la dirección IP a la que Arduino estaría enviando los datos, así como el nombre y contraseña de la red donde estos serán transmitidos; en este este caso sería para la plataforma Adafruit. Una vez hecho esto, desde el programa LabView, con la herramienta de protocolos de comunicación TCP, se usan las funciones para abrir la conexión, leer los datos, escribirlos y por último cerrar la conexión, tal y como se muestra en la figura 22.

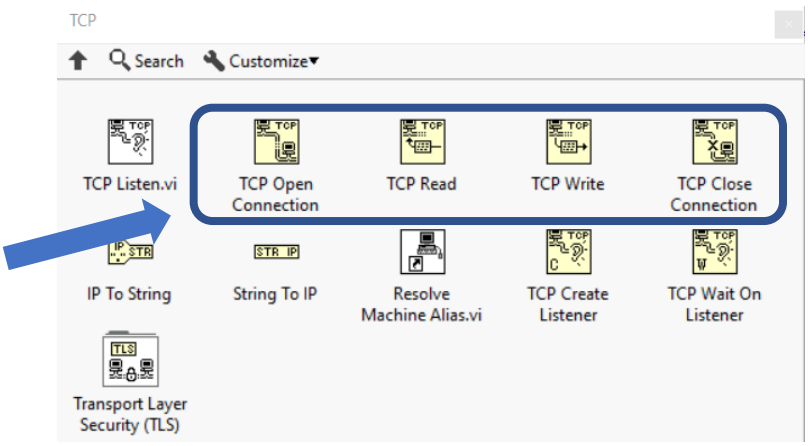


Figura 22. Protocolo de conexión entre LabView y el IP de la página donde se desea extraer el contenido
Fuente: Elaboración propia (2022).

A modo demostrativo, se toma un ejemplo mostrado en la figura 23, en el cual se enseña la conexión respectiva para lograr extraer los datos de la página de Adafruit hacia LabView, para procesarlos una vez que estén en el *software*. Los datos se toman de la ventana indicada como "Corriente" y se adaptan para continuar con el proceso de análisis que se requiera. Cabe destacar que, desde la aplicación de Arduino, con ayuda del microcontrolador y más sensores, se puede llevar a cabo el envío de datos simultáneamente de las tres líneas de alimentación de tensión y de corriente.

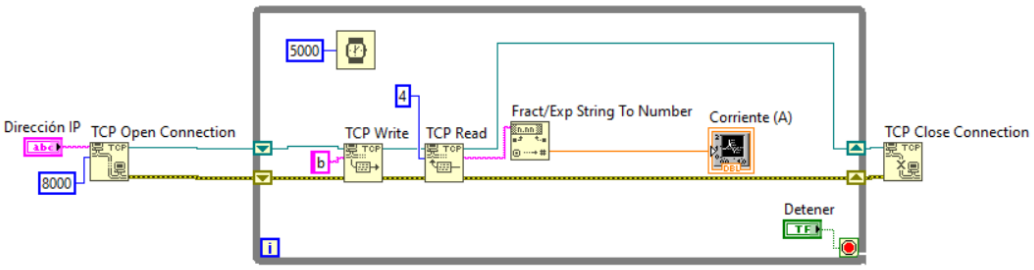


Figura 23. Comunicación vía TCP entre Adafruit y LabView
Fuente: Kumar & Pradhan (2021).

Es importante destacar que Adafruit.io es un medio de comunicación no profesional y se usa para proyectos pequeños o experimentales. En este caso, se usa para demostrar la conexión del protocolo de comunicación TCP/IP entre LabView y una plataforma web donde se estarían recibiendo los datos desde el microcontrolador. La base de datos propuesta en el apartado 5.1.2 no se utiliza en el prototipo por no ser de carácter gratuita.

5.3 Implementación de LabView

Para la implementación de LabView se requiere primero saber las condiciones de trabajo para las que fueron hechas el motor, además de determinar, con base en su índice de salud, si está trabajando bajo condiciones ideales o si se deben dar señales de alerta por un funcionamiento incorrecto.

Para seleccionar los parámetros de trabajo del motor, cabe destacar que este está controlado por un variador de frecuencia marca Danfoss, que controla la frecuencia del motor a 40 Hz, según las indicaciones de diseño de la empresa encargada de instalar el sistema. Con respecto a muchos de los datos de placa, se usan valores calculados o aproximados a los que se indican bajo las

condiciones de 50 Hz para simular y generar los índices de alarmas y procesamiento de datos respectivos.

5.3.1 Monitoreo de la corriente

Para determinar el índice de salud se consultan los datos de placa, como se muestra en la figura 24, así como los manuales de la marca que fabrica los motores; en estos se especifican los valores máximos a los que trabaja el motor, según la conexión a la que se encuentre, ya sea Delta o Estrella. El motor que se analizará está conectado en Estrella, por lo que los valores tomados corresponden a los indicados en este tipo de conexión. Debido a lo anterior, con los datos de placa se determina el rango máximo de corriente al que se debe dar la alarma de que hay un exceso de corriente; sin embargo, como la corriente en el arranque suele ser de hasta 500 % u 800 % de la corriente nominal del motor, según Chapman (2012), se decide colocar un temporizador que activará la alarma de un funcionamiento incorrecto cinco segundos después de la elevación de la corriente para evitar alarmas por motivos de arranque, un corte inesperado de energía o inclusive por una lectura fallida momentánea del sensor. También se toma en cuenta cuando hay presencia de una corriente muy baja o cuando se encuentre apagado el motor.

Figura 24. Datos de placa del motor de la bomba a monitorear
Fuente: Elaboración propia (2022).

Para determinar qué rangos de corriente estarían perjudicando al motor, se selecciona, como lo indica el fabricante, una corriente máxima de operación de 20.4 A y un parámetro mínimo de corriente de 8.5 A; además, si la lectura del sensor es menor a 1 A, se informa que el equipo se encuentra detenido. En caso de que las lecturas de corriente estén fuera de esos rangos, se activaría la alarma de funcionamiento incorrecto para cada situación específica de la corriente, como se muestra en la figura 25; adicional a ello, se les estaría notificando a las personas interesadas que hay un fallo puntual en los datos de corriente para que así realicen una inspección inmediata. En el monitoreo de la corriente, al igual que en los otros casos, se estarían guardando los datos con fecha y hora en un documento Excel para la inspección futura y análisis predictivos.

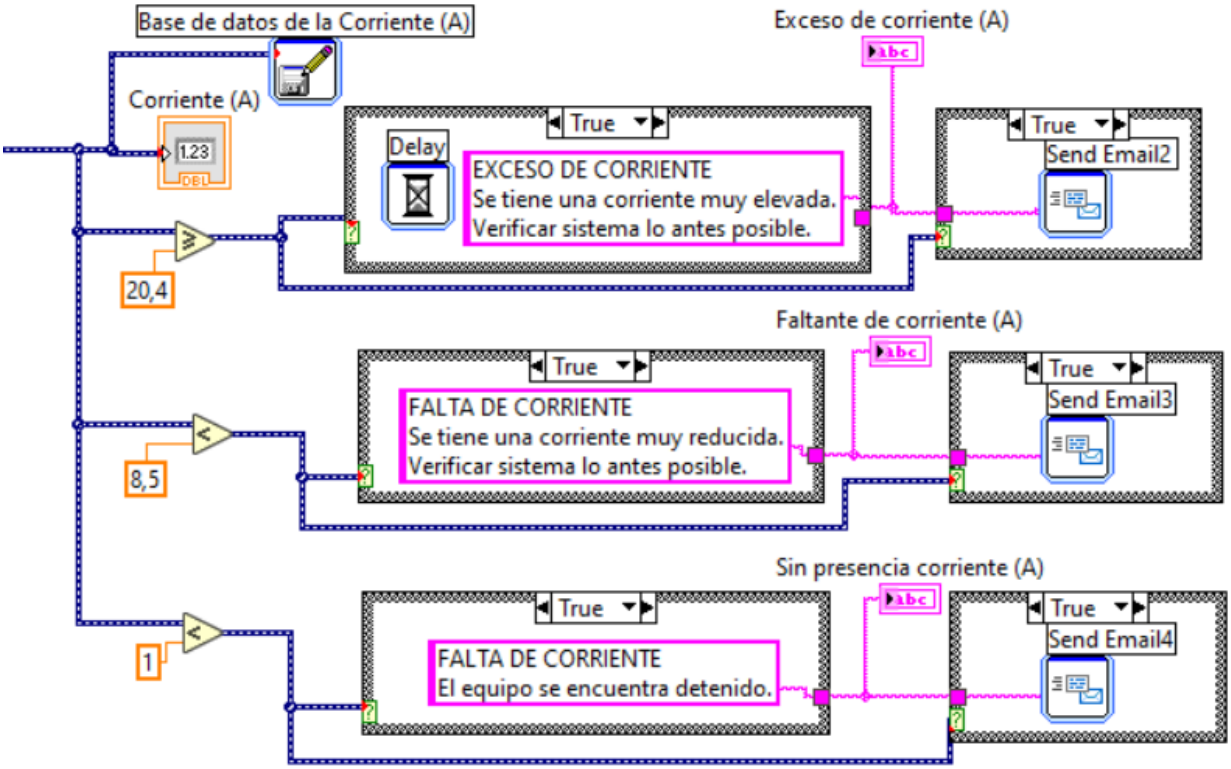


Figura 25. Estructura para control y monitoreo de la corriente RMS en el motor
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.2 Monitoreo de la eficiencia

Otro parámetro del cual se decide llevar control es la potencia consumida por el motor; en el caso del cálculo de la potencia, se utiliza la fórmula de potencia de entrada, la cual se muestra en la ecuación (1) (Chapman, 2012).

$$(1)\ P_{Entrada} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\theta$$

Donde:

$P_{Entrada}$: potencia eléctrica consumida por el motor.

V_L: tensión a la que se encuentra la línea.

I_L: Corriente de línea consumida por el motor.

$\cos\theta$: factor de potencia del motor.

Se aplica esta fórmula de la ecuación (1) para determinar cuál es la potencia en watts que consume el motor, la cual es la potencia mecánica útil usada para mover los alabes de la bomba. Según Chapman (2012), se deben determinar las pérdidas que se generan en la conversión de potencia eléctrica a potencia mecánica útil; estas pérdidas constan en la figura 26. No obstante, para calcular las pérdidas en un motor del tipo que se expone, se requieren ensayos específicos, por lo que se hace difícil a nivel de este proyecto cumplir con el dato exacto de la potencia mecánica de salida a las condiciones especificadas que trabaja el motor a 40 Hz. Por ello, se decide hacer una aproximación en la potencia que puede entregar el motor a esa frecuencia, que no es la que especifica los datos de placa; por medio de un cálculo rápido, se extrapola esa potencia usando los datos de 60 y 50 Hz, lo que da como resultado que para esa frecuencia en específico la potencia entregada por el motor es de aproximadamente 10 Hp o 7500 W; ese dato se pone en el programa LabView como variable para hacer el cálculo aproximado de la eficiencia del motor.

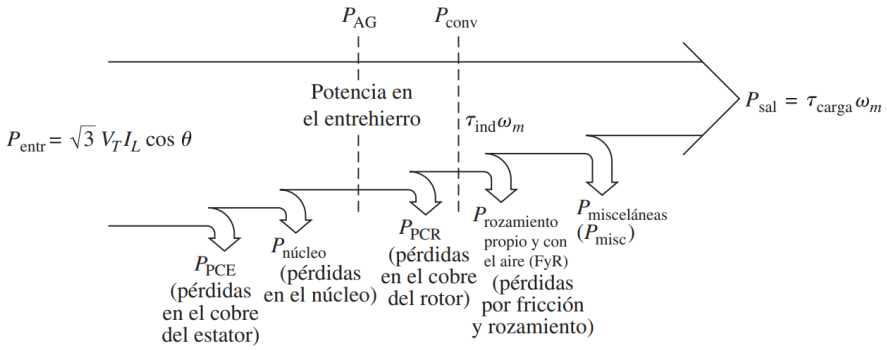


Figura 26. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción
Fuente: Chapman (2012).

Una vez obtenida esa potencia mecánica de salida, se procede a calcular la potencia que se muestra en la ecuación (1) con los datos enviados por los sensores de corriente y tensión, según la línea respectiva 1, 2 y 3, con el fin de poder calcular la eficiencia que está teniendo la bomba según el consumo de energía de entrada. Sumado a lo anterior, también se tiene un archivo que guarda los datos históricos sobre la eficiencia por si se quisiera revisar a lo largo del tiempo. En este caso, no se crea una alarma o mensaje de un aumento o disminución de la eficiencia en el motor, dado que es proporcional a los cambios en la corriente y tensión, los cuales ya se toman en cuenta para alarmas respectivas. La explicación anterior se muestra en la figura 27.

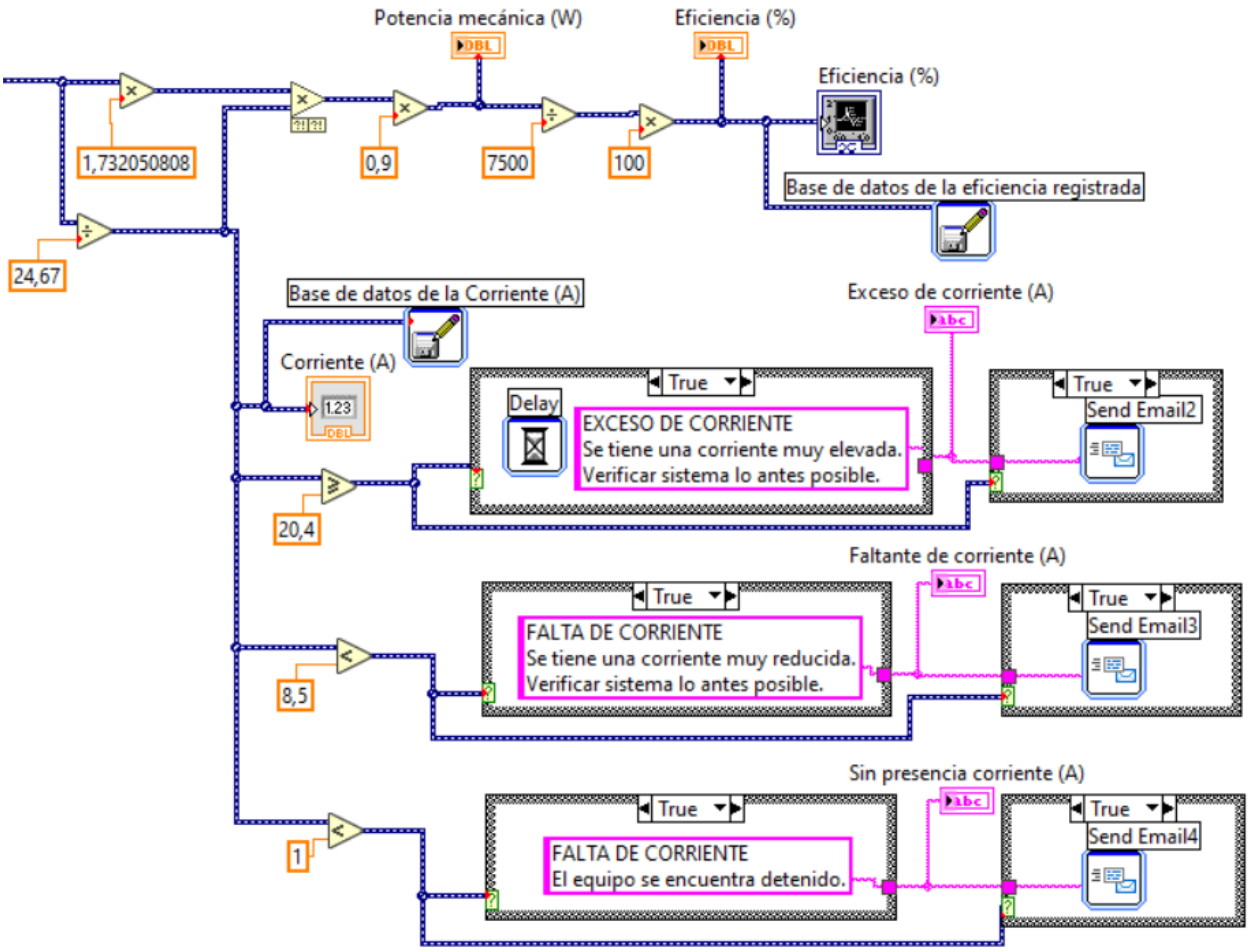


Figura 27. Monitoreo de la eficiencia del motor
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.3 Monitoreo del desbalance de la tensión

Según la marca Fluke (2022), uno de los parámetros más importantes a medir es el desequilibrio en la tensión de alimentación de los motores, ya que un desequilibrio degrada el rendimiento y reduce la vida útil del motor. A continuación, se muestra cómo debe ser calculado el desequilibrio de la tensión entre las líneas de alimentación:

1. Se debe determinar el promedio ya sea de la tensión o de la corriente de las tres líneas.

2. Seguidamente, se debe calcular la mayor desviación de tensión o corriente.

3. Por último, se tiene que dividir la desviación máxima por el promedio de la tensión o corriente y multiplicar ese factor por 100 para obtener el resultado en porcentaje. (Fluke, 2022)

Una representación del paso 3 es en la ecuación (2) que se presenta a continuación:

$$\text{Ecuación (2)} \quad \frac{\text{Desviación máxima del promedio}}{\text{Promedio de V o I}} X100$$

Según Pacual, Maccorone, Albanese, Fata & Clemente (2017), en su artículo sobre la cuantificación del desbalance admisible, el límite de desbalance no debe sobrepasar el 2 %, según las normas IEEE Std 1159 (2009) e IEC 61000-2-2 (2020) en sus versiones actualizadas. Por lo anterior, en la simulación se pone como límite máximo un 2 % de desbalance permitido entre las líneas de alimentación del motor; sin embargo, la alarma se activará y la notificación vía correo llegará a las personas interesadas cuando el desbalance en la tensión sea de 1.5 % para tener una alarma prematura ante un evento de este tipo, como se muestra en la figura 28.

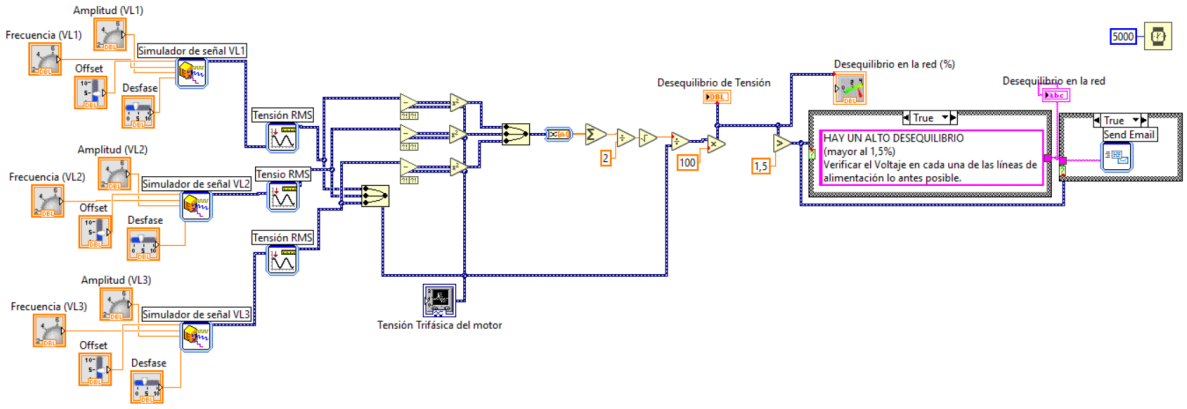


Figura 28. Simulador de señales de tensión para monitorear el desequilibrio de la tensión en las líneas de alimentación del motor
Fuente: Elaboración propia (2022).

Para este caso, se simularon distintos voltajes que hicieran superar el desequilibrio establecido, lo que generó la alarma e hizo que se enviara un correo electrónico, como se muestra en la figura 29.

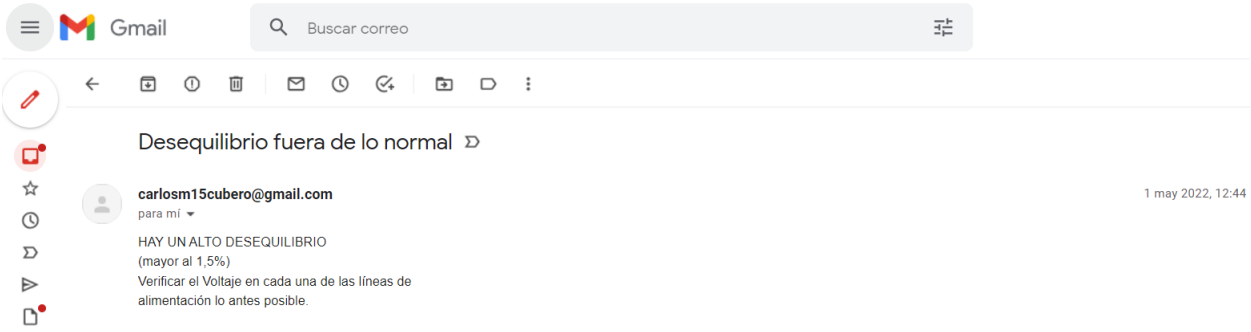


Figura 29. Alarma enviada al correo electrónico
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.4 Monitoreo de la presión de salida de la bomba

Uno de los indicadores del AMFEC realizado fue con respecto al modo de falla catastrófico relacionado con que la presión de salida de la bomba no estaba dentro del rango indicado. Por esto,

se toma en cuenta dentro del monitoreo la presión de salida de la bomba para generar una alarma que indique que la presión no es la indicada en caso de que se salga de los límites previamente establecidos. Estos fueron sugeridos por la empresa encargada de diseñar el sistema, la cual indicó que el rango de presión debe estar entre 40 y 60 psi, con un promedio a 50 psi en la medida de lo posible.

Por ello, se propone que por medio de un sensor de presión marca EARU, con alimentación DC a 5V, y con un diámetro de ¼ de pulgada para el acople a la tubería, se tome la presión; este se instalaría al lado donde la bomba aumenta la presión del fluido de retorno, exactamente donde se encuentra una prevista para la colocación de un manómetro de presión, de manera que se puedan tomar los datos respectivos de la presión.

En el caso de la toma de presión para efectos de enviar la señal directamente del microcontrolador, es necesario depurar la señal desde el código fuente, como se realizó en el caso de la toma de corriente en el prototipo. Sin embargo, para efectos de la simulación, se pueden ingresar los datos sin necesidad de depurar la señal, como se observa en la figura 30; solo se le deben dar los límites establecidos para programar las funciones requeridas; así, en el diseño del procedimiento en LabView el sistema que controla los parámetros de funcionamiento genera alarmas según el rango, y de estas se envía un correo electrónico con el mensaje respectivo a la falla detectada.

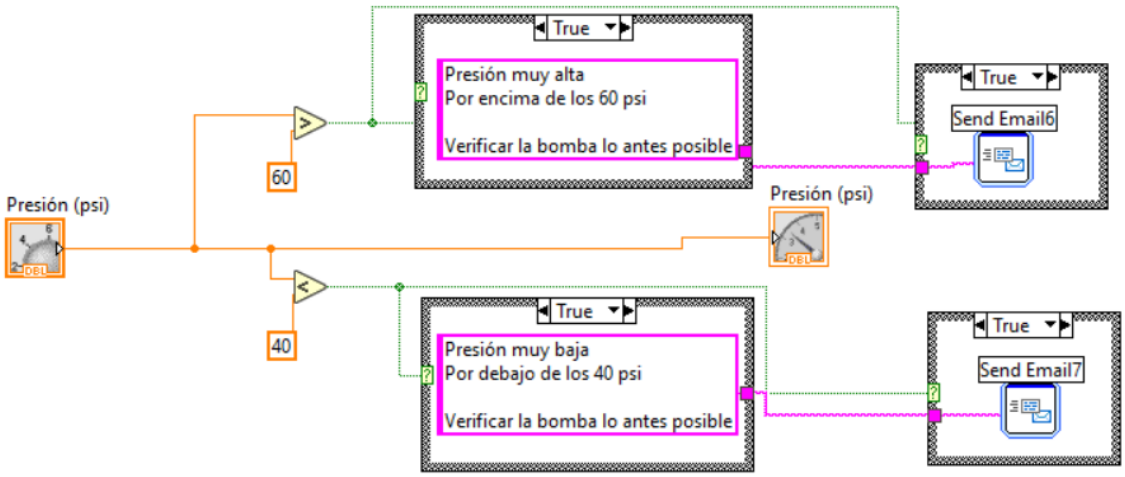


Figura 30. Programa para alertas sobre una presión incorrecta en el sistema
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.5 Control de horas para engrase

En los datos de placa del motor, como se puede ver en la figura 31, se determina que para este tipo de motor se requiere aplicar lubricante al rodamiento cada 15 797 h de trabajo; con una engrasadora manual, se aplica grasa marca Mobil de tipo Polyrex, grado EM. Se crea un contador de las horas de operación en conjunto con el programa de monitoreo, para que una vez cumplidas las horas de trabajo necesarias se les informe a las personas interesadas que se requiere el mantenimiento preventivo y el engrase de los rodamientos del motor. Una vez realizada la tarea de alertar vía correo electrónico, se reinicia el contador para empezar con el ciclo de horas; este proceso se muestra en la figura 31.

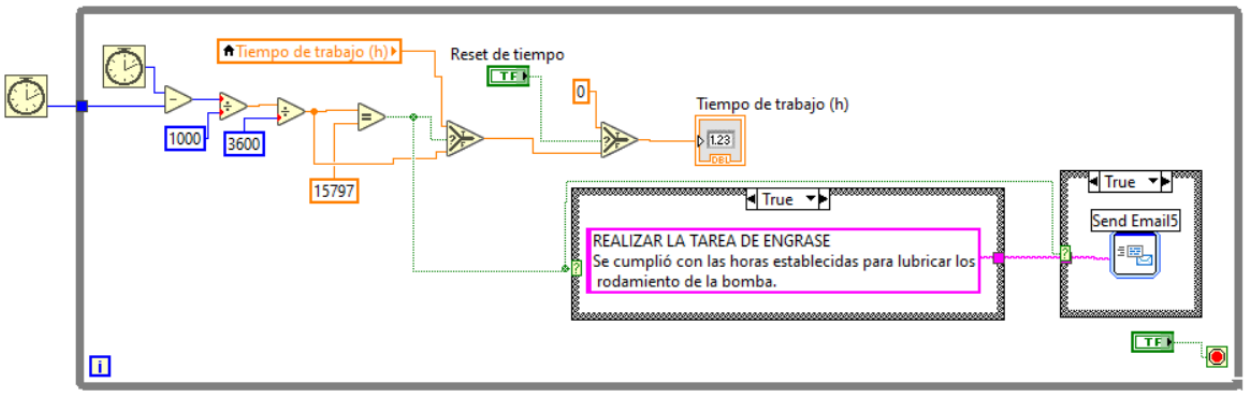


Figura 31. Conteo de las horas para lubricación de los rodamientos del motor
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.6 Interfaz de usuario

Para lograr que el monitoreo sea amigable con el usuario, es necesario una interfaz donde se puedan ver los valores a los cuales está trabajando el equipo, sin que el personal deba ser experto o tener muchos conocimientos sobre el uso del *software*; por esto, se crea una interfaz como se muestra en la figura 32. Se cuenta con un indicador de desequilibrio tanto numérico como métrico que señala el desbalance entre las tres líneas de alimentación, así como indicadores de la tensión y la corriente promedio en el motor; además, se muestra la potencia eléctrica consumida por el motor y un indicador de la eficiencia que está teniendo la bomba. Seguidamente, se detalla con un manómetro de presión el indicador de los valores en los que se encuentra la presión a la que está elevando el fluido el sistema de bombeo, así como el indicador de las horas de trabajo para tener una idea de cuántas horas hacen falta para el engrase manual. En este caso, se decide introducir dos gráficas, las cuales representan la tensión trifásica del motor y la eficiencia del motor. Cabe destacar que en la gráfica mostrada se ve una línea constante por ser el resultado del cálculo del valor RMS del voltaje y corriente en las líneas 1, 2 y 3 para efectos de la simulación.

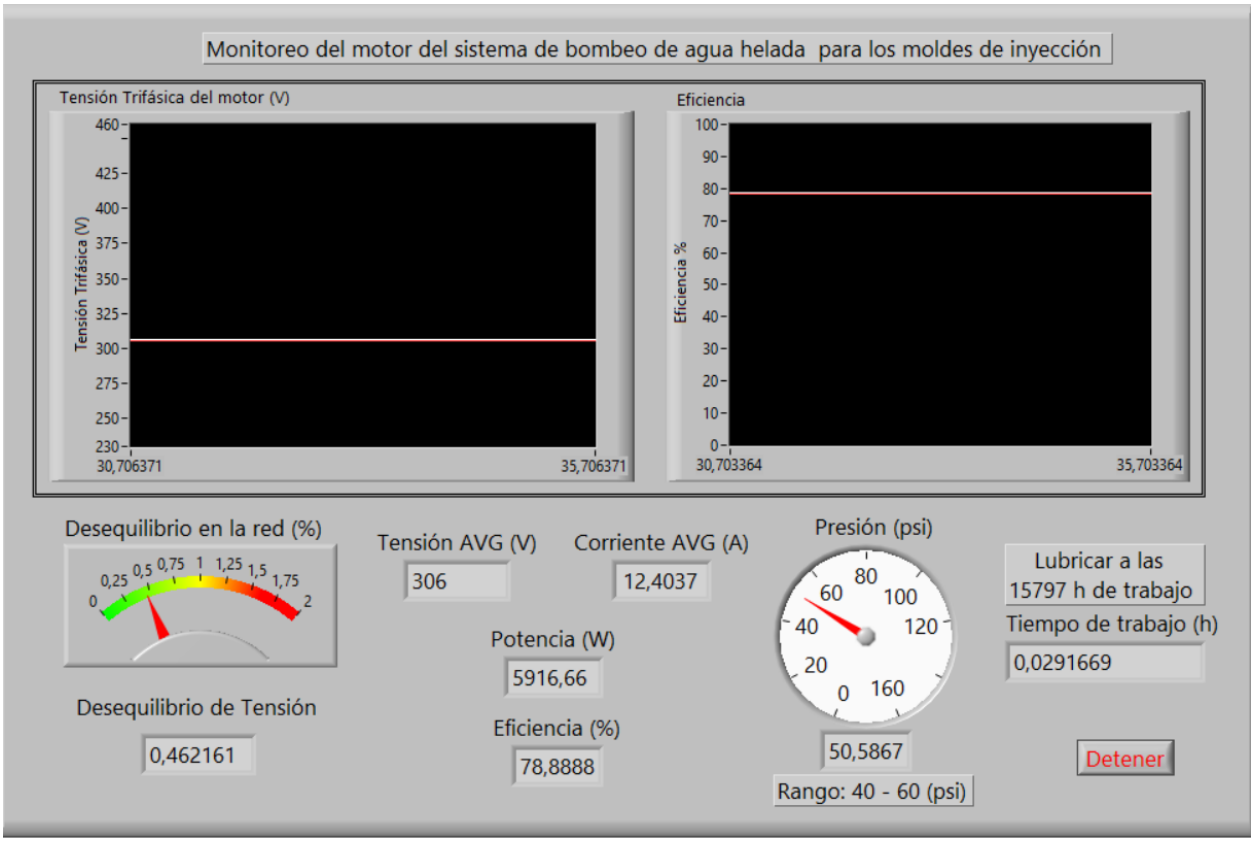


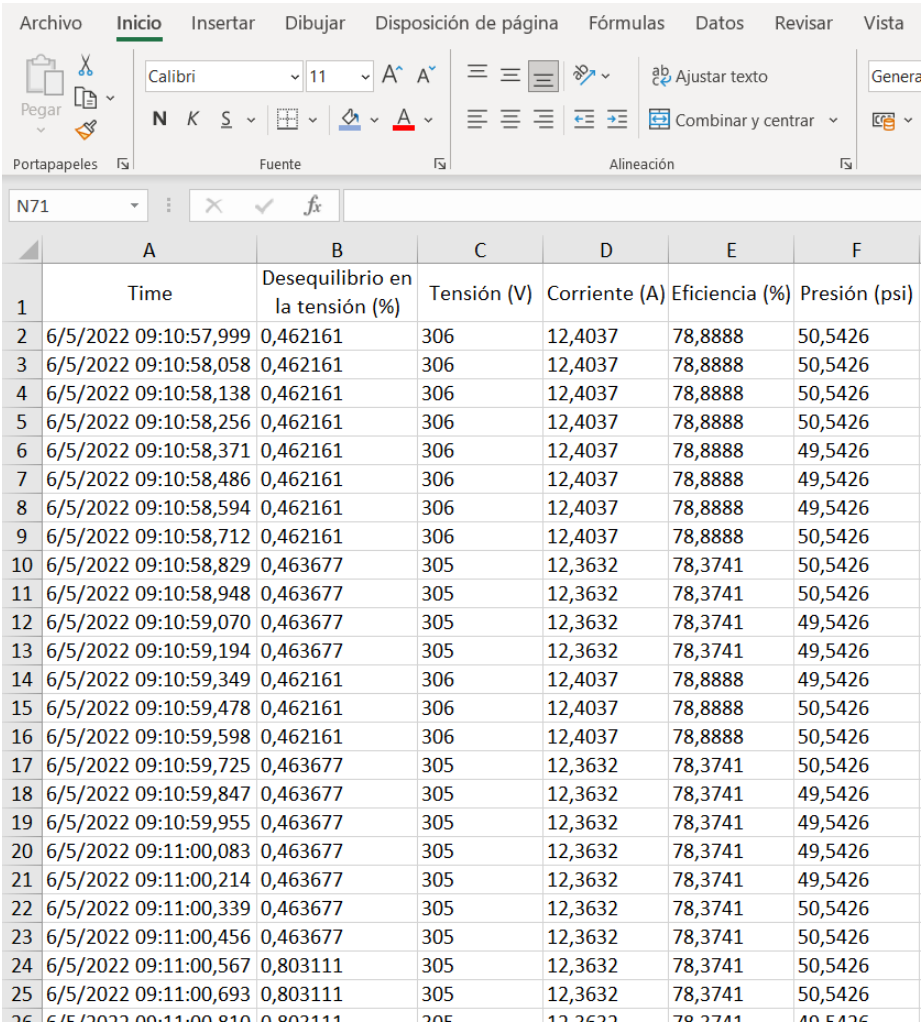
Figura 32. Interfaz de usuario para el sistema de monitoreo
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.7 Datos de la simulación realizada

Actualmente, el problema del sistema de monitoreo con el que cuenta la empresa es que las variables captadas no se guardan, lo que imposibilita poder consultar en un futuro el comportamiento que se ha tenido a lo largo de un período de tiempo. Por ello, parte de la simulación del sistema en LabView es que los datos queden guardados; en este caso, se realiza en formato Excel para cuando se desee consultar el comportamiento histórico de las variables monitoreadas. A diferencia del sistema actual, se propone monitorear un elemento del equipo para saber su comportamiento a lo largo del tiempo, donde se tomen y guarden datos cada hora para

con esto no tener una base de datos sobresaturada de variables que se pueden tornar repetitivas e inclusive de poco valor; se guardarán con fecha y hora exacta de la toma de los datos.

En la figura 33 se muestra en detalle el resultado de los datos obtenidos; para efectos de la simulación, se trata del resultado de la medición con diferencia de tiempo de 100 milisegundos entre dato y dato para representar que las variables en monitoreo quedan guardadas en columnas. La primera columna presenta los datos de la fecha y hora; en las siguientes aparecen los demás datos de interés.



	A	B	C	D	E	F
1	Time	Desequilibrio en la tensión (%)	Tensión (V)	Corriente (A)	Eficiencia (%)	Presión (psi)
2	6/5/2022 09:10:57,999	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
3	6/5/2022 09:10:58,058	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
4	6/5/2022 09:10:58,138	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
5	6/5/2022 09:10:58,256	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
6	6/5/2022 09:10:58,371	0,462161	306	12,4037	78,8888	49,5426
7	6/5/2022 09:10:58,486	0,462161	306	12,4037	78,8888	49,5426
8	6/5/2022 09:10:58,594	0,462161	306	12,4037	78,8888	49,5426
9	6/5/2022 09:10:58,712	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
10	6/5/2022 09:10:58,829	0,463677	305	12,3632	78,3741	50,5426
11	6/5/2022 09:10:58,948	0,463677	305	12,3632	78,3741	50,5426
12	6/5/2022 09:10:59,070	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
13	6/5/2022 09:10:59,194	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
14	6/5/2022 09:10:59,349	0,462161	306	12,4037	78,8888	49,5426
15	6/5/2022 09:10:59,478	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
16	6/5/2022 09:10:59,598	0,462161	306	12,4037	78,8888	50,5426
17	6/5/2022 09:10:59,725	0,463677	305	12,3632	78,3741	50,5426
18	6/5/2022 09:10:59,847	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
19	6/5/2022 09:10:59,955	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
20	6/5/2022 09:11:00,083	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
21	6/5/2022 09:11:00,214	0,463677	305	12,3632	78,3741	49,5426
22	6/5/2022 09:11:00,339	0,463677	305	12,3632	78,3741	50,5426
23	6/5/2022 09:11:00,456	0,463677	305	12,3632	78,3741	50,5426
24	6/5/2022 09:11:00,567	0,803111	305	12,3632	78,3741	50,5426
25	6/5/2022 09:11:00,693	0,803111	305	12,3632	78,3741	50,5426

Figura 33. Datos almacenados producto de la simulación en formato Excel
Fuente: Elaboración propia (2022).

5.4 Cuadro comparativo entre el sistema actual de monitoreo empleado en la empresa y el propuesto en este proyecto

A modo de comparar el sistema implementado actualmente y el sistema propuesto, se crean las tablas 15 y 16, en las cuales se muestran las ventajas y desventajas de la implementación de cada sistema. Esto permite tener un mayor panorama de lo que se hace y de lo que se propone hacer, todo con miras a una mejora contante para la empresa.

Tabla 15.

Ventajas y desventajas del modelo de sistema de monitoreo que se encuentra actualmente en la empresa

Ventajas	**Desventajas**
El sistema está compuesto por sensores que envían los datos a un controlador lógico programable o PLC, lo que lo hace más preciso en funciones y procesamiento de datos.	Se tiene que estar en la página web del sistema para enterarse de alarmas por parámetros fuera de lo establecido.
En el caso de los sensores de presión, caudal y temperatura, estos se instalaron de manera invasiva con perforaciones en la tubería, por lo que hay una mayor aproximación y precisión en la toma de datos.	Solo se monitorean las condiciones en que está el agua helada; no se toma en cuenta la condición de los equipos.
La interfase es gráficamente completa y amigable con el usuario.	Se utiliza comunicación vía *ethernet*; no es un sistema de monitoreo inalámbrico. Los datos se suben por medio de un servidor, lo cual genera incomodidad por las largas distancias y por la colocación del cableado.
Su instalación la realizó un equipo de profesionales dedicados a la implementación de estos sistemas; por lo tanto, es más robusta y completa.	No se tiene el estimado del costo de la instalación del sistema de monitoreo, pero por su robustez y al ser un servicio subcontratado se estima que es muy costoso.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 16.

Ventajas y desventajas del modelo de sistema de monitoreo propuesto en el presente proyecto

Ventajas	**Desventajas**
Es un sistema sencillo, lo que disminuye en complejidad de instalación tanto para los equipos como para los sensores.	Su sencillez puede aumentar la falta de precisión de la toma de datos.
Cuenta con sensores y equipos que se consiguen fácilmente en el mercado, además de ser accesibles en costo.	No porque el equipo sea de bajo valor significa que sea de alta calidad.
Se monitorea un equipo en específico, lo que hace que tenga mayor control sobre el comportamiento en operación de este; en el momento en que suceda una falla, se puede identificar de una manera más rápida por qué sucedió.	Monitorear todos los elementos de un equipo puede resultar costoso y hace que se tenga que aumentar la complejidad de los sensores y elementos a utilizar.
El sistema de notificaciones vía correo electrónico, en el caso de la activación de una alarma, hace que un dispositivo, sea móvil o no, y siempre que tenga conexión a internet, pueda recibir una alerta sin necesidad de meterse a la interfase; esto brinda libertad de monitoreo.	La libertad de monitoreo puede crear un ambiente de confianza, por lo que se puede descuidar el equipo y monitoreos en sitio, a falta de alarmas presentes en un periodo de tiempo prolongado; o, por el contrario, en el fallo de un sensor, se pueden empezar a recibir falsas alarmas en el equipo o inclusive no recibir las notificaciones.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6. Capítulo VII. Análisis financiero

Para lograr el cálculo en efectos del análisis financiero, se debe considerar primeramente los costos de implementar el sistema de adquisición de datos, tanto para los sensores de cada variante que se desea medir como para el equipo conjunto y componentes electrónicos. En la tabla 17 se muestra de manera específica el detalle de todos estos elementos considerados para la realización del proyecto.

Tabla 17.

Costo de los componentes del sistema de adquisición de datos

N.º	Componente	Fabricante	Descripción	Cantidad	Lugar de compra	Precio ($)/(₡)
1	Sensor de corriente	YHDC	Mod SCT-013 (0-100A)	3	crcibernetica.com	44.85 / 29 975.80
2	Sensor de Tensión	LC Technology	Modulo ZMPC101BAC (0-1000 V)	3	crcibernetica.com	17.85 / 11 930.17
3	Sensor de presión	EARU	DC5V (1,2 MPa)	1	aliexpress.com	8.92 / 5961.74
4	Módulo Wifi	Espressif System	ESP8266 Wifi	1	crcibernetica.com	14.95 / 9919.75
5	Microcontrolador	Arduino	Arduino Mega 2560 R3	1	crcibernetica.com	29.95 / 20 017.28
6	Capacitor	Chong	1 uF	3	crcibernetica.com	2.85 / 1904.82
7	Resistencia	RoHS Compliant	100 Ohm, 0,25 W	21	crcibernetica.com	0.525 / 165.88
8	Cables conectores	Foxnovo	Jumpers	15	crcibernetica.com	2.49 / 1652.19
9	Breadboard PCB	MOUSER ELECTRONICS	(16,6 X 10,8) cm	1	crcibernetica.com	28.95 / 19 209.14
10	Base de datos	Hostinger	Premium	4 años	Hostinger.com	143.52 / 96 635.91

11	Licencia LabView	National Instruments	Paquete básico	1 año	ni.com	523.64 / 353 470
					Total	818.495 / 552 003.86

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el caso del *software* LabView, se trabajó con la licencia gratuita de *Community Edition*; solo se deben descargar los módulos *Control Desing and Simulation* y *Real-Time*, que de igual manera son gratuitos por un periodo de aproximadamente un año. Sin embargo, existen diversos paquetes en los cuales se puede adquirir la licencia del *software* transcurrido el tiempo de prueba; se tiene LabView Básico, la versión *full* y la versión profesional; de ser el caso, con la versión básica se estarían cubriendo las necesidades establecidas. Queda a disposición de la empresa si desea seguir trabajando con la licencia de LabView después de su vencimiento, y con esto en futuros proyectos internos desarrollar proyectos más avanzados para aprovecharla. Se toma en cuenta el precio que tendría si se desea continuar con el *software* para solucionar el tema de la licencia como una preocupación a un futuro cercano.

A los costos de los componentes se les debe sumar los costos de instalación y de mantenimiento en caso de que se subcontrate a una empresa encargada o técnico para brindar este servicio. En el caso de un técnico, se estima que la instalación consta de un periodo de un día de trabajo. Un técnico en electrónica es capaz de realizar esta tarea y su salario base mensual es de 630 000 colones, según tusalario.org; esto equivale a 21 000 colones el día de trabajo. Se decide agregar una prevista de un monto para remplazo de sensores o elementos dañados de 50 000 colones anuales, además de dos inspecciones anuales del equipo, una por cada seis meses. Lo anterior se muestra en la tabla 18.

Tabla 18.

Costo por instalación y mantenimiento

	Días de trabajo	Salario por día (₡)	Costo total (₡)
Técnico en electrónica	2 por año	21 000	42 000
Instalación	1	21 000	21 000
Repuesto de equipo			50 000
		Total	₡68 000

Fuente: Elaboración propia (2022).

Por lo visto en las tablas 15 y 16, se contempla tanto instalación como inspecciones de mantenimiento o remplazo de sensores; así, la inversión inicial es de ₡620 003.86.

En la actualidad, ElectroPlast no subcontrata ningún mantenimiento para el equipo en estudio; sin embargo, se tiene la cotización de cuánto costaría un mantenimiento completo de todo el sistema, el cual se debería realizar cada tres meses de operación. Debido a lo anterior, se toman estos valores para tener una idea de cuánto se invierte en el mantenimiento de las bombas de recirculación de agua, ya que, al estar nuevo, de momento no ha requerido intervención alguna, o al menos así lo considera el Departamento de Mantenimiento.

Las inspecciones para el mantenimiento de las bombas del sistema de recirculación de agua helada de Chiller, como se muestra en el Anexo A, tienen un valor de $381.75 cada una. La empresa ofrece solamente el servicio si se realizan cuatro inspecciones anuales, para un monto total de $1527, que sumado al IVA del 13 % que se debe aplicar da como total $725.51.

Para este análisis se toma como salario positivo la inversión en el mantenimiento específico del equipo, la cual es de ₡1 164 759.63 según el tipo de cambio de dólares a colones, ya que con estos se demuestra el flujo de caja. Se toma el índice de precios al consumidor o IPC de 1.6 %, según el

Instituto Nacional de Estadística y Censos. Al ser equipos electrónicos la proyección del sistema se estima a tres años.

Tabla 19.

Flujo de caja para proyecto en los próximos tres años

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
IPC	0.016	1.016	1.032	1.048
Inversión inicial	₡620 003.86			
Costo de mantenimiento		₡1 164 759.63	₡1 202 031.94	₡1 259 729.47
Repuestos		₡81 280.00	₡83 880.96	₡87 907.25
Mano de obra		₡36 999.89	₡38 183.88	₡40 016.71
Flujo de caja	-₡620 003.86	₡1 046 479.74	₡1 079 967.10	₡1 131 805.52
TIR	162 %			
VAN	₡1 980 893.02			

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tras analizar la tabla 19 relacionada con los cálculos, se puede determinar que la tasa interna de retorno (TIR) es de un 162 %, lo que indica que el ingreso de ₡1 164 759.63 es mayor que la inversión inicial, la cual es ₡620 003.86. Esto evidencia que no hay monto por retornar, lo que hace que el proyecto sea viable, pues no quedan saldos negativos. Seguidamente, se realiza el cálculo del valor actual neto (VAN), para el cual se toma la tasa social de descuento del 12 %, según el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, lo que genera un resultado de ₡1 980 893.02; esto representa una ganancia y, en consecuencia, que el proyecto es viable.

Si se comparan entonces los datos de la inversión inicial de ₡620 003.86 hecha en una de las tres bombas y la inversión que se debe hacer en el caso de la contratación del mantenimiento preventivo de las bombas del equipo, la cual es de ₡1 164 759.63, se puede ver cómo se tiene un 48 % de ganancia de la inversión inicial respecto al costo del mantenimiento de la bomba empleado por la empresa Multifrío en el primer año.

7. Capítulo VII. Conclusiones

- Con el análisis de modo de falla, efectos y criticidad o AMFEC realizado, se logró determinar los elementos críticos en el equipo. Las bombas de recirculación de agua helada son las que presentaron dos modos de falla catastróficos: el primero fue que las bombas no alcanzaban la presión adecuada en el sistema para hacer recircular el agua de manera exitosa; el segundo surgió cuando la bomba se detuvo y no volvió a arrancar. Estos dos modos de falla fueron las bases para determinar qué variables se debían monitorear.

- Se planteó el desarrollo de la arquitectura para el sistema de adquisición de datos con base en el resultado del AMFEC del capítulo IV, donde se propusieron tres sensores de tensión, tres sensores de corriente y uno de presión para el monitoreo de una bomba del sistema de recirculación de agua. Además, se planteó el uso de equipos como el microcontrolador, módulo wifi y una base de datos para el almacenamiento de las variables monitoreadas con el protocolo de comunicación TCP/IP para la implementación del *software* LabView.

- Se desarrolló, a modo de ejemplo, un prototipo capaz de tomar datos de la corriente consumida en una de las bombas en tiempo real; por medio del *software* LabView se creó un sistema simulado de procesamiento de datos donde se generan alarmas con notificaciones enviadas vía correo electrónico a los interesados. A su vez, se creó una base de datos del comportamiento de las variables de interés, como desbalance en las líneas de alimentación, promedio en la tensión y corriente, así como la eficiencia y la presión de salida de agua helada de la bomba.

- Según el análisis financiero realizado, se tiene una inversión inicial de ₡620 003.86 que, en comparación con el saldo del costo de mantenimiento, el cual es de ₡1 164 759.63, genera un VAN de ₡1 980 893.02 a tres años plazo, lo que evidencia un ahorro del 48 % en el primer año.

8. Capítulo XIII. Oportunidades de mejora

- Realizar un sistema experto con los datos guardados, de al menos un año y medio, del sistema de monitoreo creado, para un análisis de resultados acerca de posibles futuras fallas, así como la estimación de la vida útil del equipo.

- Abarcar la torre de enfriamiento para obtener un mayor panorama del análisis y monitoreo de los equipos encargados del enfriamiento de agua helada de los moldes.

- Instalar sensores de vibraciones y temperatura en los motores de las bombas para cubrir todos los modos de falla que estas presentan.

- Capacitar a todo el personal del Departamento de Mantenimiento para que manejen el monitoreo y conocimiento de la forma en que opera el equipo con mayor facilidad.

- Si se decide seguir pagando la licencia de LabView, capacitar al personal de mantenimiento para que sepa usar la herramienta y logre crear proyectos internos o generar mejoras en el sistema actual.

9. Capítulo IX. Bibliografía

Ahmed , R., Mahadzir, S., Mohammad, N., Biswas, K., Matovu, F. & Ahmed, K. (2021). Artificial intelligence techniques in refrigeration system modelling and optimization: A multidisciplinary review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, 1388-2213.

Airson Ingenieros. (2022). *¿Qué es un Chiller? Funcionamiento y mantenimiento.* Recuperado de https://www.airsoningenieros.com/que-es-un-chiller-funcionamiento-y-mantenimiento/

Alcantara, V. (2019, marzo 26). *Vanguardia Industrial Revista Online B2B.* Recuperado de https://www.vanguardia-industrial.net/cual-es-el-impacto-economico-del-mantenimiento/

Automática e Instrumentación. (2019, julio 04). *La UNE publica los requisitos para ser una industria 4.0.* Recuperado de https://www.automaticaeinstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/2735463/une-publica-requisitos-industria-40

Blackburn, L., Tuttle, J. & Powell, K. (2020). Real-time optimization of multi-cell industrial evaporative cooling towers using machine learning and particle swarm optimization. *Journal of Cleaner Production*, *271*.

Burger, P. (2016, agosto 03). *Plastics Technology México.* Recuperado de https://www.pt-mexico.com/articulos/mejore-el-enfriamiento-de-sus-moldes-de-inyeccion-plastico

Chapman, S. (2012). *Máquinas eléctricas.* Mexico: McGraw-Hill.

Chingal, D. E. (2018). *Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la máquinaria rotativa y elaboración de una guía práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM* (tresis de grado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador.

Coble, J. & Hines, W. (2011). Applying the General Path Model to Estimation of Remaining Useful Life. *International Journal of Prognostics and Health Management*, *2*(1), 2153-2648.

Corona, L., Abarca, G. y Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores.* Mexico: Grupo Editorial Patria.

Di Polo, M. (2013). *Data Acquisition Systems.* New York: Springer Science.

Díaz, J. (2004). *Técnicas de Mantenimiento Industrial.* España: Calpe Institute of Technology.

Duffuaa, S. , Raouf, A. y Campbell, J. D. (2000). *Sistemas de mantenimiento: Planeación y control.* D.F, México: LIMUSA S.A.

EVTECH. (2019, agosto 18). *Monitoreo Seguro de Condiciones CM/CBM Confiabilidad* . Recuperado de https://evtech.cl/monitoreo-seguro-de-condiciones-cm-cbm-confiabilidad/

Fluke. (2022). *Transitorios y desequilibrios de tensión*. Recuperado de https://www.fluke.com/es-cr/informacion/blog/motores-sistemas-de-impulsion-bombas-compresores/desequilibrio-de-tension

Froztec. (2022). *Cómo elegir tus equipos de refrigeración industrial*. Recuperado de https://www.froztec.com/como-elegir-tus-equipos-de-refrigeracion-industrial

Hernández, R., Fernández, C. y Batista, M. (2014). *Metodología de la investigación.* Santa Fe, México: McGraw-Hill.

Hernández, E. (2021). Ingeniería CBM monitoreo basado en condición estándar ISO 17359. *EVTECH Soluciones Integrales*.

Hurtado, L. L., Villareal, E. & Villareal, L. (2017). Fault detection and diagnosis through artificial intelligence techniques, a state of art. *DYNA*, *83*(119), 19-28.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO Standard N.º 55000.* Recuperado de https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es

Jurado, J., Reveles, J. F., Plascencia, H. y Aguilera, E. (2020). Análisis de un proceso de inyección de plástico por interacción fluido estructural y cambio de estado. *Acta Universitaria*.

Kumar, P. & Pradhan, N. (2021). *Pardeep* (Youtube). Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=w91A_nEHOQw

León, M. y Muñiz, N. (2020, febrero 10). *Ventajas y desventajas del Software libre para su implementación en la escuela cubana*. Recuperado de https://www.informatica-juridica.com/trabajos/ventajas-y-desventajas-del-software-libre-para-su-implementacion-en-la-escuela-cubana/

Medaglia, C. y Mora, E. (2019). *Balance de las zonas francas: beneficio neto del régimen para Costa Rica 2014-2018.* San José, Costa Rica: PROCOMER.

Meltrán, M. y Marcilla, A. (2011). *Tecnología de Polímeros.* Universidad de Alicante, España.

MOCTECH. (2018, mayo 16). *Industria 4.0: Pronóstico de vida útil esperada (RUL) en sistemas industriales*. Recuperado de https://www.moctech.com.mx/index.php/moctech-soluciones/industria40-mantenimiento

Mon, A. & Del Giorgo, H. R. (2021). Evaluation of Information and Communication Technologies towards Industry 4.0. *Procedia Computer Science*, *180*, 639-648.

Mourtzis, D., Angelopoulos, J. & Panopoulos, N. (2021). Design and development of an IoT enabled platform for remote monitoring and predictive maintenance of industrial equipment. *Procedia Manufacturing*, *54*, 166-171.

Oberndorfer, J. C. (2016, junio 10). *Sistema de enfriamiento*. Recuperado de https://www.plastico.com/blogs/Sistema-de-enfriamiento+113360

Otero, J., Torres, R. y Magaña, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, *25*(1), 15-26.

Pacual, H., Maccorone, J. L., Albanese, A. A., Fata, O. A. y Clemente, C. D. (2017). *Cuantificación del desbalance admisible en corrientes, para redes de distribución eléctrica de baja tensión.* Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata.

Palomares, R. (2021). *La gestión del talento y la industria 4.0.* Recuperado de https://masquenomina.es/recursos-humanos-rrhh/industria-4-gestion-del-talento/

Pérez, F. A. (2021). *Conceptos generales en la gestión del Mantenimiento Industrial*. Bucaramanga, Colombia: Ediciones USTA.

Quiroga, J. (2011). Implementación de un mantenimiento basado en la condición usando modelado y simulación. *Ingeniería e Investigación*, *31*(2), 18-28.

Santoro, B., Mendoza, D. & Rincon, D. (2021). Budget-constrained economic model predictive control: A user-friendly proposal for HVAC. *Chemical Engineering Research and Design*, *176*, 229-242.

Satta, R., Cavallari, S., Pomponi, E., Grasselli, D., Picheo, D. & Annis, C. (2017). A dissimilarity-based approach to predictive maintenance with application to HVAC systems. *CGnal Research Papers Series,* 1-15

Schulze, C., Thiede, S., Thiede, B., Kurle, D. & Blume, S. (2019). Cooling tower management in manufacturing companies: A cyber-physical system approach. *Journal of Cleaner Production*, *211*, 428-441.

Siguenza, G. (2017, abril). *Prognostics y determinación de la vida útil remanente (VUR)*. Recuperado de http://www.industrialtijuana.com/pdf/NM-A-04PROGNOSTICSYVUR.pdf

Tapia, M. M. (2011). *Diseño de plan de mantenimiento predictivo para la línea de producción de estrucción. Bolsas plásticas en la empresa Kalusin Importing Company (KICO S.A.)* (tesis de grado). Univerdad Tecnológica de Bolívar, Cartagena.

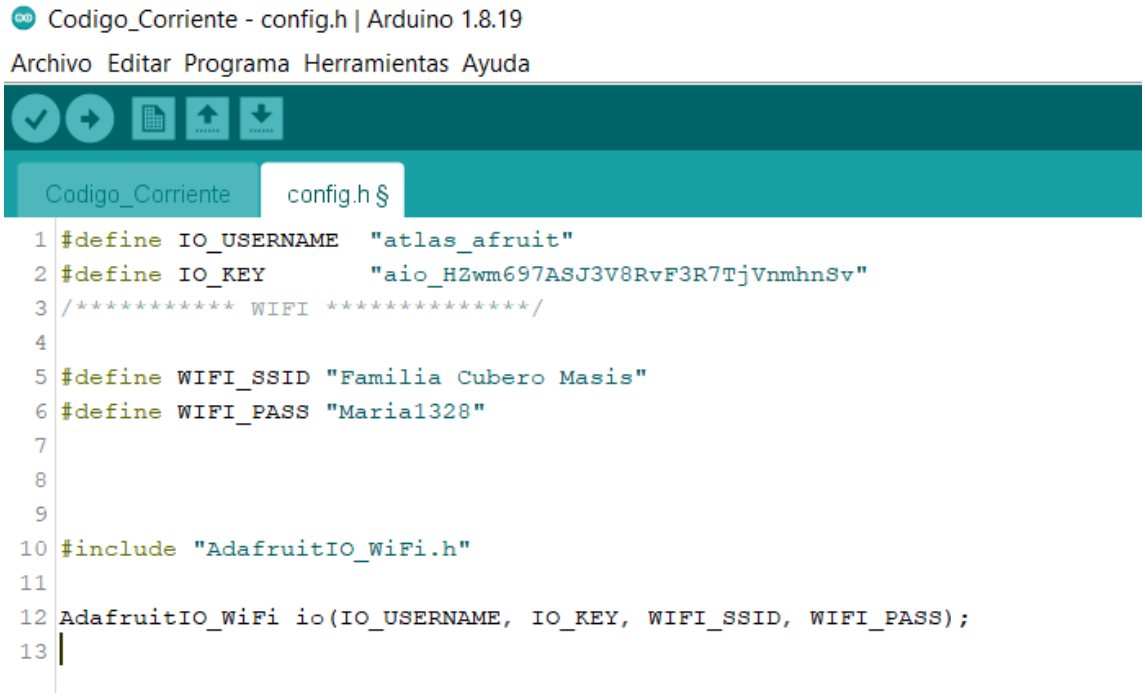
Trujillo, G. (2019). El mantenimiento en la cuarta revolución industrial. *Vanguardia Industrial*, 10-13.

Wei, X., Xu, G. & Kusiak, A. (2014). Modeling and optimization of a chiller plant. *Energy*, *73*(C), 898-907.

Xiecheng. (2021). *Industrial Chiller Series*. Jiangmen Xiecheng Machinery Co.

10. Capítulo X. Apéndice

A. Cogido fuente del microcontrolador del prototipo



Codigo_Corriente Arduino 1.8.19

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Codigo_Corriente | config.h §

```
#include "EmonLib.h"                   // Include Emon Library
EnergyMonitor emon1;                   // Create an instance
/********* Config. comunicacion ************/

#include "config.h"

/******** Example Starts Here ***********/


// include the library code:
#include <LiquidCrystal.h>

// initialize the library with the numbers of the interface pins
LiquidCrystal lcd(14, 12, 13, 15, 0, 16);

/*********Toma de datos de la corriente del sistema****/

AdafruitIO_Feed *potencia = io.feed("Potencia");
AdafruitIO_Feed *corriente = io.feed("Corriente");

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  analogReference(DEFAULT);
  while(! Serial);
  Serial.print("Conectando a Adafruit IO");
  io.connect();
  while(io.status() < AIO_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    delay(500);
  }
  Serial.println();
  Serial.println(io.statusText());

  emon1.current(A0, 111.1);             // Current: input pin, calibration.
```

Codigo_Corriente Arduino 1.8.19

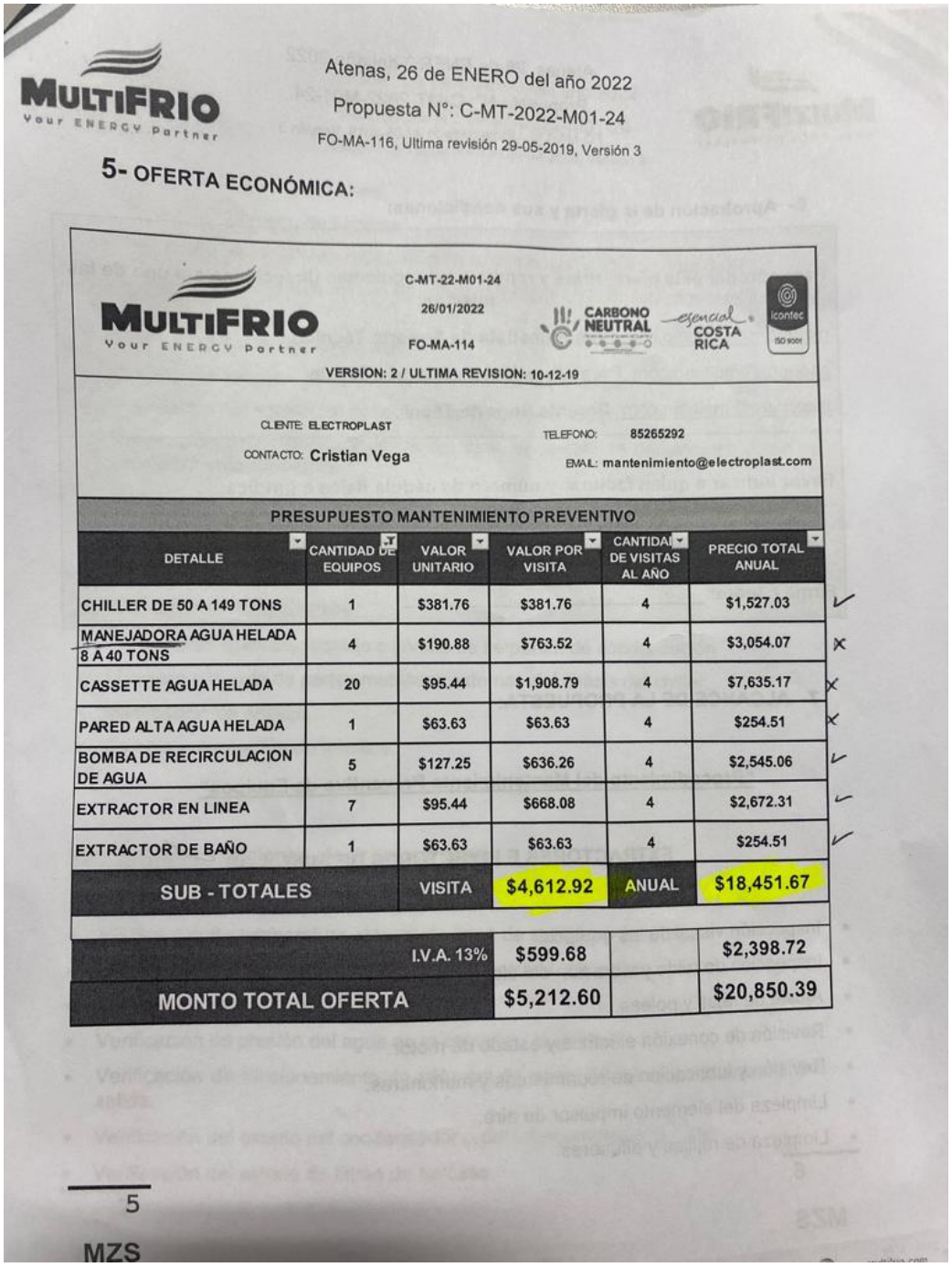
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Codigo_Corriente | config.h §

```
32    }
33    Serial.println();
34    Serial.println(io.statusText());
35
36    emon1.current(A0, 111.1);             // Current: input pin, calibration.
37
38    // set up the LCD's number of columns and rows:
39    lcd.begin(16, 2);
40    // Print a message to the LCD.
41    lcd.print("Corriente (A): ");
42  }
43
44  void loop() {
45    delay(5000);
46    io.run();
47
48    double Irms = emon1.calcIrms(1480);  // Calculate Irms only
49
50    float h = Irms*(1.1/1023.0)*150;
51    float t = h*305;
52    Serial.print(" POTENCIA: ");
53    Serial.print(t);
54    Serial.print(" CORRIENTE: ");
55    Serial.println(h);
56    potencia->save(t);
57    corriente->save(h);
58    Serial.print("NodeMCU IP Addres: ");
59    Serial.println(WiFi.localIP());
60
61    // set the cursor to column 0, line 1
62    // (note: line 1 is the second row, since counting begins with 0):
63    lcd.setCursor(0, 1);
64    // print the number of seconds since reset:
65    lcd.print(h);
66  }
```

Anexos

A. Cotización de la empresa Multifrío para el mantenimiento preventivo de los equipos



MULTIFRIO
Your ENERGY Partner

Atenas, 26 de ENERO del año 2022
Propuesta N°: C-MT-2022-M01-24
FO-MA-116, Ultima revisión 29-05-2019, Versión 3

5- OFERTA ECONÓMICA:

MULTIFRIO
Your ENERGY Partner

C-MT-22-M01-24
26/01/2022
FO-MA-114

CARBONO NEUTRAL · especial COSTA RICA · icontec ISO 9001

VERSION: 2 / ULTIMA REVISION: 10-12-19

CLIENTE: ELECTROPLAST
CONTACTO: Cristian Vega
TELEFONO: 85265292
EMAIL: mantenimiento@electroplast.com

PRESUPUESTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO

DETALLE	CANTIDAD DE EQUIPOS	VALOR UNITARIO	VALOR POR VISITA	CANTIDAD DE VISITAS AL AÑO	PRECIO TOTAL ANUAL	
CHILLER DE 50 A 149 TONS	1	$381.76	$381.76	4	$1,527.03	✓
MANEJADORA AGUA HELADA 8 A 40 TONS	4	$190.88	$763.52	4	$3,054.07	X
CASSETTE AGUA HELADA	20	$95.44	$1,908.79	4	$7,635.17	X
PARED ALTA AGUA HELADA	1	$63.63	$63.63	4	$254.51	X
BOMBA DE RECIRCULACION DE AGUA	5	$127.25	$636.26	4	$2,545.06	✓
EXTRACTOR EN LINEA	7	$95.44	$668.08	4	$2,672.31	✓
EXTRACTOR DE BAÑO	1	$63.63	$63.63	4	$254.51	✓
SUB - TOTALES		VISITA	$4,612.92	ANUAL	$18,451.67	
		I.V.A. 13%	$599.68		$2,398.72	
MONTO TOTAL OFERTA			$5,212.60		$20,850.39	

5

MZS

B. Datos de sensores y equipo a utilizar según las cotizaciones realizadas

Home › Sensors › Non-invasive AC Current Sensor SCT-013 (100A MAX)

Non-invasive AC Current Sensor SCT-013 (100A MAX)

Price: $14.95
SKU: IM120628007
Current Stock: 20
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

The SCT-013-100 is the 100A current transformer (CT) that is used in the OpenEnergyMonitor project. The size of the hole (13mm) fits around the main AC lines of the residential homes in Costa Rica.

AC Voltage Sensor Module

Price: $5.95
SKU: COM-CB1232
Current Stock: 16
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

The ZMPT101B is a single-phase Alternating Current (AC) voltage sensor module. This module includes an on-board voltage transformer which performs the function of galvanic isolation, supports up to 250 Vac input voltages and delivers through its output terminal an analog sine wave with adjustable amplitude by using the on-board potentiometer. This module could be used together with a current transformer to measure power consumption.

EARU

Sensor de presión DC5V G1/4, transmisor, transductor de presión, 1,2 MPa, 174 PSI, para aire, agua, Gas, aceite, diésel, coche, acero inoxidable

★★★★★ 5.0 20 Valoraciones 66 vendidos

CRC 4,743.85 ~~CRC 5,581.00~~ -15%

CRC 664.41 Descuento Cupones para ti Conseguir cupones

Cantidad:

1 88270 unidades disponibles

Envía a Costa Rica

Envío: CRC 4,179.11

Envío rápido de China a Costa Rica con Cainiao Standard For Special Goods

Fecha estimada de entrega:59-59días Más opciones

Comprar Añadir a la cesta 653

Protección al Comprador de 75 días
Garantía de reembolso

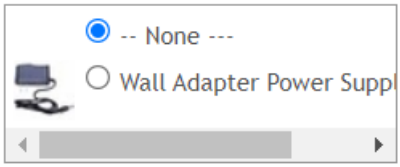
Official Arduino UNO REV 3

Price: $29.95

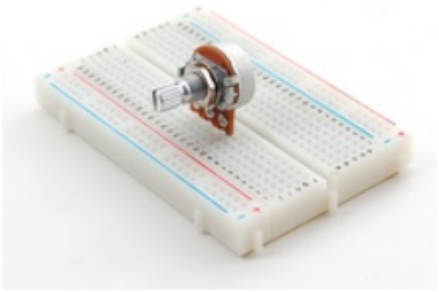
SKU: ARDUINO_UNO

Current Stock: Out of stock

Power Supply:



Breadboard compatible potentiometer



Price: $0.95
SKU: COM-CB0287-B10K
Current Stock: 70
* Potentiometer Resistance: ○ 5 kOhm ◉ 10 kOhm
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

An adjustable potentiometer can open up many interesting user interfaces. Turn the pot and the resistance changes. Connect VCC to an outer pin, GND to the other, and the center pin will have a voltage that varies from 0 to VCC depending on the rotation of the pot. Hook the center pin to an ADC on a microcontroller and get a variable input from the user!

Specifications

- Nominal resistance: 5 kOhm/10 k
- Tolerance: 20%
- Power rating: 200mW (0.2W)
- Maximum voltage: 200V

Dimensions

- Base diameter: 16.5mm
- Base depth: 8.5mm
- Shaft diameter: 6mm
- Shaft length: 16mm (with thread)
- Pitch: 5mm (through hole or solder)

16x2 LCD with i2c (Blue)

Price: $5.95
SKU: LCD-CB0079
Current Stock: 88
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

This 1602A LCD display module is a 2 line 16 character LCD module with a manual contrast control knob, backlight and i2c communication interface.

The library that works with this display can be installed directly in the Arduino IDE Library Manager: LiquidCrystal I2C by Frank de Brabander.

Using the "HelloWorld" example sketch change the definition of the LCD to: LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_address,16,2);

The screen's address might vary, for that reason it could be useful to use the I2C_scan code available in this link.

Specification:

Supply voltage: 5V
Interface: I2C
I2C address: 0x3F or 0x27
Pin definition: GND, VCC, SDA, SCL
Contrast adjust: potentiometer

1 uF Electrolytic Capacitor

Price: **$0.25**
SKU: COM-CB7895
Current Stock: 75
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

- Nominal capacitance: 1 uF
- Tolerance: ±20%
- Voltage rating: 50 V
- Type: aluminum electrolytic radial capacitor

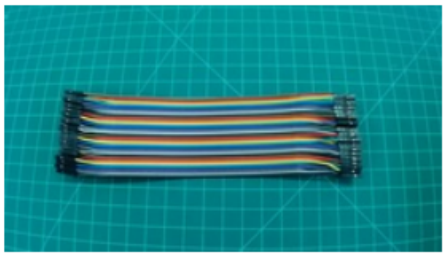
10 kOhm Resistor (10 pack)

Price:	**$0.50**
SKU:	COM-CB5141
Current Stock:	11
Quantity:	1 ADD TO CART

Product Description

- Nominal resistance: 10 kOhm
- Type: metal film resistor
- Tolerance: ±1%
- Power: 0.25 W

Cable de puente hembra a hembra (40 piezas en un grupo)



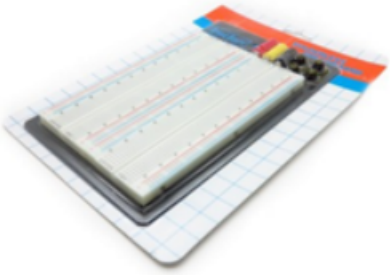
Precio: $2.49
SKU: CABINA-F2F40
Stock actual: 8
Cantidad: 1 ADD TO CART

Descripción del producto

Estos son cables de puente de 8" (20 cm) de largo terminados como hembra a hembra. Utilícelos para puentear desde cualquier cabezal macho a macho en cualquier placa. Se pueden conectar varios puentes uno al lado del otro en un cabezal de 0,1". Viene en un paquete de 40 jerséis (se muestran los colores). Cada grupo de puentes está conectado entre sí y puede separarse en cualquier cantidad (de 1 a 40, por supuesto) o mantenerse completo según sus necesidades.

¡Estos cables de puente se pueden usar para casi todo! Funcionan muy bien con placas de prueba, Arduinos y realmente cualquier placa de prototipos de paso de 0,1".

Combined Breadboard (16.6x10.8cm)



Price: $28.95
SKU: IM120530038
Current Stock: 20
Quantity: 1 ADD TO CART

Product Description

This is a standard solderless breadboard - three binding posts, 4 power buses, black aluminum plate backing. It works with a wide variety of wire gauges (29-20 AWG). With a total of 1660 tie in points, all pins are spaced by a standard 0.1".