



**TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



**Sistema experto para el monitoreo y alerta de modos de falla para el
Equipo de Aire Acondicionado de precisión ubicado en el centro de
datos de DATIC**

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

Natalia de los Ángeles Calderón Solano

Cartago, Enero 2021

Profesor guía

MAIE. Sebastián Mata Ortega

Asesor industrial

Ing. Hugo Sánchez Ortiz

Lectores y tribunal examinador

Ing. Carlos Piedra Santa María

Ing. Fernando Bonilla Lorenzo

Información de la estudiante

Nombre completo: Natalia de los Ángeles Calderón Solano

Número de cédula: 3 0490 0153

Número de carné: 2014152585

Número de teléfono: 8787 8493

Correo electrónico: nacalsol@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: Paraíso, Cartago, Costa Rica

Información del proyecto

Nombre: Sistema experto para el monitoreo y alerta de modos de falla para el Sistema de Aire Acondicionado de precisión ubicado en el DATIC

Profesor guía: MAIE. Sebastián Mata Ortega

Información de la empresa

Nombre: Tecnológico de Costa Rica

Actividad principal: Docencia, investigación y extensión de la tecnología y las ciencias conexas

Dirección: Cartago, calle 15, avenida 14, 1 Km al sur de la Basílica de los Ángeles

Teléfono: +506 2550 2346

Dedicatoria

A mis padres, por su esfuerzo, apoyo incondicional y motivación constante durante toda mi vida. Por enseñarme a no rendirme, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mi hermana, por sus consejos y apoyo incondicional.

A Esme.

Agradecimientos

A Dios, el universo y todo lo que no entiendo por permitirme terminar mi carrera profesional y haber llegado hasta aquí.

A mis padres y hermana, les agradezco todo lo que han hecho por mí, por siempre estar en los buenos y malos momentos, por motivarme y darme todo su apoyo. Por creer en mí, incluso cuando fallé. Los amo.

A mis amigos, por estar en las buenas y en las malas, por todos los momentos vividos que atesoro de gran manera.

A mis profesores del TEC, gracias por enseñarme y por el impacto que han generado durante mi carrera profesional.

Al Ing. Sebastián Mata, gracias por todo el apoyo, consejos y guía durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Hugo Sánchez, por sus consejos y ayuda durante la carrera y desarrollo de este proyecto.

Al personal de DATIC y DAM por su colaboración y ayuda brindada durante el desarrollo de este proyecto.

A Bryan Aguirre y Juan José Pineda por todos sus consejos a lo largo de mi carrera.

Índice General

1	Capítulo I. Introducción	3
1.1	Introducción.....	3
1.2	Reseña de la empresa	5
1.3	DATIC	7
1.4	Antecedentes	8
1.5	Planteamiento del problema.....	11
1.5.1	Descripción del problema	11
1.5.2	Justificación	14
1.5.3	Viabilidad.....	15
1.6	Objetivos del proyecto.....	17
1.6.1	Objetivo general.....	17
1.6.2	Objetivos específicos.....	17
1.7	Metodología	18
1.7.1	Recopilación de información.....	18
1.7.2	Determinación de los modos de falla.....	18
1.7.3	Planteo del sistema de adquisición de datos.....	19
1.7.4	Desarrollo del sistema experto	19
1.7.5	Análisis financiero.....	19
1.8	Alcances.....	20
1.9	Limitaciones	20
1.10	Estructura del informe	20
1.11	Cronograma	21
2	Capítulo II. Marco teórico	22

2.1	Mantenimiento Industrial	22
2.1.1	Mantenimiento correctivo.....	22
2.1.2	Mantenimiento preventivo.....	22
2.1.3	Mantenimiento predictivo	23
2.2	Análisis de criticidad.....	23
2.3	Confiabilidad operacional.....	24
2.3.1	Estrategias de la confiabilidad	25
2.4	Aire acondicionado.....	26
2.4.1	Componentes del aire acondicionado.....	26
2.4.2	Tipos de aire acondicionado	30
2.4.3	Aire acondicionado de precisión	30
2.5	Industria 4.0	32
2.5.1	Internet de las cosas (IoT)	33
2.5.2	Sistemas de adquisición de datos	33
2.5.3	Sistema experto.....	37
3	Capítulo III. Análisis de modos de falla	42
3.1	Características del equipo.....	42
3.2	Análisis de criticidad.....	45
3.3	Circuito de refrigeración	51
3.3.1	Compresor.....	54
3.3.2	Filtro deshidratador.....	56
3.3.3	Válvula solenoide de cierre.....	57
3.3.4	Válvula de expansión termostática	58
3.3.5	Evaporador y condensador.....	59
3.4	Circuito de potencia.....	60

3.5	Elementos mecánicos	62
4	Capítulo IV. Planteamiento del sistema de adquisición de datos	63
4.1	Descripción del sistema de adquisición de datos	65
4.1.1	NodeMCU	65
4.1.2	Sensores	68
4.1.3	Convertidor analógico-digital	75
4.2	Diseño propuesto para el sistema de adquisición de datos	76
5	Capítulo V. Desarrollo del sistema experto	77
5.1	Programación del sistema experto	79
5.1.1	Compresor	81
5.1.2	Filtro deshidratador y filtro de aire	90
5.1.3	Válvula solenoide de cierre.....	92
5.1.4	Válvula de expansión termostática	96
5.1.5	Alertas generales.....	100
5.2	Desarrollo de interfaz web.....	107
6	Análisis financiero	111
7	Conclusiones.....	115
8	Recomendaciones	116
9	Referencias bibliográficas	117
10	Apéndices.....	122
11	Anexos	142

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica.	6
Figura 2. Descripción del problema	13
Figura 3. Cronograma para seguir durante el proyecto	21
Figura 4. Estrategias de la confiabilidad operacional	25
Figura 5. Sistema de contención pasillo frío	31
Figura 6. Sistema de contención pasillo caliente	32
Figura 7. Diagrama de un sistema de adquisición de datos	34
Figura 8. Estructura de un sistema experto	39
Figura 9. Estrategia de inferencia Modus Ponens	40
Figura 10. Estrategia de inferencia Modus Tollens.....	40
Figura 11. Descripción de los dígitos.....	42
Figura 12. Circuito de refrigeración	44
Figura 13. Sensores instalados actualmente.....	64
Figura 14. Diagramas de entradas y salidas NodeMCU.....	66
Figura 15. Colocación de sensores de presión en el circuito de refrigeración.....	69
Figura 16. Colocación de sensores de temperatura en el circuito de refrigeración	71
Figura 17. Curva característica de resistencia-temperatura	72
Figura 18. Diagrama de secuencia para el almacenamiento de datos	76
Figura 19. Estructura de un sistema experto basado en reglas.....	78
Figura 20. Árbol del sistema experto	80
Figura 21. Código para leer los datos de prueba.....	80
Figura 22. Diagrama de flujo para el modo de falla de líquido en la línea de succión	82
Figura 23. Diagrama de flujo para el modo de falla Resistencia del cárter dañada	83
Figura 24. Diagrama de flujo para el modo de falla de sobrecarga del compresor	84
Figura 25. Diagrama de flujo para el modo de falla presión de condensación muy alta o baja.....	85

Figura 26. Diagrama de flujo para los modos de falla por vibraciones	86
Figura 27. Diagrama de flujo para el modo de falla presión de succión muy alta .	88
Figura 28. Diagrama de flujo para el modo de falla motor quemado	89
Figura 29. Diagrama de flujo para el modo de falla por elevado consumo de corriente del compresor.....	90
Figura 30. Diagrama de flujo para el modo de falla voltaje de la bobina incorrecto	93
Figura 31. Diagrama de flujo para el modo de falla presión diferencial muy baja .	94
Figura 32. Diagrama de flujo para el modo de falla bobina quemada	95
Figura 33. Diagrama de flujo para el modo de falla caída de presión excesiva en el evaporador	97
Figura 34. Diagrama de flujo para el modo de falla subenfriamiento insuficiente .	98
Figura 35. Diagrama de flujo para el modo de falla caída de presión menor o válvula de expansión obstruida	99
Figura 36. Diagrama de flujo para alertas del autotransformador.....	101
Figura 37. Diagrama de flujo para alerta del motor del ventilador de evaporador	102
Figura 38. Diagrama de flujo para alerta de electrodo quemado de humidificador	103
Figura 39. Diagrama de flujo para alerta de humidificador sin flujo de agua	104
Figura 40. Diagrama de flujo para alerta de motor 1 de ventilador condensador quemado	105
Figura 41. Diagrama de flujo para alerta planta de emergencia no entró en funcionamiento.....	106
Figura 42. Archivos para el desarrollo de interfaz web.....	107
Figura 43. Pantalla de inicio de la página web para el sistema experto	108
Figura 44. Pantalla 2 de página web, visualización de datos	109

Índice de tablas

Tabla 1. Partes del circuito de refrigeración.....	43
Tabla 2. Análisis de criticidad para determinar componentes a monitorear	48
Tabla 3. Verificación de recalentamiento	52
Tabla 4. Verificación de subenfriamiento	53
Tabla 5. Características del compresor	54
Tabla 6. Modos de falla del compresor	55
Tabla 7. Modos de falla del filtro deshidratador	56
Tabla 8. Modos de falla válvula solenoide de cierre	58
Tabla 9. Modos de falla de la válvula de expansión termostática	59
Tabla 10. Medición en evaporador y condensador	60
Tabla 11. Componentes seleccionados para el monitoreo del circuito de potencia	61
Tabla 12. Monitoreo líneas de alimentación principales	61
Tabla 13. Monitoreo de los elementos mecánicos	62
Tabla 14. Especificaciones del sensor de presión seleccionado.	70
Tabla 15. Especificaciones del sensor de temperatura seleccionado	72
Tabla 16. Especificaciones del sensor de flujo	74
Tabla 17. Especificaciones del sensor de vibraciones MPU6050	75
Tabla 18. Costo de los componentes del sistema de adquisición de datos	111
Tabla 19. Costos por mantenimiento	112
Tabla 20. Flujos de caja para proyección de 3 años.....	113

Resumen

El presente proyecto se realizó en el Tecnológico de Costa Rica, el cual consiste en un sistema experto enfocado en detectar modos de fallas para el equipo de aire acondicionado de precisión ubicado en el centro de datos del Departamento de Administración de Tecnologías de Información.

Para determinar los modos de falla se dividió el equipo en tres partes, circuito de refrigeración, circuito de potencia y elementos mecánicos. Para el circuito de refrigeración se realizó un análisis de criticidad para seleccionar los componentes que van a ser monitoreados con base en la afectación que tengan en la humedad y temperatura del centro de datos, el impacto que tengan sobre la integridad del equipo en caso de falla y en la capacidad de ser monitoreados. Con base en este análisis del circuito de refrigeración se propone monitorear el compresor, filtro deshidratador, válvula de expansión termostática y válvula solenoide de cierre. Del circuito de potencia se propone monitorear los motores de los ventiladores del condensador y evaporador, el autotransformador, las líneas de alimentación de los electrodos del humidificador, líneas de alimentación del compresor y resistencia del cárter. Respecto a los elementos mecánicos se propone monitorear el filtro de aire y las vibraciones en los ventiladores del condensador y evaporador.

Una vez seleccionados los componentes, se determinan sus modos de falla y de acuerdo con estos se identifican los sensores necesarios, se plantea un sistema de adquisición de datos basado en la placa NodeMCU para identificar los modos de falla de acuerdo con los parámetros de fabricante ya que no se tienen datos históricos. La implementación del proyecto tiene una inversión inicial de ₡4 147 493,59 la cual comparado con el costo del contrato actual de ₡5 350 312,08 tiene un ahorro del 22,5% en el primer año y aproximadamente un 97% cuando se cancele el contrato con Grupo Electrotécnica.

Palabras clave: aire acondicionado de precisión, modos de falla, sistema experto.



Este obra cuyo autor es Natalia Calderón Solano está bajo una [licencia de Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Abstract

This project was carried out at Tecnológico de Costa Rica, consist in an expert system focused on the failures detection for de precision air conditioning equipment located at the Information Technologies Administration Department.

To determine de failure modes, the equipment was divided into three parts, refrigeration circuit, power circuit and mechanical components. A criticality analysis was made for the refrigeration circuit to select the components to be monitored based on their impact on the humidity and temperature of the data center, the impact on the equipment integrity in case of failure and on the capacity to be monitored. Based on this analysis of the refrigeration circuit, it is proposed to monitor the compressor, filter drier, thermostatic expansion valve, and the shut-off solenoid valve. From the power circuit it is proposed to monitor the motors of the condenser and evaporator fans, the autotransformer, the supply lines of the humidifier electrodes, the compressor supply lines and the crankcase heater. Regarding the mechanical components, it is proposed to monitor the air filter and the vibrations in the condenser and evaporator fans.

Once all the components are selected, the failures modes are determined and according with this the sensors needed are identify and a data acquisition system based on the NodeMCU board. The system will help to identify the failure modes according to the manufacturer's parameters since there in no historical data.

The implementation of the project has an initial investment of ₡4 147 493,59 which compared to the cost of the current contract of ₡5 350 312,08 has a saving of 22,5% in the first year and approximately 97% when cancel the contract with Grupo Electrotécnica.

Key words: precision air conditioning, failure modes, expert system



This work whose author is Natalia Calderón Solano is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

1 Capítulo I. Introducción

1.1 Introducción

El Departamento de Administración de Tecnologías de Información y Comunicaciones (DATIC), brinda servicios de informática y da servicio técnico en esta área, en el centro de datos se encuentran los servidores que sustentan las plataformas, servicio y páginas web del Tecnológico de Costa Rica. Dicho centro de datos opera con un aire acondicionado de precisión que es brindado por una empresa externa, la cual también da el servicio de mantenimiento al equipo de aire acondicionado.

Las fallas en los sistemas electromecánicos son inevitables y es imposible reducirlas a cero. Se pueden disminuir teniendo planes de mantenimiento preventivo y prever teniendo planes de mantenimiento predictivo, a pesar de implementar estas técnicas no es posible saber cómo se encuentra el equipo todo el tiempo. Este proyecto pretende mostrar una forma de automatizar el diagnóstico y análisis de fallas mediante el desarrollo de un sistema experto. Inicialmente se debe identificar el mecanismo y las partes que componen el circuito de refrigeración, el circuito de potencia y los elementos mecánicos del sistema. El equipo de aire acondicionado de precisión marca *Liebert*, modelo *HPM*. Para establecer los modos de falla del equipo se implementó un análisis de criticidad para de esta forma identificar el posicionamiento, cantidad y tipo de sensores necesarios para realizar el monitoreo, así como los componentes electrónicos y protocolos necesarios para la comunicación y transmisión de datos de los sensores al PC.

Una vez establecidos los modos de falla se desarrolla la base del conocimiento del sistema experto mediante reglas. Al no contar con datos históricos del comportamiento del equipo, el sistema experto estará basado en rangos recomendados por el fabricante y literatura experta en este tipo de equipos. El sistema experto se desarrolla en el lenguaje de programación *Python 3*, y su interfaz se desarrolla usando *HTML*, *CSS* y *JavaScript*.

Por último, se realiza un análisis financiero contemplando el costo de los sensores, módulos de wifi, microprocesador, cableado e instalación. El sistema experto al ser desarrollado en un software gratuito no incurre en costo alguno.

1.2 Reseña de la empresa

El Tecnológico de Costa Rica es una institución de educación superior universitaria, dedicada a la docencia, la investigación y la extensión de la tecnología y las ciencias conexas para el desarrollo de Costa Rica. Fue creado mediante la Ley No. 4.777 del 10 de junio de 1971 (TEC, 2020).

Durante el gobierno del presidente de la República, José Figueres Ferrer, Daniel Oduber Quirós y el comité de apoyo y la población cartaginesa apoyaron la creación de un nuevo centro de educación superior. Los cartagineses lo escogieron por encima de dos opciones: un programa de desarrollo agropecuario y una carretera a San José (TEC, 2020).

El 10 de junio de 1971 se celebró en Cartago la firma de la Ley de Creación del Tecnológico de Costa Rica bajo la Ley No. 4.777. En sus comienzos se instaló en el Edificio Pirie, donado por la Municipalidad de Cartago, conocido hoy como la Casa de la Ciudad. Dos años después de su creación se inició con tres carreras novedosas en el país, Ingeniería en Construcción, Ingeniería en Producción Industrial e Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Posterior a esto se compraron casi 100 hectáreas de terreno, en las cuales se encuentra actualmente el Campus Central. Aquí se construyeron los primeros edificios, cuyo material prefabricado fue donado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Específicamente, el Instituto Tecnológico de Costa Rica se encuentra en la provincia de Cartago, en el distrito Oriental a 1435 msnm, cuenta con un clima tropical húmedo y en algunas zonas un clima templado, con temperaturas que van desde los 17°C a los 24°C (IMN, 2020).



Figura 1. Ubicación del Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Fuente: Google Mapas, 2020

Estructura organizativa (TEC, 2020):

- Asamblea Institucional: máxima autoridad del TEC.
- Consejo Institucional: órgano directivo superior del TEC.
- Rector: es el funcionario de más alta jerarquía ejecutiva del TEC.
 - Departamento de Administración de Tecnologías de Información y Comunicación (DATIC).
- Vicerrectorías: para cumplir con sus políticas específicas, el TEC cuenta con cuatro vicerrectorías.

1.3 DATIC

El Departamento de Administración de Tecnologías de Información y Comunicaciones (DATIC), fundado en 1977, es un departamento de apoyo a la academia que se dedica a brindar servicios de tecnologías de información y comunicación.

Brinda servicios de soporte técnico, instalación de equipos nuevos, mantenimiento de hardware y software, resolución de problemas a usuarios (correo institucional, red inalámbrica, virus, asesorías en compras, licitaciones, etc.). Además, se desenvuelve en el área de investigación y desarrollo de sistemas de información, como lo son el desarrollo de nuevos sistemas de información, apoyo y asesoría a estudiantes con proyecto de graduación de Ingeniería en Computación, desarrollo de estándares institucionales.

Administra las redes, enlaces a internet, administración de enlaces entre sedes, telefonía IP, telefonía convencional, red inalámbrica, video vigilancia, cableado estructurado, así como laboratorios institucionales los cuales comprende: LAIMI I, LAIMI C, LAIMI II, Laboratorio de la Escuela de Construcción, Laboratorio de la Escuela de Administración de Empresas y Laboratorio de la Escuela de Matemática.

Encargado de creación de cuentas electrónicas, bases de datos institucionales, respaldos, almacenamiento institucional, conexión directa con bancos e instituciones financieras, de igual forma la infraestructura de los servidores institucionales.

1.4 Antecedentes

Modelo basado en detección de fallas y diagnóstico de sistemas HVAC usando el método *Support vector machine*

Este estudio fue publicado en la revista Internacional de Refrigeración en el año 2007, realizado por Liang y Du del departamento de Automatización e Ingeniería Asistida por Computadora, en la Universidad de Hong Kong.

El artículo propone la combinación del modelo basado en la detección de fallas y el método de *Support Vector Machine* (SVM). Primero desarrollan un modelo de parámetros agrupados de una sola zona del sistema HVAC. Luego caracterizan tres principales fallas: atasco de la compuerta de recirculación de aire, serpentín de enfriamiento bloqueado y disminución de la velocidad del ventilador, las cuales son investigadas por simulación computacional. Encontraron que la temperatura del suministro de aire, la temperatura del aire mixto y la temperatura de la salida de agua son sensibles a las fallas y pueden ser seleccionadas como indicadores de fallas.

Para asegurar la precisión del sistema, el modelo se deriva basado en el balance de energía y masa. Además, el método SVM es usado para el diseño de un clasificador de fallas, el cual se basa en la teoría del aprendizaje estadístico. Para el modelo basado en detección de fallas y diagnóstico tomaron en consideración varios factores: el ruido, alteración y error del modelo, la compensación entre la sensibilidad de detección de fallas y la probabilidad de falsa alarma, la selección de las variables sensibles a las fallas, el costo de los sensores, y el número de las variables medidas, las cuales deben ser maximizadas para incrementar la sensibilidad, pero reduciendo el costo.

Modelo basado en datos, diagnóstico de fallas y la selección óptima de sensores para enfriadores de sistemas HVAC

Este artículo fue publicado en la revista *IEEE transactions on Automation Science and Engineering* en el año 2007, por Namburu, Azam, Luo, Choi y Pattipati.

El estudio se enfoca en desarrollar un esquema genérico de detección y diagnóstico de fallas y un modelo de datos nominales para enfriadores centrífugos que pueda predecir la respuesta del sistema para distintas cargas. En este trabajo se estudian tres algoritmos, *support vector machine*, análisis de los componentes principales y mínimos cuadrados parciales. Además, los autores presentan un algoritmo para seleccionar los sensores para el máximo diagnóstico y evaluar el rendimiento de los procedimientos de clasificación seleccionados con el conjunto de sensores optimizado.

Se efectuaron los experimentos de detección y diagnóstico de fallas sobre datos obtenidos de 48 variables. Los datos experimentales se obtuvieron de un enfriador bajo 27 condiciones de operación predefinidas. Los intervalos de medición de cada sensor fueron de 10 s. Estas mediciones proporcionaron 1740 patrones para cada condición de operación. Para diagnosticar las fallas los autores primero clasifican la falla con los 1740 parámetros para entrenamiento y testeo, posteriormente estiman la severidad de la falla, para esto determinaron 240 parámetros de 4 niveles de severidad, 200 parámetros fueron usados para el entrenamiento y 40 para testeo.

Un enfoque basado en disimilitud para mantenimiento predictivo con aplicación en sistemas HVAC

Este artículo fue publicado en 2017 en arXiv de la Universidad de Cornell por Satta, Cavallari, Pomponi, Grasselli, Picheo y Annis.

Inicialmente los autores hacen una revisión de la taxonomía y principales metodologías utilizadas actualmente en mantenimiento basado en condición, luego discuten que las disimilitudes mutuas de los comportamientos de todos los equipos del conjunto pueden ser explotados para detectar futuras fallas. Ellos proponen un enfoque de aprendizaje de máquina basado en el análisis de las diferencias mutuas concurrentes de las mediciones que vienen del conjunto. Evalúan el método con más de un año de datos históricos de un conjunto de 17 equipos HVAC instalados en el hospital de Italia, logrando una precisión de más de 0,96.

Mantenimiento Preventivo de Sistemas HVAC Centralizados: Uso de sensores acústicos, extracción de características y aprendizaje sin supervisión

Este artículo fue publicado en la conferencia *Proceedings of the 15th International Building Performance Simulation Association* por Srinivasan, Islam, Islam, Wang, Sookoor, Gnawali y Nirjon de la Universidad de Florida, Universidad de Carolina del Norte y Universidad de Houston en el 2017.

Los autores proponen un esquema para sistemas HVAC centralizados por monitoreo autónomo para analizar sus emisiones acústicas. El modelo propuesto tiene tres objetivos específicos: modelo acústico sin supervisión, aprendizaje de fallas con un humano cerca, sistemas de sensores ingenieriles a bajo costo.

El sistema SASEM (*Smart Audio Sensing-based HVAC Maintenance*) comprende un micrófono, un microcontrolador y un módulo de WiFi para capturar la señal de audio, procesamiento y comunicación. Primero capturaron las señales de audio con el micrófono y extrajeron características de los fotogramas de audio, luego desarrollaron agrupación no supervisada para detectar la desviación del equipo del estado ideal, si esta desviación está por encima de la alarma empíricamente aprendida, el sistema envía una alarma al administrador para verificar la falla.

1.5 Planteamiento del problema

1.5.1 Descripción del problema

Según la información recolectada respecto a la situación actual del Instituto Tecnológico de Costa Rica, específicamente del Departamento de Administración de Tecnologías de Información y Comunicaciones (DATIC), el aire acondicionado de precisión del Centro de datos cuenta con un sistema de monitoreo que da alarmas cuando algún parámetro se sale de lo establecido. Este sistema de monitoreo no brinda información sobre la falla, simplemente notifica una irregularidad en el sistema. Cuando se da algún tipo de alarma, el sistema cuenta con una visualización desde una página web, a la cual tiene acceso el encargado de la administración del sistema del aire acondicionado de precisión y las alarmas notifican a quienes estén en la configuración del sistema. En caso de que el sistema no se normalice se solicita atención a la empresa Soporte Crítico, la cual brinda el mantenimiento preventivo al equipo y a la cual el Departamento de Mantenimiento paga por servicio de mantenimiento 24 horas 7 días a la semana en caso de que exista un mal funcionamiento. En estos casos Soporte Crítico envía un técnico de mantenimiento a las instalaciones, esto implica que hay un período de tiempo en el que el sistema no se encuentra operando con los parámetros ideales para el correcto funcionamiento de los equipos, tanto los servidores y dispositivos electrónicos como los equipos del sistema de aire acondicionado de precisión.

Cuando la temperatura y/o humedad del aire acondicionado del centro de datos cambia de forma drástica o se encuentra por encima del valor especificado, aumenta el riesgo de que haya un fallo en los *racks* y los equipos, disminuyendo su vida útil. Esto afecta directamente las plataformas digitales de trabajo del TEC, como lo son el sistema de matrícula, el Tec Digital, la página web de la institución. Asimismo, la información de expedientes estudiantiles, funcionarios, activos, información de estados financieros, etc. se ve comprometida. Como consecuencia, la actividad principal del TEC, la cual es la docencia e investigación se ven interrumpidas al no poder tener un acceso confiable a las plataformas digitales, la entrega de proyectos, tareas, evaluaciones por medio del Tec Digital, entrega de

material didáctico del profesor al estudiante se ven afectados. A su vez los procesos administrativos se ralentizan al no poder obtener información necesaria para trámites y servicios dentro de la institución.

El mantenimiento preventivo que brinda la empresa Soporte Crítico es mensual, por lo que si existe una falla en algún componente del equipo de aire acondicionado, que no influya en los valores de temperatura y humedad, los cuales son variables, esta no sería detectada aunque están monitoreadas actualmente, pero si compromete el estado del equipo porque los técnicos de mantenimiento no tienen noción de dicha falla hasta el momento en que hacen la visita mensual generando consecuencias directas al equipo a largo y corto plazo.

Por ejemplo, el filtro deshidratador captura la humedad y otros contaminantes que pueda haber en el refrigerante. Para verificar esto se coloca un visor de líquido con un indicador de humedad posterior al filtro. Si la indicación en el visor es de color verde significa que no existe una cantidad peligrosa de humedad en el sistema. Si es de color amarillo significa una cantidad peligrosa de humedad en el sistema, si este indicador de humedad se pone de color amarillo pocos días después de que el técnico realiza la visita, implica que durante aproximadamente un mes el sistema contiene humedad provocando corrosión en toda la tubería de refrigerante. Con un sistema de monitoreo específico para este tipo de componentes, este tipo de fallas se prevén, aumentando la confiabilidad del equipo de aire acondicionado.

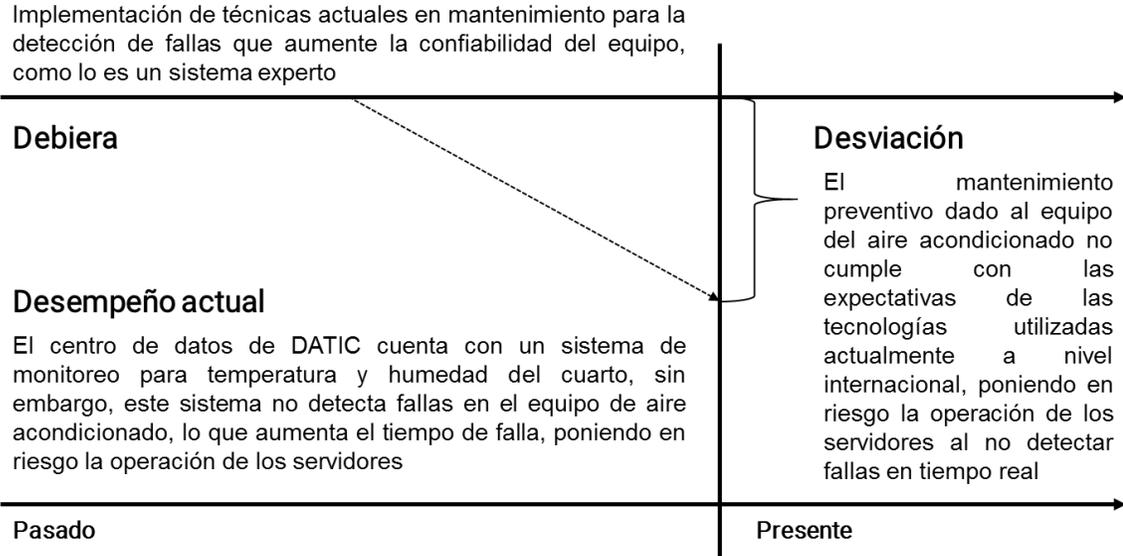


Figura 2. Descripción del problema

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

1.5.2 Justificación

La creación de sistemas capaces de determinar el modo en que está fallando un equipo y brindar soluciones, se está haciendo alrededor del mundo en industrias de manufacturas modernas. Según Badaró, Ibañez, y Agüero (2013) “un sistema experto es aquel que emplea conocimiento humano capturado en una computadora para resolver problemas que normalmente requieran de expertos humanos. Los sistemas bien diseñados imitan el proceso de razonamiento que los expertos utilizan para resolver problemas específicos.”. Lo que indica que sin importar el proceso al que se le implemente un sistema experto, este contará con la información precisa que cualquier persona especialista en el tema tendría para la resolución de problemas.

Esto trae consigo una serie de ventajas de acuerdo con López (1998) “estos beneficios, tienden a aumentar la productividad, pero al mismo tiempo imprimen flexibilidad al proceso productivo a través de una mayor fluidez del flujo de información. Muchas veces el origen de estos está en una reducción de costes, acompañada de un aumento en la operatividad del sistema, a través de una reducción en el tiempo de ejecución.” Con estos sistemas se mejora la eficiencia, se disminuye el tiempo medio de reparación ya que el técnico o ingeniero en mantenimiento sabe inmediatamente donde se encuentra la falla. Por lo que cuando llega al equipo sabe qué tipo de herramienta, repuestos y recursos necesita para solucionar el problema ya que el sistema experto brinda soluciones. Todo esto se ve reflejado en una disminución de los costos de mantenimiento y disminución en el tiempo en el que los equipos están operando fuera de los parámetros establecidos, por lo que su función no se ve comprometida.

Según Gómez, Bestatén, y Gavilanes (2018), “Se prevé que el incremento del volumen de los datos va a marcar la riqueza de los países...” siendo este el panorama, es importante iniciar con la transición a industria 4.0. El Tecnológico de Costa Rica actualmente no cuenta con este tipo de tecnología en el Departamento de Mantenimiento, este proyecto da pie a la introducción de industria 4.0 en la institución, ya que los sistemas expertos automatizan la detección y diagnóstico de

fallas, lo cual da un valor agregado al sistema de mantenimiento, esto permitiría posicionar al Tecnológico de Costa Rica, como una de las primeras instituciones públicas en utilizar herramientas inteligentes para la gestión de mantenimiento industrial.

1.5.3 Viabilidad

Se desglosa la viabilidad del proyecto con base a la disponibilidad de los siguientes recursos.

1.5.3.1 Disponibilidad tecnológica

La disponibilidad tecnológica es el principal recurso para el desarrollo de este proyecto, dado a la naturaleza de este. El sistema de adquisición de datos para el alcance de este proyecto se dejará planteado. Sin embargo, se debe tomar en cuenta la disponibilidad de los sensores requeridos y el microprocesador, ya sea dentro del país o su disponibilidad en el extranjero. Para la programación del sistema experto se usará el lenguaje *Python 3* y para el desarrollo de la interfaz los lenguajes *HTML*, *CSS* y *JavaScript*, los cuales son lenguajes de acceso libre. En el momento de instalar la herramienta se debe instalar en una PC, de la cual ya se tiene la disponibilidad dentro del centro de datos.

1.5.3.2 Disponibilidad de recursos financieros

La implementación de este proyecto será en el futuro, por lo que el presupuesto para desarrollar el proyecto no es necesario. En caso de que se requiera algún tipo de hardware este será simulado, al igual que los datos para alimentar el sistema serán establecidos con base en literatura y rangos de operación comunes para este tipo de aplicaciones.

1.5.3.3 Disponibilidad de recursos humanos

Se cuenta con el asesoramiento de ingenieros del TEC, quienes han trabajado en proyectos similares a este o con equipos de aire acondicionado, por lo que conocen del comportamiento y pueden ayudar a identificar modos de falla y parámetros normales de operación. Además, se cuenta con el contacto de la empresa que realizó la instalación del equipo y la persona que asesoró la compra,

ellos han brindado información valiosa sobre el equipo, en temas del mantenimiento que se le hace, así como datos técnicos. De igual forma, el Departamento de Administración de Mantenimiento del TEC, cuenta con los reportes del mantenimiento del equipo.

1.5.3.4 Disponibilidad de materiales

Los materiales para el desarrollo de este proyecto son principalmente una PC y el acceso a la información, el TEC cuenta con bases de datos de revistas científicas, libros y normas a las que se puede acceder, de igual forma se pueden revisar fuentes externas, nacionales e internacionales.

1.6 Objetivos del proyecto

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema experto para el monitoreo y alerta de modos de falla para el equipo de aire acondicionado de precisión ubicado en el DATIC mediante compilación de conocimiento y programación.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Establecer los modos de falla del aire acondicionado de precisión ubicado en el DATIC, para la definición de las reglas de la base del conocimiento del sistema experto de acuerdo con los parámetros requeridos por los equipos dentro de la instalación, por medio de un análisis de criticidad del equipo.
2. Plantear el sistema de adquisición de datos para el monitoreo de las variables necesarias desde un punto de vista de mantenimiento industrial, mediante sensores y la placa de desarrollo NodeMCU por medio de comunicación WiFi y MQTT.
3. Programar el sistema experto en el lenguaje de programación Python, verificando la eficacia del sistema experto mediante pruebas de casos y testeo iterativo.
4. Determinar la viabilidad financiera y el retorno de inversión con base en costos de implementación del sistema de adquisición de datos.

1.7 Metodología

El proyecto se lleva a cabo en las siguientes etapas.

1.7.1 Recopilación de información

Para iniciar el proyecto, como primer paso se debe recopilar toda la información referente al equipo de aire acondicionado marca Liebert, modelo HPM, como la lista de componentes y el manual de usuario, esto es importante porque se debe tener una noción muy clara de cómo es el equipo para conocer detalladamente los componentes y asegurar que el sistema de adquisición de datos es el correcto a fin de incrementar la precisión del sistema experto a la hora de identificar las fallas. Para esto se debe realizar al menos una visita al centro de datos de DATIC y poner en contacto con la empresa que da el mantenimiento preventivo, en este caso Soporte Crítico.

Asimismo, se debe solicitar al Departamento de Mantenimiento los reportes de los mantenimientos efectuados desde el 2018 aproximadamente, para identificar tendencias en el comportamiento del aire con las variables medibles actualmente. Es importante información acerca de variables de diseño, como lo son presión de descarga y succión, temperatura de subenfriamiento y recalentamiento, esta información puede ser brindada por el asesor de compra o fabricante, en caso de no conseguirse, el valor de estas variables será con base en otras aplicaciones similares.

1.7.2 Determinación de los modos de falla

Una vez obtenida la información anterior, se hace la identificación del circuito de refrigeración, circuito de potencia y elementos mecánicos del equipo, con la lista de partes se buscan los fabricantes, marcas y modelos de los componentes del circuito de refrigeración, esto con el fin de identificar el mantenimiento posible de cada componente.

Se busca información acerca de las fallas comunes de los aires acondicionados y se hace un análisis de criticidad de los componentes del equipo, con esto se establece los componentes a los cuales se les determina sus modos de falla

independiente. Posteriormente se hace un análisis de la interrelación de las fallas entre componentes.

1.7.3 Planteo del sistema de adquisición de datos

Conforme se hace el análisis de modos de falla, se identifican las variables que se deben medir en cada componente para determinar dicha falla y los sensores necesarios para hacer la medición. Se hace el conteo de todos los sensores y el tipo que se requiere, con base en esta información se selecciona el método de adquisición de datos.

1.7.4 Desarrollo del sistema experto

Para iniciar con el desarrollo del sistema experto se deben identificar y configurar los rangos dentro de los que se considera un comportamiento normal de todas las variables a monitorear para determinar los modos de falla. Se selecciona el lenguaje de programación. En esta etapa también se debe programar y diseñar la interfaz del usuario final.

1.7.5 Análisis financiero

Seleccionados los sensores y los componentes necesarios para el sistema de adquisición de datos y terminado el sistema experto se realiza el análisis financiero tomando en cuenta el costo de implementación, el costo de los sensores y demás componentes y el costo mensual del contrato de mantenimiento preventivo adquirido con Soporte Técnico.

1.8 Alcances

Con este trabajo se pretende brindar al DATIC y al Departamento de Mantenimiento una herramienta útil que permita mejorar la eficiencia y eficacia del mantenimiento industrial, mediante una tecnología que aún se está desarrollando en el país, dando un valor agregado a los sistemas y administración del mantenimiento dentro de la institución. El proyecto será una propuesta para implementarse en el futuro.

1.9 Limitaciones

La principal limitante del proyecto es la falta de presupuesto, el proyecto quedará planteado, de igual forma algunos de los procesos de adquisición de datos deben ser simulados debido a que no se cuenta con el hardware, a pesar de que la simulación es confiable, no se alcanza toda la capacidad que se tendría con el hardware, además hay componentes que no pueden ser simulados por lo que la mayoría del sistema de adquisición de datos se debe dejar planteado.

Otra limitante importante, es la situación actual a nivel mundial debido a la pandemia por Covid-19 la poca fluidez en la comunicación con los distintos departamentos para solicitar la información, así como la dificultad y el riesgo de realizar las visitas al centro de datos, necesario para hacer mediciones y observación del equipo.

1.10 Estructura del informe

El informe está estructurado de la siguiente forma:

- En el capítulo II, se encuentra el marco teórico que sustenta el desarrollo de este proyecto.
- En el capítulo III, se muestra el análisis realizado para determinar los componentes del equipo de aire acondicionado a monitorear y los modos de falla de estos.
- En el capítulo IV, se plantea el sistema de adquisición de datos, en este se muestran los sensores a utilizar y demás componentes electrónicos.

- En el capítulo V, se muestra el desarrollo del sistema experto. Se explica la lógica y los parámetros utilizados para cada modo de falla de cada componente. Además, se muestra el desarrollo de la interfaz web.

1.11 Cronograma

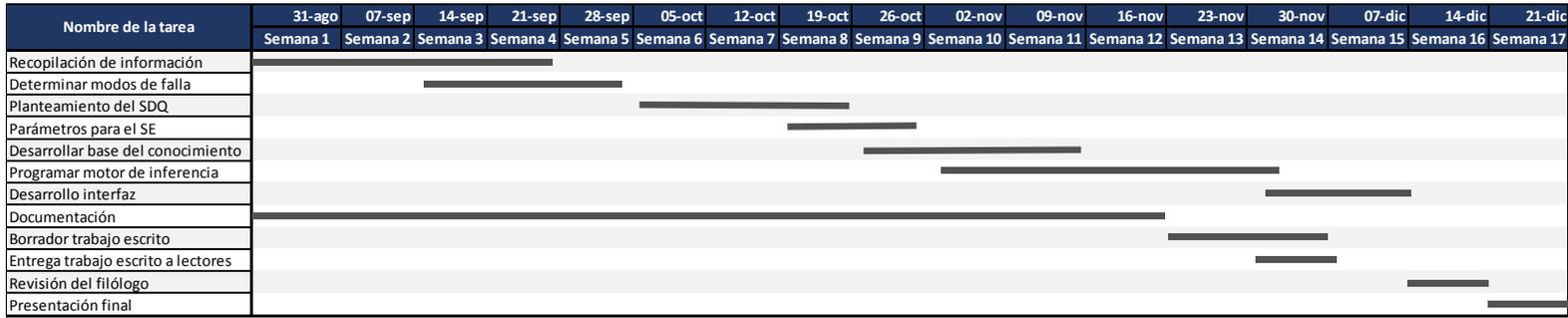


Figura 3. Cronograma para seguir durante el proyecto

Fuente: Elaboración propia (Excel)

2 Capítulo II. Marco teórico

2.1 Mantenimiento Industrial

De acuerdo con García (2010), “se define mantenimiento como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipo e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible y con el máximo rendimiento”.

Tipos de mantenimiento:

- Correctivo
- Preventivo
- Predictivo

2.1.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es todas aquellas actividades realizadas para corregir las causas de las fallas en los equipos, máquinas, instalaciones o edificios, cuando por la consecuencia de la falla han dejado de dar la calidad del servicio para la cual fueron diseñados (García, 2011).

La actividad principal del mantenimiento correctivo es la reparación de una falla imprevista, por lo que se dan paros no programados en planta, esto se traduce en una pérdida de dinero.

2.1.2 Mantenimiento preventivo

Es la intervención del sistema o equipo, antes de presentarse la falla, es el conjunto de actividades programadas a equipos en funcionamiento que permiten en la forma más económica, continuar su operación eficiente y segura, con tendencia a prevenir las fallas y paros imprevistos (García, 2011).

De acuerdo con García (2011), el mantenimiento preventivo incluye dos actividades principales:

- Inspección periódica de los equipos en la industria, para descubrir las condiciones que conducen a paros imprevistos
- Conservación de la planta para anular dichos aspectos, adaptarlos o repararlos cuando se encuentren aún en etapa incipiente

2.1.3 Mantenimiento predictivo

La definición consensuada de lo que es mantenimiento predictivo es el monitoreo regular de las condiciones mecánicas actuales, operacionales, eficiencia y otros indicadores de las condiciones de operación de las máquinas y sistemas de procesos que proveen los datos requeridos para asegurar el máximo intervalo entre reparos y minimizar el número y costo de paros no programados generados por fallas. (Mobley, 2002).

La adición de un programa de mantenimiento predictivo suministra datos reales de la condición mecánica actual y la eficiencia de operación de cada máquina y sistema de proceso, estos datos proporcionan al administrador o ingeniero de mantenimiento datos actuales de las actividades de mantenimiento. Un programa de mantenimiento predictivo permite detectar problemas en máquinas antes de que se agraven evitando reparaciones mayores. (Mobley, 2002).

Técnicas no destructivas son usualmente empleadas en mantenimiento predictivo, las cinco más comunes son: monitoreo de vibraciones, parámetros de procesos, termografía, tribología e inspección visual. (Mobley, 2002).

2.2 Análisis de criticidad

Según García (2010), no todos los equipos tienen la misma importancia en una planta industrial, al tener los recursos limitados, la mayoría de estos deben ser destinados a los equipos más importantes.

Para diferenciar cuáles equipos son los más relevantes o influyentes en los resultados de la planta, García propone primero hacer una distinción de los niveles de importancia o criticidad:

- Equipos críticos: aquellos que una falla total o parcial afecta en gran medida los resultados de la planta.
- Equipos importantes: aquellos que una falla total o parcial afecta los resultados, pero son asumibles.
- Equipos prescindibles: afectan escasamente los resultados.

García indica que antes de colocar un equipo en los niveles anteriores se debe tomar en cuenta la influencia que tendría una falla en los siguientes aspectos:

- Producción
- Calidad
- Mantenimiento
- Seguridad y medio ambiente

2.3 Confiabilidad operacional

Según indica Amendola (2016), la confiabilidad operacional es la capacidad de una instalación para cumplir su función dentro de los límites de diseño y bajo un contexto operacional específico, involucra una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorpora avanzadas herramientas de diagnóstico, estrategias modernas y metodologías de análisis, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. Para optimizar la confiabilidad es importante analizar los siguientes parámetros:

- Confiabilidad humana: es definida como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz de las personas dentro de un contexto organizacional (García, 2011).
- Confiabilidad del activo: si la frecuencia de fallas es baja la confiabilidad del equipo es aceptable, si la frecuencia de fallas es muy alta el equipo es poco confiable. A pesar de que los equipos sean bien diseñados,

correctamente instalados y probados, y tengan un mantenimiento apropiado algunas veces fallan.

- Confiabilidad del proceso: analiza las partes del sistema, sus etapas de implantación y los requisitos que se deben cumplir para asegurar el éxito del proceso. (García, 2011).
- Confiabilidad del diseño: esta se asocia directamente con la mantenibilidad de los equipos, la cual se define como la probabilidad de que un equipo falle y vuelva a su estado de funcionamiento normal. (García, 2011)

2.3.1 Estrategias de la confiabilidad

Según García (2011), existen diferentes estrategias con las que la confiabilidad operacional pretende mejorar actividades de mantenimiento, las cuatro principales se muestran en la figura 4.



Figura 4. Estrategias de la confiabilidad operacional

Fuente: García, 2011. Gestión moderna del Mantenimiento.

2.3.1.1 Falla funcional

Se define una falla funcional como un fallo que impide al equipo cumplir con su función según un parámetro de funcionamiento. Para determinar un fallo funcional se define la función que cumple y definir el fallo como la anti-función (García, 2010).

2.3.1.2 Modos de falla

Se define un modo de falla como las circunstancias que acompañan un fallo concreto. Cada falla funcional puede presentar múltiples modos de fallas (García, 2010).

2.4 Aire acondicionado

Pita (2002) define el aire acondicionado como el proceso de tratamiento del aire en un ambiente interior con el fin de establecer y mantener los estándares requeridos de temperatura, humedad, limpieza y movimiento.

Cada característica del aire se puede controlar según las condiciones deseadas, Pita (2002) establece los siguiente:

- Temperatura: se controla enfriándolo o calentándolo.
- Humedad: es el contenido de vapor de agua en el aire, se controla agregando o eliminando vapor de agua.
- Limpieza: se controla mediante filtración, con lo cual se eliminan contaminantes indeseables por medio de filtros o mediante ventilación, de forma que se diluye la concentración de contaminantes.
- Movimiento: se refiere a su velocidad y a los lugares donde se distribuye. Se controla mediante equipos para la correcta distribución de este.

2.4.1 Componentes del aire acondicionado

Según Wang (2001), los componentes de los sistemas de aires acondicionados son los siguientes:

Ventilador

El principal movilizador de aire en un sistema de aire acondicionado o de ventilación. Este mueve el aire y mantiene un flujo de aire continuo, de forma que el aire acondicionado pueda ser transportado de una locación a otra a través de los ductos.

Los ventiladores son movidos por un motor, puede ser directamente o por medio de cadenas y poleas, incluso ventiladores industriales en plantas de energía son movidos por vapor o turbinas de gas. Ventiladores centrífugos y axiales son los más usados para estos sistemas.

Filtros de aire

Hay diferentes mecanismos para la remoción o recolección de partículas de polvo:

- Impactación inercial: un cambio de dirección repentino causa colisiones entre las partículas de polvo y un medio fibroso.
- Colado: si los espacios de los filtros son más pequeños que el tamaño de las partículas de polvo, estas quedan atrapadas.
- Difusión: para partículas muy finas de polvo, el movimiento browniano (movimiento al azar de las partículas) causa que las partículas se depositen.
- Intercepción: las partículas de polvo pueden seguir la corriente de aire, entrar en contacto con el medio fibroso y permanecer ahí.
- Efectos electroestáticos: las partículas y los filtros son cargados para recolectar el polvo en la corriente de aire.

Wang (2001), clasifica los filtros según su eficiencia en baja, media, alta y super alta, estos son usados dependiendo de la aplicación que se le dé al aire acondicionado.

Los filtros de baja eficiencia son usados principalmente para remover partículas de polvo con un tamaño entre $3\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$ como esporas, cemento y otras

partículas sólidas. Son usados comúnmente en unidades empaquetadas y unidades de tratamiento de aire en edificios comerciales e institucionales, en lugares de trabajo industriales, y en residenciales más demandantes.

Los filtros de aire de eficiencia media son usados para remover partículas de polvo con un tamaño entre 1 μm y 3 μm como humos de soldadura, algunas bacterias y polvo de carbón. Usados principalmente en aplicaciones comerciales más demandantes e industriales.

Los filtros de alta eficiencia son usados para remover partículas con un tamaño entre 0,3 μm y 1 μm como bacterias, virus, humos de aceite de cocina, humo de tabaco, entre otros. Comúnmente usados en sistemas de aire para hospitales, edificios comerciales de alta demanda y talleres de manufactura de precisión.

Los filtros de super alta eficiencia incluyen filtros de alta eficiencia de partículas de aire, de ultra baja penetración, y adsorbentes de gases y químicos. Son usados principalmente en cuartos limpios, espacios limpios para la industria de la microelectrónica, industria farmacéutica, manufactura de precisión y en cuartos de operación en hospitales.

Existen otros tipos de dispositivos para limpiar el aire, como los limpiadores electrónicos de aire y los adsorbentes de carbón activado, usados en aplicaciones muy específicas.

Humidificadores y deshumidificadores

Para controlar la humedad se utilizan humidificadores y deshumidificadores, estos agregan o eliminan la humedad en el aire. La humedad puede ser agregada por tres mecanismos diferentes, inyectar vapor directamente en el aire o agregar calor y agua evaporada de la fuente de agua al espacio acondicionado, otra forma de hacerlo es atomizando agua líquida, de esta forma el agua se evapora y se agrega al aire, de igual forma se puede agregar humedad forzando al aire a fluir sobre un elemento húmedo, de manera que mientras el agua se evapora es agregada al aire como vapor.

Evaporadores

Según Pita (2002), se pueden clasificar en dos tipos, evaporadores de expansión seca o directa y evaporadores inundados.

En los evaporadores de expansión directa el refrigerante pasa a través de la tubería y no hay almacenamiento de refrigerante líquido en el evaporador, por el contrario, los evaporadores inundados mantienen un nivel de líquido refrigerante.

Compresores

Pueden ser de dos tipos, desplazamiento positivo o centrífugos, los primeros trabajan reduciendo el volumen de un gas en el espacio confinado y con ello aumentan su temperatura, los compresores reciprocantes, rotatorios y de tornillo son de desplazamiento positivo. Los compresores centrífugos trabajan aumentando la energía cinética del gas, por lo que al salir del compresor hay un aumento de presión al disminuir la velocidad.

Condensadores

De acuerdo con Pita (2002), el condensador elimina del sistema la energía ganada en el evaporador y el compresor. El aire atmosférico o agua son los dos sumideros de calor más convenientes para desecharlo.

Existen de tres tipos, el condensador enfriado por aire, condensadores enfriados por agua y condensares evaporativos.

Dispositivos para control de flujo

Según Pita (2002), el dispositivo que provoca la caída de presión del refrigerante regula también el flujo de este de acuerdo con la carga, algunos de los dispositivos utilizados son el tubo capilar, la válvula termostática de expansión y la válvula de flotador en lado de baja.

2.4.2 Tipos de aire acondicionado

Según Carrier (1999) existen cuatro tipos para acondicionar un espacio:

- Sistemas de expansión directa
- Sistemas todo agua
- Sistemas todo aire
- Sistemas mixto aire-agua

2.4.3 Aire acondicionado de precisión

El aire acondicionado de precisión es utilizado en aplicaciones con requerimientos de operación muy específicas, como laboratorios, cuartos limpios, quirófanos o centros de datos. Estas instalaciones pueden tener requerimientos como enfriamiento constante todo el año 24 horas al día, cubrir necesidades de equipos electrónicos (calor sensible), control de temperatura y humedad precisos, mejor calidad del aire, mayor capacidad de enfriamiento por metro cúbico, sistema de control preciso que incorpore sistema de alarmas, además se requiere rotación de equipos para que haya redundancia (operan bajo la modalidad N+1). Los equipos de precisión dedican de un 80% a 100% de su capacidad a enfriamiento y la capacidad restante a remover humedad, esto los distingue de los equipos para confort, ya que en su mayoría la carga térmica es calor sensible.

Según ASHRAE (2015), los equipos de centros de datos son en su mayoría servidores, equipos de comunicación y dispositivos de almacenamiento de datos, cualquiera que sea el mecanismo de enfriamiento, todos se enfocan en el control de temperatura, humedad, calidad de aire y flujo de enfriamiento, ya sea por aire o líquido.

2.4.3.1 Distribución de aire

De acuerdo con ASHRAE (2015), la distribución de aire se puede lograr mediante las siguientes formas:

Suministro de aire por debajo del suelo

El espacio debajo del piso elevado crea un “plenum” de gran tamaño que si está configurado correctamente puede suministrar aire con una presión relativamente constante a lo largo de toda el área. Se debe tomar en cuenta que los pisos elevados también son muy utilizados para pasar los cables de energía, esto implica interrupciones al flujo de aire que deben ser mitigados.

Suministro de aire por encima

Este tipo de suministro requiere de ductos lo suficientemente largos para el volumen de aire necesario para enfriar el equipo en cada pasillo, a velocidad y presión que permita ser ajustado y balanceado fácilmente.

Pasillo frío

En un sistema de contención de pasillo frío (CAC) se sellan los pasillos fríos de forma que el resto del espacio se convierte en una cámara de retorno caliente.

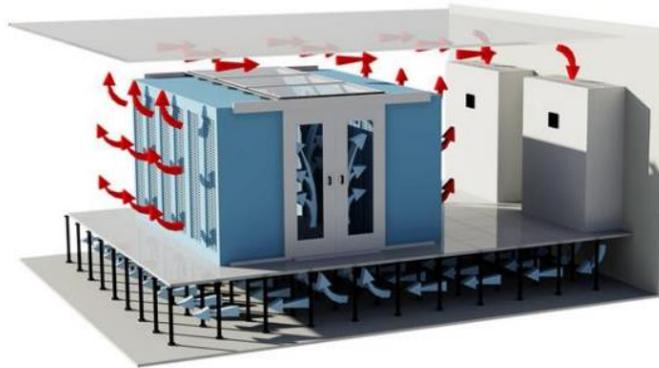


Figura 5. Sistema de contención pasillo frío

Fuente: Clima Control

Pasillo caliente

En el sistema de contención de pasillo caliente (HAC), se cierra el pasillo caliente para contener el aire caliente proveniente de los equipos y el resto del espacio se convierte en una cámara de retorno de aire frío.

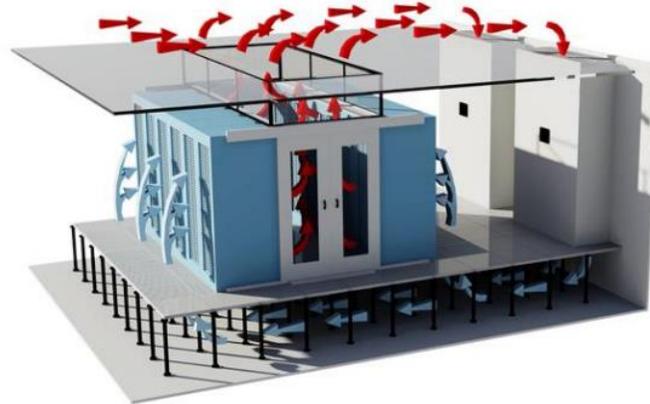


Figura 6. Sistema de contención pasillo caliente

Fuente: Clima Control

La mayoría de los equipos toma el aire frío por la parte frontal y expulsa el aire caliente por la parte posterior, por lo que los equipos son acomodados cara a cara y espalda con espalda, de esta forma se evita la mezcla de aire caliente con aire frío.

2.5 Industria 4.0

Este concepto se refiere a la cuarta revolución industrial, según Rozo (2020):

“La cuarta revolución industrial fusiona los sistemas físicos, los sistemas digitales y los sistemas biológicos, para generar una red de producción inteligente donde los distintos componentes interaccionan y colaboran entre sí, lo cual modifica trascendentalmente la forma en que vemos y nos interrelacionamos con el mundo.”

También conocida como la era de la digitalización, es posible gracias al crecimiento exponencial de las Tecnologías de la Información y Comunicación (ICT, por sus siglas en inglés).

Las áreas de conocimiento sobre las que se sustenta la Industria 4.0 de acuerdo con Rozo (2020) son Internet de las cosas (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS), ciberseguridad, cloud computing, cadena de bloques e inteligencia artificial.

2.5.1 Internet de las cosas (IoT)

Iacob y Parpala (2017), describen el internet de las cosas como la conectividad inteligente de dispositivos mediante la cual los objetos pueden sentirse y comunicarse entre ellos, cambiando la forma en cómo y quién son tomadas las decisiones en el mundo físico. Actualmente esta tecnología ya está siendo implementada en fábricas modernas, recolectando datos de diferentes equipos de producción y usando plataformas de IoT es el principal paso para crear sistemas de mantenimiento predictivo basados en la nube.

2.5.2 Sistemas de adquisición de datos

De acuerdo con Di Paolo (2013), un sistema de adquisición de datos es la señales de muestreo que miden las condiciones del mundo real, convirtiendo los resultados a valores digitales que pueden ser manejados por procesadores.

Un sistema de adquisición de datos está compuesto por:

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

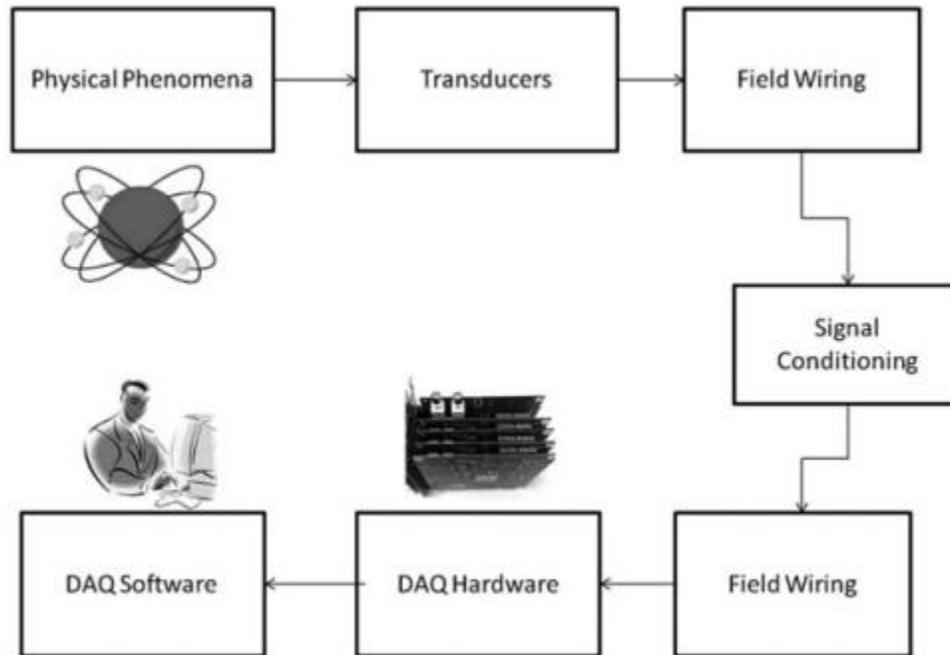


Figura 7. Diagrama de un sistema de adquisición de datos

Fuente: Di Paolo (2013), Data Acquisition Systems.

2.5.2.1 Sensores y transductores

Un sensor es un dispositivo cuya salida puede ser cuantificada y cambia respecto al fenómeno físico que esté midiendo, mientras que un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. La medición de las variables físicas asociadas al resultado de una forma de energía permite la estimación de la variable física asociada con la energía de salida (Mamishhev et al, 2004).

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura más comunes son los resistivos tales como termocuplas, termistores y sensores ICs. La selección del tipo de sensor depende de la aplicación, rango de temperatura, linealidad, precisión, costo y características (Di Paolo, 2013).

Sensores de presión

Para la conversión de medición de presión a una señal eléctrica se utilizan galgas extensiométricas, el estiramiento de estas galgas conlleva una variación de la resistencia posibilitando la medida de presión. Estos instrumentos son muy utilizados para la medición de magnitudes mecánicas tales como torque, fuerza o presión (Ashby, 2006).

Sensores de flujo

Existen diferentes mecanismos para medir flujo o caudal de un fluido, uno de ellos es el efecto Hall, el cual detecta el campo magnético de las paletas, emitiendo pulsos eléctricos para ser leído por un microcontrolador.

Sensores de vibración

Existen diferentes tipos de sensores de vibración, basados en diferentes tecnologías como sensores de desplazamiento relativo con o sin contacto, de velocidad o velocímetros y acelerómetros piezoeléctricos, lineales o radiales (Rangel et al, 2007).

2.5.2.2 Acondicionador de señal

En un sistema de adquisición de datos, el acondicionador de señal es la preparación que se le da a la señal de salida de los transductores para posteriormente ser digitalizadas.

De acuerdo con Ashlock y Warren (2015), los siguientes son los tipos comunes de acondicionamiento de señales:

Amplificación

Los amplificadores aumentan el nivel de tensión que entrega la salida del transductor para mejorar la adaptación al rango del convertidor analógico digital. Se recomienda colocarlos cerca de la fuente de la señal, con el fin de aumentar el nivel de tensión antes de que se vea afectada por el ruido.

Atenuación

La señal debe ser atenuada cuando los rangos de tensión de salida del transductor que se va a digitalizar están fuera del rango del convertidor, es lo contrario a un amplificador, ya que se disminuye la amplitud de la señal de entrada. La atenuación se da normalmente cuando la tensión es mayor a 10 V.

Filtrado

Los filtros rechazan las frecuencias no deseadas, por ejemplo, los filtros paso bajo son muy comunes para bloquear el ruido de las instalaciones eléctricas procedentes de los 50 y 60 Hz.

Aislamiento

El aislamiento es una medida de protección al sistema, se aplica a señales que están muy lejos del rango del convertidor y que pueden dañar el sistema de medida y operador.

Excitación

Muchos transductores requieren de una excitación, como las galgas extensiométricas, acelerómetros, termistores, etc.

Linealización

Se necesita linealizar cuando los sensores producen señales de tensión que no están linealmente relacionadas a la variable física medida. Consiste en el proceso de interpretar la señal de salida del sensor, puede ser por medio de acondicionamiento de la señal o por medio de software.

Multiplexación

La multiplexación es una técnica utilizada para recibir datos provenientes de distintas fuentes dirigidas a un solo digitalizador, con esto se logra menor costo ya que se puede ampliar el número de señales en un solo sistema.

2.5.2.3 Hardware del sistema de adquisición de datos

Según Di Paolo (2013), el hardware del sistema de adquisición de datos es el conjunto de componentes electrónicos que ejecutan cualquiera de las siguientes funciones:

- La entrada: procesamiento y conversión digital usando ADC, los datos son transferidos, almacenados y analizados en el PC.
- El procesamiento: conversión de digital a analógica usando DAC, las señales analógicas son usadas para controlar sistemas o procesos.
- Entradas de señales digitales.
- Salida de señales digitales para control.

2.5.2.4 Software del sistema de adquisición de datos

De acuerdo con Di Paolo (2013), el software de adquisición de datos es el principal componente, es necesario para que el hardware interactúe de manera correcta con el PC, este puede ser desarrollador en una gran variedad de lenguajes, de igual forma existen paquetes de sistemas de adquisición de datos por fabricantes como National Instruments.

2.5.3 Sistema experto

De acuerdo con García (2011), un sistema experto es un “sistema computarizado de reglas, que incluyen conocimientos importantes en un tema específico, y que está capacitado para combinar elementos de ese conocimiento que le permiten deducir conclusiones por métodos que simulan el razonamiento humano”.

Según Badaró et al (2013) “un sistema experto posee una estructura, subsistemas de adquisición de conocimiento, base de conocimiento, base de hechos, motor de inferencia y subsistema de justificación”.

Estructura

De acuerdo con los mismos autores, los sistemas expertos están compuestos por dos partes principales, el ambiente de desarrollo y el ambiente de consulta, el

primero es utilizado por el constructor para crear los componentes e introducir conocimientos a la base de conocimiento y el segundo es utilizado por los no expertos para obtener consejos.

Subsistema de adquisición de datos

Transferencia de conocimiento de un experto a un programa de computadora para construir o expandir la base del conocimiento. Se requiere de uno o más ingenieros con conocimiento en la aplicación del sistema experto.

Base de conocimiento

Aquí se encuentra todo el conocimiento necesario para comprender, formular y resolver problemas. Incluye dos elementos básicos, heurística especial y reglas que dirigen el uso del conocimiento para resolver problemas de la aplicación específica.

Base de hechos

Memoria de trabajo que contiene los hechos sobre un problema, alberga datos de los problemas que se quieren tratar.

Motor de inferencia

De acuerdo con García (2011), “el motor de inferencia es el responsable de las conclusiones o concatenamientos lógicos de elementos de conocimiento. Es un programa de computadora que provee metodologías para razonamiento de información en la base de conocimiento”. Según Turban (1995), tiene tres elementos principales:

- Intérprete: ejecuta la agenda seleccionada.
- Programador: mantiene el control sobre la agenda.
- Control de consistencia: intenta mantener una representación consistente de las soluciones encontradas.

Subsistema de justificación

Explica el comportamiento del sistema experto al encontrar una solución. El usuario no experto puede hacer preguntas al sistema para poder entender las líneas de razonamiento que siguió el sistema experto.

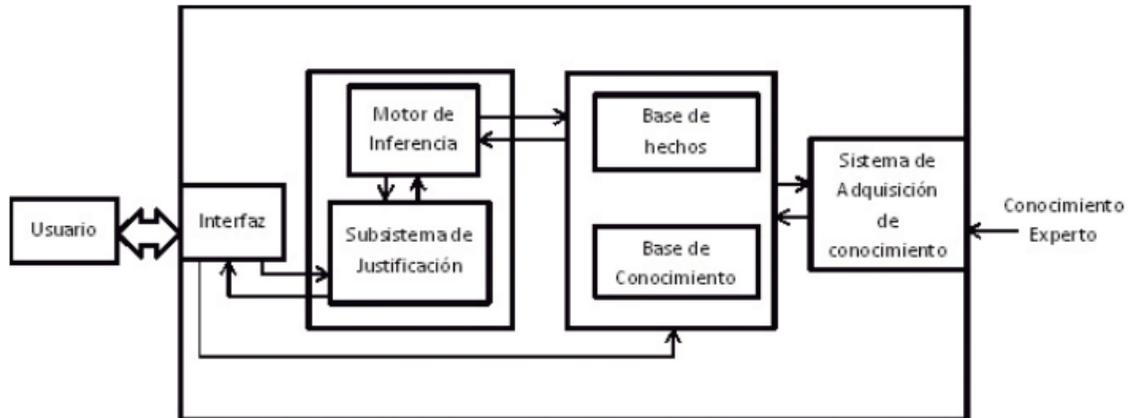


Figura 8. Estructura de un sistema experto

Fuente: Badaró, S., et al (2013). Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones.

2.5.3.1 Tipos de sistemas expertos

Basados en reglas

De acuerdo con Badaró et al (2013), los sistemas basados en reglas trabajan mediante la aplicación de reglas, comparación de resultados y aplicación de nuevas reglas debido a alguna modificación. Trabajan con inferencia lógica dirigida (encadenamiento hacia adelante), empieza con un hecho inicial en una determinada situación y se dirige hacia la obtención de una solución o trabaja con una hipótesis con las posibles soluciones (encadenamiento hacia atrás) y se devuelve para encontrar alguna evidencia o hecho que apoye alguna de las hipótesis.

Según Cabrera (2011), las estrategias de inferencia y control que utiliza el motor de inferencia para poder obtener conclusiones son Modus Ponens y Modus Tollens.

- Modus Ponens: se tiene una regla en la que se cumple la hipótesis, se infiere que la conclusión es cierta, esta es la base para los sistemas expertos basados en reglas.

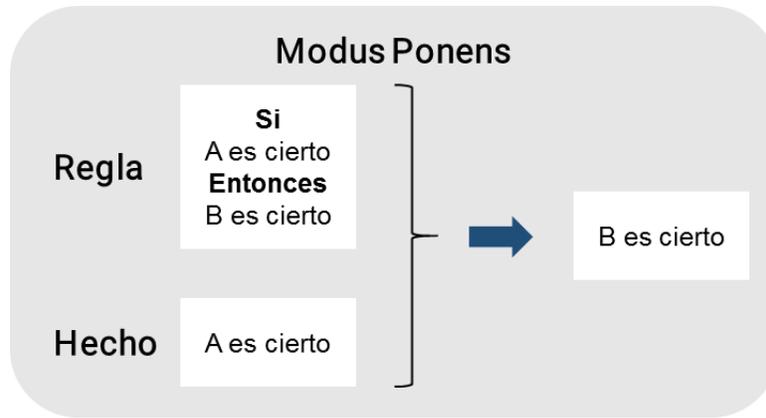


Figura 9. Estrategia de inferencia Modus Ponens

Fuente: Elaboración propia (Basado en Sistemas basados en reglas, Cabrera (2011))

- Modus Tollens: se tiene una regla cuya conclusión es falsa, se infiere que la hipótesis también es falsa.

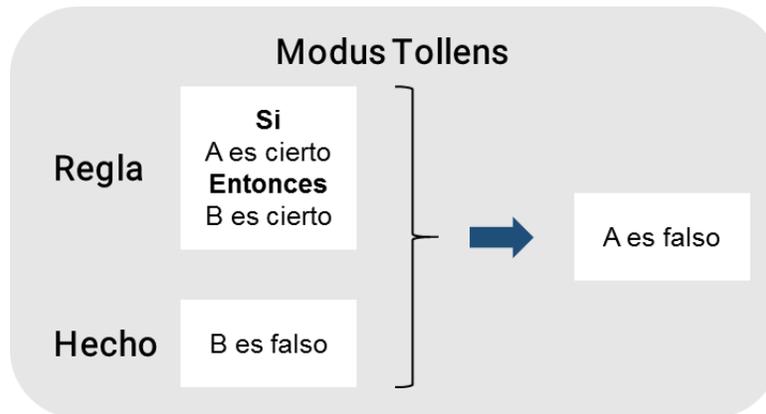


Figura 10. Estrategia de inferencia Modus Tollens

Fuente: Elaboración propia (Basado en Sistemas basados en reglas, Cabrera (2011))

Basados en casos

De acuerdo con Moya et al (2012), los sistemas expertos basados en casos constan de tres partes principales: la base de casos, módulo de recuperación y módulo de adaptación. Cuando existe un nuevo problema, este se describe en el módulo de recuperación y se hace una búsqueda en la base de datos para encontrar un problema similar, este se envía al módulo de adaptación, donde es analizado para construir su solución, y se guarda en la base datos junto con dicha solución.

Basados en redes bayesianas

Según Rodríguez & Dolado (2007), una red bayesiana es un grafo dirigido acíclico, donde los nodos representan variables aleatorias del dominio y los arcos representan relaciones de dependencia entre variables. Las redes bayesianas trabajan con probabilidades para la toma de decisiones, entonces se asume que un nodo depende solamente de sus padres y cada nodo está asociado a una tabla de probabilidades condicionales que definen la probabilidad de estado de una variable en función del estado de sus padres.

Sistemas expertos difusos

Badaró et al (2013), indican que los sistemas expertos difusos emplean el método de lógica difusa, es decir trabajan con incertidumbres. Con esta técnica se simula el proceso de razonamiento normal de un humano lo cual permite a la computadora comportarse menos precisa y más lógicamente que una computadora convencional.

3 Capítulo III. Análisis de modos de falla

Es necesario conocer el estado y partes que componen el equipo de aire acondicionado de precisión y de lo que se tiene en el centro de datos. Esto permite tener un conocimiento completo del equipo y a partir de esto realizar un análisis de criticidad que permita determinar los modos de falla de los componentes más críticos.

3.1 Características del equipo

En este apartado se hace una revisión general del equipo, identificación de partes, marcas y modelos de los componentes, se identifica el circuito de refrigeración y características más relevantes para este proyecto.

En la visita de campo se obtuvo información sobre la marca y modelo: Liebert HPM y dígitos del modelo: S23UA030VDG0020G0. Los dígitos del modelo dan información valiosa acerca de la fabricación y contenido del equipo, a continuación, se muestra qué indica cada número.

Dígitos																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
S	2	3	U	A	0	3	0	V	D	G	0	0	2	0	G	0

Figura 11. Descripción de los dígitos.

Fuente: Manual de asistencia Liebert.

Cada dígito tiene el siguiente significado:

- Dígito 1 familia: S, small
- Dígito 2 y 3 potencia frigorífica aproximada en KW: 23 KW
- Dígito 4 distribución del aire: U, salida hacia abajo
- Dígito 5 versión: A, equipo de aire
- Dígito 6 ventilador: 0, ventilador estándar
- Dígito 7 alimentación principal: 3, 208 V/ 3 fases/ 60 Hz

- Dígito 8 calefacción eléctrica: 0, ninguna
- Dígito 9 humidificador: V, humidificador con electrodos sumergidos
- Dígito 10 control por microprocesador: D, *ICOM & Cold fire Display Large* con control de la temperatura y de la humedad
- Dígito 11 sistema de recalentamiento: G, batería de gas caliente
- Dígito 12 eficacia de los filtros de aire: 0, G4
- Dígito 13 refrigerante: 0, R407C
- Dígito 14 color: 2, negro
- Dígito 15 Magnetotérmico instalado: 0, sin magnetotérmico
- Dígito 16 embalaje: G, PLP caja de madera
- Dígito 17 solicitudes especiales: 0, estándar *Emerson Network Power*

Al tener claro las características del equipo se facilita su análisis de igual forma que incrementa la precisión de la identificación de los modos de falla. En la figura 12 se muestra el circuito de refrigeración del equipo y en la tabla 1 sus partes.

Tabla 1. Partes del circuito de refrigeración

Posición	Descripción	Marca	Modelo
1	Compresor	Copeland	ZR81KCE-TF5
2	Resistencia del cárter	Copeland	ZR22-81
3	Presostato de alta presión	Danfoss	061F5064 26 bar PED
4	Condensador	LU-VE	HCE 33 (LH) CU/AL
5	Receptor de líquido	Frigomec	---
6	Toma de presión	Schrader	8394B
7	Válvula de seguridad	Castel	---
8	Filtro deshidratador	Castel	4316/M12S
9	Indicador de flujo	Castel	---
10	Válvula termostática	Danfoss	TDEZ 8
11	Válvula solenoide de gas caliente	Sporlan	8D7B
12	Válvula sin retroceso	---	---
13	Llave de paso	---	---
14	Batería de post calefacción	---	---
15	Evaporador	Liebert	AAP HPM
16	Presostato de baja presión	Danfoss	DANF-SAG 2-2,8 bar
17	Válvula solenoide de cierre	Castel	1078/M12S

Fuente: Manual de asistencia Liebert

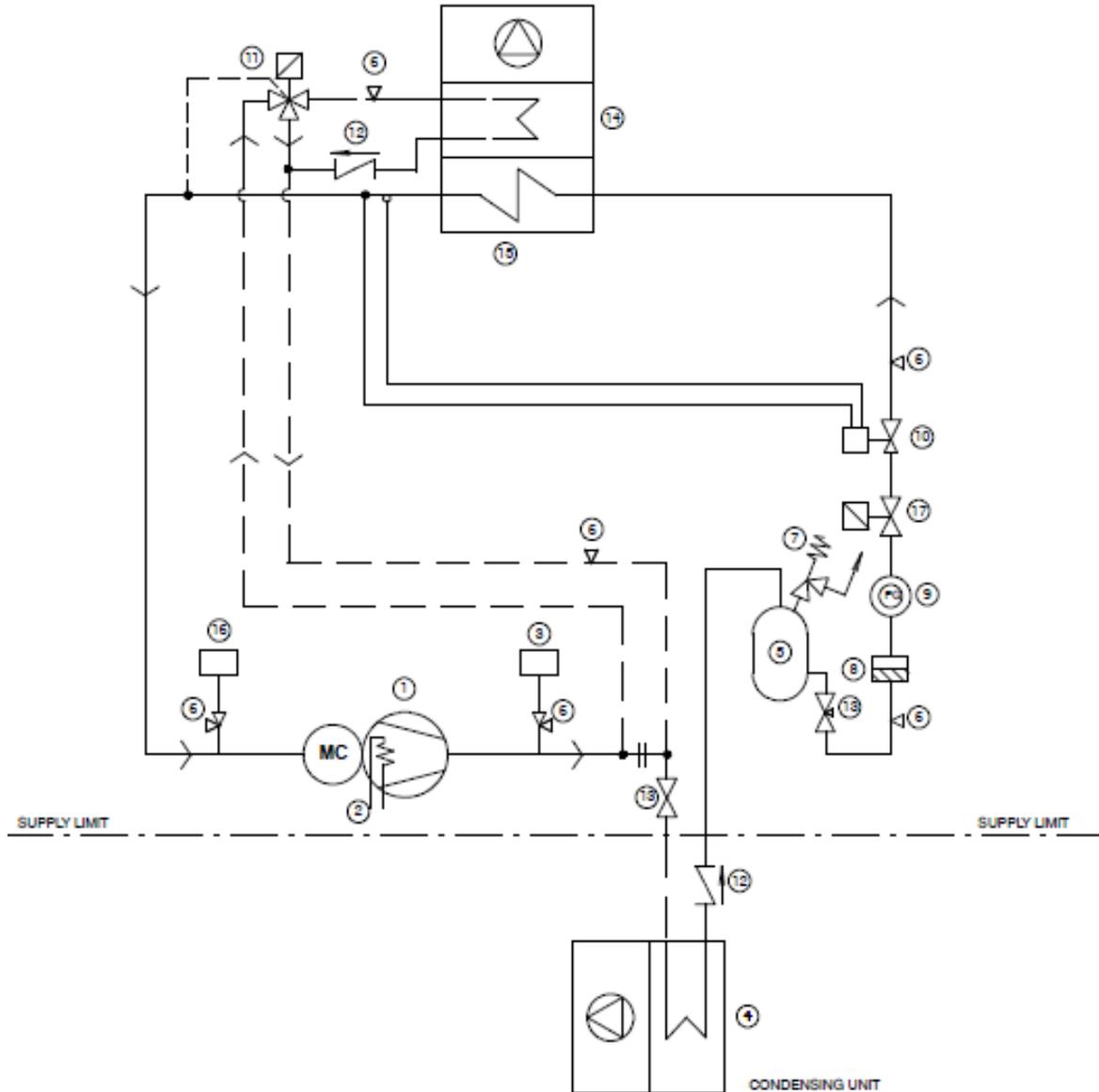


Figura 12. Circuito de refrigeración

Fuente: Manual de asistencia Liebert

En el circuito de potencia los componentes más relevantes son el autotransformador, motores de ventiladores, motor de compresor, resistencia del cárter y la alimentación de los electrodos del humidificador.

3.2 Análisis de criticidad

Como se describió anteriormente el equipo de aire acondicionado no cuenta con un sistema de monitoreo con variables significativas para la toma de decisiones respecto a mantenimiento. Esto quiere decir que no hay datos históricos del comportamiento que tiene, por lo que no es posible saber cuáles componentes del equipo han sido los más críticos. Por esta razón se hace un análisis de criticidad para el circuito de refrigeración, para determinar cuáles son los componentes más significativos para mantenimiento y cuáles componentes generan más impacto en caso de que fallen total o parcialmente.

Se debe tomar en cuenta que al no poder hacer pruebas reales sobre el equipo se debe seleccionar muy bien qué se desea monitorear ya que a la hora de desarrollar el programa se debe configurar con muchos parámetros propios del fabricante y no de operación, por lo que entre más variables se monitoreen pueden generar imprecisión en el sistema experto.

Los modos de falla en un equipo electromecánico pueden ser de muchas formas y darse en distintas partes del equipo, pueden ser a nivel eléctrico, nivel mecánico y específicamente en aire acondicionado se pueden dar en el circuito de refrigeración, por lo tanto, para determinar los modos de falla se dividió el equipo en tres partes con el fin de aislar cada sistema del equipo y hacer un mejor reconocimiento:

- Circuito de refrigeración
- Circuito de potencia
- Elementos mecánicos

Para realizar el análisis de criticidad se hizo una adaptación de los algoritmos ya existentes por dos razones:

1. Los algoritmos comunes se aplican en plantas de producción, donde hay más de una máquina, además son máquinas que cumplen funciones distintas.
2. El análisis de criticidad necesario para este proyecto se realiza con el fin de determinar los modos de falla de los componentes más críticos y de esta forma identificar qué parámetros se deben monitorear para determinar dicho modo de falla por el sistema experto.

De acuerdo con ASHRAE 2015, los equipos de aire acondicionado de un centro de datos o de telecomunicaciones se centran en temperatura, humedad, calidad del aire y flujo de enfriamiento, ya sea por aire o agua. La humedad es la cantidad de agua en el aire, si hay un exceso de humedad en el centro de datos y esta alcanza los servidores y los equipos electrónicos dentro del centro de datos se pueden producir cortocircuitos dañando el equipo y comprometiendo la información que estos almacenan. Además, según ASHRAE 2015, los equipos dentro de los centros de datos están contruidos con componentes que poseen la especificación de temperatura máxima, la cual se encuentra en un rango generalmente entre 85°C y 105°C.

La temperatura y humedad son los dos parámetros principales para controlar en un centro de datos, la instalación del aire acondicionado de precisión se realiza con el fin de controlar dichos parámetros, de manera que se asegure la eficiencia de los servidores.

Por lo expuesto anteriormente el criterio de selección de los componentes es el impacto que este tiene respecto al control de temperatura y humedad del centro de datos y el impacto sobre el equipo en sí, en caso de que fallara total o parcialmente.

En la tabla 2 se puede ver el análisis de criticidad hecho para seleccionar los componentes más críticos para ser monitoreados.

Inicialmente se identifica la función de cada componente en el circuito de refrigeración, con base en esto se determina si afecta directamente la temperatura y humedad del centro de datos, luego se debe considerar si afecta el equipo de aire acondicionado.

Se debe tener en cuenta que cualquier falla compromete el equipo, sin embargo, afectan en distintos grados, por lo que no se puede monitorear un componente simplemente porque afecta de algún modo al equipo, también se debe considerar si este puede ser monitoreado con la tecnología actual, además, para este proyecto se debe tomar en cuenta que no hay datos históricos, por lo que se debe ser cuidadoso de no sobrecargar el sistema experto con parámetros de fabricante y no de operación, ya que esto incurre en la imprecisión.

Tabla 2. Análisis de criticidad para determinar componentes a monitorear

Posición	Descripción	Función	En caso de que falle		¿Puede ser monitoreado?	Crítico
			¿Afecta temperatura y humedad?	¿Afecta equipo?		
1	Compresor	Comprime el refrigerante en estado gaseoso, elevando su presión y temperatura para producir una transferencia de calor	Si	Sí	Sí	Sí
2	Resistencia del cárter	Mantener el aceite del compresor a una temperatura más alta que la que corresponde a la más baja en la instalación, para que en caso de que una gota de refrigerante entre en el cárter se vaporice rápidamente	No	Sí	Sí	Sí
3	Presostato de alta presión	Abre o cierra el circuito dependiendo de la presión configurada	No	Sí	No	No
4	Condensador	Transforma vapores sobre calentados por la compresión del gas en líquido subenfriado por medio del intercambio de calor con el exterior	Sí	Sí	Sí	Sí

Posición	Descripción	Función	En caso de que falle		¿Puede ser monitoreado?	Crítico
			¿Afecta temperatura y humedad?	¿Afecta equipo?		
5	Receptor de líquido	Almacena el líquido proveniente del condensador, para abastecer el evaporador según las necesidades del centro de datos	No	No	Sí	No
6	Toma de presión	Válvula Schrader donde se puede tomar la presión con un manómetro	No	No	No	No
7	Válvula de seguridad	Se abre en caso de que el receptor de líquido sobrepase su capacidad	No	No	No	No
8	Filtro deshidratador	Evita que impurezas de humedad entren en el sistema y pasen por la válvula termostática y/o dañen la tubería	Sí	Sí	Sí	Sí
9	Indicador de flujo	Muestra que hay humedad tornándose de color amarillo	No	No	No	No

Posición	Descripción	Función	En caso de que falle		¿Puede ser monitoreado?	Crítico
			¿Afecta temperatura y humedad?	¿Afecta equipo?		
10	Válvula termostática	Regula la temperatura al regular el flujo de refrigerante dirigido al evaporador	Sí	No	Sí	Sí
11	Válvula solenoide de gas caliente	Suministra gas caliente para evitar que la tubería se escarche	No	No	Sí	No
12	Válvula sin retroceso	Permitir el flujo en una sola dirección	No	Sí	No	No
13	Llave de paso	Permite el paso de refrigerante	No	No	No	No
14	Batería de post calefacción	Calentamiento en caso de que la temperatura de evaporación sea menor a 0°C	No	No	Sí	No
15	Evaporador	Evaporar el refrigerante mediante el intercambio de calor	Sí	Sí	Sí	Sí
16	Presostato de baja presión	Abre o cierra el circuito dependiendo de la presión configurada	No	Sí	No	No
17	Válvula solenoide de cierre	Cierra el circuito, impidiendo el paso de refrigerante	Sí	Si	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia (Excel)

Como se observa en la tabla 2, los componentes críticos con base en los criterios anteriores son el compresor, resistencia del cárter, filtro deshidratador, evaporador, condensador, válvula de expansión termostática y válvula solenoide de cierre.

Una vez determinados los componentes críticos con base en los criterios de la tabla 2, se determinan los modos de falla y se identifica qué variables deben ser monitoreadas para determinar dicho modo de falla.

3.3 Circuito de refrigeración

En este circuito se contemplan solamente los componentes críticos determinados en la tabla 2, exceptuando la resistencia de cárter, esta será contemplada en el circuito de potencia por la función que tiene.

Los componentes a los que se les determina los modos de falla y correspondiente monitoreo son:

- Compresor
- Filtro deshidratador
- Válvula solenoide de cierre
- Válvula de expansión termostática

El recalentamiento y subenfriamiento serán verificados por el sistema experto como se indica en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Según Ospino (s.f) el recalentamiento útil es el calentamiento que sufre el refrigerante en estado de vapor saturado a baja presión en el evaporador y el recalentamiento ambiental se debe al calentamiento que sufre el refrigerante en el trayecto desde la salida del evaporador hasta la entrada del compresor, debido al calor que absorbe del ambiente.

Tabla 3. Verificación de recalentamiento

Verificación de recalentamiento		
Recalentamiento útil	T salida del evaporador	Con sensor de temperatura en ese punto
	T evaporación	Medir presión a la entrada de compresor y buscar temperatura de tabla P-T
Recalentamiento ambiental	T entrada del compresor	Con sensor de temperatura en ese punto
	T salida del evaporador	Con sensor de temperatura en ese punto

Fuente: Elaboración propia (Excel)

De acuerdo con Ospino (s.f) el subenfriamiento en el condensador es un enfriamiento que sufre el refrigerante en estado líquido saturado a alta presión en el condensador, y el subenfriamiento adicional se debe al enfriamiento que sufre el refrigerante en el trayecto desde la salida del condensador hasta la entrada de la válvula de expansión termostática, haciendo del subenfriamiento total la suma de ambos, en la tabla 4 se puede observar que el recalentamiento total siguiendo la fórmula anterior, sería la resta de la temperatura de condensación menos la

temperatura a la entrada de la válvula de expansión termostática, sin embargo, para este proyecto se hace la diferenciación para comprobar modos de falla de una manera más precisa.

Tabla 4. Verificación de subenfriamiento

Verificación de subenfriamiento		
Subenfriamiento del condensador	T condensación	Medir presión antes del condensador y se busca la temperatura de tabla P-T
	T refrigerante a la salida del condensador	Con un sensor de temperatura en ese punto
Subenfriamiento adicional	T refrigerante a la salida del condensador	Con un sensor de temperatura en ese punto
	T refrigerante en la entrada de la válvula de expansión	Con un sensor de temperatura en ese punto

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.3.1 Compresor

El compresor es marca Copeland, modelo ZR81KCE-TF5. En la tabla 5 se puede observar los parámetros importantes que serán usados para el desarrollo del sistema experto, es importante resaltar que estos son datos de fabricante, es muy probable que los datos de operación varíen, por lo que cuando se implemente el proyecto dichos datos deberán ser verificados.

Tabla 5. Características del compresor

Característica	Magnitud
Voltaje	230 V
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz
Potencia	4870 W
Corriente aproximada	20 A
Vibración	0,0762 mm (pico-pico)
Velocidad	3500 rpm

Fuente: Copeland

En la tabla 6, se encuentran los modos de falla. La columna acción se refiere a la acción que debe ser programada en el sistema experto. Los parámetros de referencia se encuentran el capítulo V, el cual abarca el desarrollo del sistema experto. Según las distintas fuentes consultadas, un compresor puede fallar de muchas maneras, lo que a su vez afecta de igual forma el equipo de aire acondicionado. Sin embargo, para este proyecto se estudiaron las fallas que pueden ser mejor identificadas por un sistema experto mediante la red de sensores que constan el sistema de adquisición de datos.

Además de los parámetros mostrados en la tabla 5, otros parámetros requeridos son la presión de succión y de descarga y las vibraciones normales para este modelo de compresor.

Tabla 6. Modos de falla del compresor

Modo de falla	Falla funcional	Medición	Acción
Paso de líquido a la línea de succión	Compresor frío	Sensor de temperatura y presión en la válvula de expansión	Verificar recalentamiento
Resistencia del cárter dañada		Sensor de voltaje en las terminales de la resistencia	Verificar con las configuradas
Sobrecarga del compresor	Compresor caliente	Sensor de presión en la línea de succión	Verificar presión en la línea de succión
Presión de condensación muy alta		Sensor de presión en la entrada del condensador	Verificar presión de condensación
Refrigerante líquido en el aceite del cárter	Sonido constante	Sensor de vibraciones	Verificar vibraciones pico-pico
Desgaste en las partes móviles			
Humedad en el sistema		Sensor de presión adelante y atrás en el filtro deshidratador	Verificar estado del filtro
Presión de succión muy alta	Compresor no arranca	Sensor de presión en la entrada del compresor	Verificar presión con la configurada en el presostato de baja
Presión de condensación muy baja		Sensor de presión en la descarga del compresor	Verificar presión con la configurada en el presostato de alta

Modo de falla	Falla funcional	Medición	Acción
Motor quemado		Sensor de voltaje en terminales	Si el voltaje es correcto cambiar motor
El compresor funciona mucho tiempo	Elevado consumo de corriente	Sensor de voltaje y corrientes en bobinas del motor	Verificar presión de succión, subenfriamiento y recalentamiento, temperatura del centro de datos

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.3.2 Filtro deshidratador

Para el filtro deshidratador como se puede ver en la tabla 7, el único modo de falla identificado es cuando este esté saturado, esto se debe al tipo del filtro instalado en el equipo, el cual es un modelo hermético, por lo que la única acción de mantenimiento posible es cambiándolo, a diferencia de otros tipos de filtros deshidratadores a los cuales se les puede cambiar el material higroscópico. Sin embargo, el monitoreo de este componente es muy importante debido a las consecuencias de que se sature, ya que cuando hay humedad en el refrigerante causa hidrólisis, formando ácido clorhídrico, lo que daña la tubería de todo el sistema, así como las parte móviles del compresor. El filtro deshidratador instalado es marca Castel, modelo 4316/M12S.

Tabla 7. Modos de falla del filtro deshidratador

Modo de falla	Falla funcional	Medición	Acción
Filtro saturado	Rendimiento del evaporador insuficiente	Sensor de presión adelante y atrás del filtro	Comparar con las establecidas
	Caída de presión a la salida del filtro		

Fuente: Elaboración propia (Excel)

El parámetro para considerar para el filtro es la caída de presión normal que hay en el refrigerante al pasar por este, de igual forma que el compresor, es un dato de fabricante y no de operación, por lo que deberá ser verificado cuando haya datos de operación.

3.3.3 Válvula solenoide de cierre

La válvula instalada es de marca Castel, modelo 1078/M12S, es normalmente abierta su bobina es 9120/RD6 de 220 V. Como se puede observar en la tabla 2, la función de esta válvula es la de cerrar el circuito impidiendo el paso de refrigerante bajo ciertas condiciones del sistema.

Para identificar los modos de falla expuestos en la tabla 8, se considera las posibles partes de la válvula que pueden fallar. En este caso la falla más importante es el mal funcionamiento de esta, es decir que la válvula no cierre total o parcialmente, esto sería debido a que su accionamiento, es decir, la bobina esté dañada o que la diferencia de presión le imposibilite su accionamiento. No obstante, esta última falla es poco probable de que suceda, ya que para que se dé una presión diferencial muy alta o muy baja se debe al dimensionamiento de la válvula o a una presión de entrada muy alta, es decir que la capacidad del compresor sea mayor a la necesaria, y dado que en este proyecto se está trabajando con un equipo ya instalado, la probabilidad de que esto suceda es muy baja, de igual forma se toma en cuenta en caso de que exista un cambio de válvula o de compresor. Además, esta válvula requiere de una presión diferencial mínima para abrir.

Los parámetros requeridos para el sistema experto son el voltaje de alimentación de la bobina y la caída de presión en la válvula, explícitos en el capítulo V.

Tabla 8. Modos de falla válvula solenoide de cierre

Modo de falla	Falla funcional	Medición	Acción
Voltaje o frecuencia incorrectas en la bobina	La válvula no cierra/cierra parcialmente	Sensor de voltaje en conexión con la bobina	Verificar voltaje
Presión diferencial muy baja		Sensor de presión adelante y atrás	Verificar presión de salida del filtro deshidratador y entrada de la válvula de expansión
Bobina quemada		Sensor de corriente y voltaje	Verificar voltaje y corriente

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.3.4 Válvula de expansión termostática

La válvula de expansión instalada es marca Danfoss, modelo TDEZ 8. La válvula de expansión termostática es de los componentes más importantes en un circuito de refrigeración y las fallas que esta pueda tener afectan la capacidad de remoción de calor del equipo de aire acondicionado, en la tabla 9 se pueden encontrar fallas que tienen que ver con el dimensionamiento de la válvula de expansión, en este caso al igual que con la válvula solenoide, esas fallas son poco probable que sucedan, no obstante se consideran bajo la posibilidad de que haya un cambio, ya sea de la válvula de expansión o del compresor.

Los parámetros requeridos son temperatura de subenfriamiento, temperatura de recalentamiento y caída de presión normal en la válvula de expansión.

Tabla 9. Modos de falla de la válvula de expansión termostática

Modo de falla	Falla funcional	Medición	Acción
Caída de presión excesiva en el evaporador	Temperatura del centro de datos demasiado elevada	Sensor de presión y temperatura adelante y atrás	Ver si es necesario válvula con igualación de presión externa
Insuficiente subenfriamiento antes de la válvula		Verificación de subenfriamiento	Verificar estado del condensador
La caída de presión de la válvula es menor que la caída para la cual está diseñada		Sensor de presión adelante y atrás de la válvula	Comparar medición de presión contra la instalada
Válvula de expansión obstruida		Sensor de presión adelante y atrás de la válvula	Verificar caída de presión en la válvula y en filtro deshidratador
Poco recalentamiento	Temperatura del centro de datos inestable	Verificación de recalentamiento	Ajustar recalentamiento en la válvula de expansión

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.3.5 Evaporador y condensador

Para el evaporador y condensador no se identificaron modos de falla, sino que el monitoreo de presión y temperatura adelante y atrás de estos son necesarios para determinar modos de falla de los componentes vistos anteriormente, principalmente para verificar subenfriamientos y recalentamientos.

Los parámetros requeridos son la temperatura de condensación y de evaporación, de igual forma que los demás componentes, estos serán datos de diseño y no de operación, por lo que deberán ser verificados cuando se implemente el sistema de adquisición de datos planteado en el capítulo IV asegurando una mayor precisión en el sistema experto.

Tabla 10. Medición en evaporador y condensador

	Modelo	Medición
Evaporador	AAA HPM	T salida -T entrada - P salida - P entrada
Condensador	HCE 33 (LH) CU/AL	T salida -T entrada - P salida - P entrada

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.4 Circuito de potencia

Para el circuito de potencia se realizó un análisis similar al de la tabla 2, tomando en cuenta los componentes ya determinados en dicha tabla, se identificaron los componentes eléctricos a los que están conectados y de esa forma se seleccionaron los mostrados en la tabla 11.

Tabla 11. Componentes seleccionados para el monitoreo del circuito de potencia

Ventilador evaporador			
Autotransformador	290 V	260 V (voltaje de deshumidificación)	Sensores de voltaje y corriente
Motor ventilador	230 V 3 fase 60 Hz		
Compresor			
Motor	230 V 3 fase 60 Hz		Sensores de voltaje y corriente
Resistencia del Cáster	70 W 1 fase 230 V		
Humidificador			
Líneas de electrodos	230 V 3 fase 60 Hz		Sensores de voltaje y corriente Sensor de flujo
Condensador			
Motores (2)	230 V 1 fase 60 Hz		Sensores de voltaje y corriente
Modelo	ZA FE050-6EK.4F.V7		

Fuente: Elaboración propia (Excel)

Para las líneas de alimentación principal solo se va a monitorear las líneas provenientes de la red eléctrica y de la planta de emergencia, con el fin de que en caso de que haya un corto de energía y la planta no entre en funcionamiento, envíe la alarma respectiva a las personas correspondientes.

Tabla 12. Monitoreo líneas de alimentación principales

Planta de emergencia	
Modelo	Modasa
Líneas de alimentación	Sensor voltaje y corriente
Líneas de alimentación principal (Red eléctrica)	Sensor voltaje y corriente

Fuente: Elaboración propia (Excel)

3.5 Elementos mecánicos

Para determinar los elementos mecánicos a monitorear, se realizó el mismo análisis que para el circuito de potencia, se identificaron los componentes relevantes a los componentes críticos determinados en la tabla 2.

Los parámetros requeridos para el monitoreo e identificación de una falla por vibración como se muestra en la tabla 13 de estos componentes son las vibraciones de los ventiladores en el eje.

Tabla 13. Monitoreo de los elementos mecánicos

Ventiladores		
	Modelo	Medición
Evaporador	ZA RH56E-4DK.6N.2R	Vibración
Condensador	ZA FE050-6EK.4F.V7	Vibración
Filtro de aire		
Tipo	G4	
Medición	Diferenciales de presión	
Presión diferencial máxima	2 mbar	

Fuente: Elaboración propia (Excel)

4 Capítulo IV. Planteamiento del sistema de adquisición de datos

Mantener monitoreado un equipo de aire acondicionado de un centro de datos, implica garantizar el correcto funcionamiento de los servidores y otros equipos instalados en el centro de datos. Según Capozzoli y Primiceri (2015), la remoción de calor es un factor crucial a considerar para asegurar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos informáticos, ya que una alta densidad de calor puede causar altas temperaturas que afectan dichos equipos. De acuerdo con Anandan y Ramalingman (2008), la principal causa de falla de los componentes electrónicos es una alta temperatura, causando pérdidas monetarias y afectaciones en los procesos que dependen de estos equipos.

Capozzoli y Primiceri (2015), indican que varias medidas para mejorar la eficiencia energética están siendo estudiadas no solo para permitir el crecimiento de la industria de centros de datos sino también para reducir costos operacionales, además que un sistema de enfriamiento ineficiente puede consumir hasta un 40% de la energía de un centro de datos. De acuerdo con Koomey (2011) entre el 2000 y 2005 el consumo de energía de un centro de datos fue doblado y creció un 56% en el 2010, lo que implica que alrededor de un 1,3% del consumo global de energía fue atribuido a centros de datos y de acuerdo con Ebrahimi et al (2014) se espera este aumento entre un 15% a 20% en el futuro.

Un sistema de aire acondicionado ineficiente afecta tanto la eficiencia de los equipos electrónicos dentro del centro de datos como la eficiencia energética, por lo que un sistema de monitoreo instalado desde el punto de vista de mantenimiento puede asegurar un buen funcionamiento de los equipos por mayor tiempo, mejora su disponibilidad y fiabilidad, lo que a su vez representa mayor eficiencia en los procesos que dependen de los servidores como lo son la página web institucional, Tec Digital, sistema de matrícula, expedientes de funcionarios y estudiantes, información de estados financieros, etc.

El sistema de monitoreo que tiene actualmente el centro de datos monitorea las variables que se muestran en la figura 13.

Pos	Sensor	Status	Message	Graph	Priority	
+ 1.	✓ PING AC_Sala_Servidores	Up	OK	Tiempo de Pi 0 msec	★★★★★	<input type="checkbox"/>
+ 2.	✓ Estado del Equipo (1=on/2=off)	Up	OK	Igp env state1 (1=On/2=Of	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 3.	✓ Capacidad del abanico AC_Sala_Servidores	Up	OK	Igp env state 100 #	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 4.	✓ Temperatura retorno del AC	Up	OK	Temperatura 24.00 °C	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 5.	✓ Humedad relativa_AC_Sala_CC	Up	OK	Igp env humic 46.00 %	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 6.	✓ Capacidad de Enfriamiento (%)	Up	OK	Igp env state 100 %	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 7.	✓ Valor configurado de Humedad en el AC	Up	OK	Igp env humic 45 %	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 8.	✓ Valor configurado de Temperatura en el AC	Up	OK	Igp env temp 22 °C	★★★★☆	<input type="checkbox"/>
+ 9.	✓ Temperatura Ambiente_Medida por el AC	Up	OK	Temperatura 24.00 #	★★★★☆	<input type="checkbox"/>

<< < 1 to 9 of 9 > >>

Figura 13. Sensores instalados actualmente

Fuente: DATIC, 2020

En la figura 13 se puede observar los sensores que están actualmente instalados, los sensores número 1 y 2 monitorean el estado del equipo (encendido o apagado), el sensor número 3 monitorea la capacidad del ventilador del evaporador, sensor 4 y 5 temperatura y humedad del aire respectivamente. Todos estos sensores a pesar de que son muy útiles en el monitoreo y estado general del equipo de aire acondicionado y del centro de datos, no reflejan el verdadero estado del equipo desde un punto de vista técnico, por lo que cuando se da una alarma, por ejemplo que el ventilador del evaporador se apagó, quien recibe dicha alarma no sabe la razón específica de esta falla, lo que produce un aumento en el tiempo de falla, repercutiendo en la operación de los servidores, lo deseable sería que exista un sistema de monitoreo que permita adquirir datos de operación para alimentar un programa que aprenda a detectar fallas, y que cuando se genere una alarma esta indique la falla y la acción a realizar para mitigarla.

Tomando en cuenta todos los factores anteriores, se propone un sistema de adquisición de datos con uso de tecnología libre y de bajo costo que satisfaga las necesidades para el correcto monitoreo desde un punto de vista de mantenimiento industrial.

4.1 Descripción del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos propuesto consiste en la conexión de 79 sensores, 23 digitales y 56 analógicos, conectados a una placa de desarrollo NodeMCU versión 1.0, la cual transmite los datos por comunicación WiFi a través de un rúter al servidor web que también aloja la base de datos, de esta forma se dispone de los datos en la nube. Los sensores necesarios para el monitoreo son de temperatura, presión, voltaje, corriente, flujo y de vibración.

4.1.1 NodeMCU

Es una placa de desarrollo basada en el ESP8266, abierta a nivel de software y hardware por lo que cualquier persona puede alterar la placa. Es importante aclarar que esta placa no es un microcontrolador, es una placa o kit de desarrollo que trae incorporados un *System on Chip*, SoC por sus siglas en inglés, en el cual trae un microcontrolador o MCU. Dicho MCU se programa a través de la placa de desarrollo, una de las ventajas de esta placa es que tiene incorporado un módulo de WiFi que permite crear proyectos IoT (Hernández, s.f). En el anexo 1 se pueden observar todas las características de esta placa.

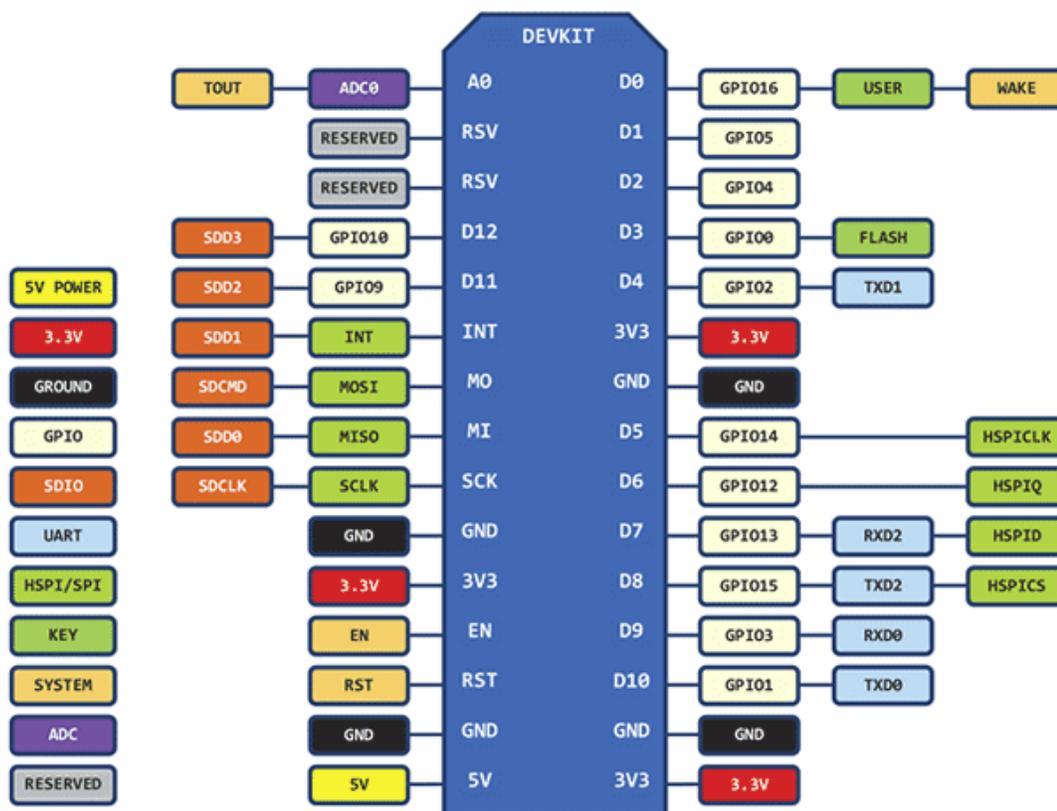


Figura 14. Diagramas de entradas y salidas NodeMCU

Fuente: Hernández, L (2020)

Como se puede observar en la figura 14, la placa NodeMCU cuenta con 13 pines GPIO, siendo 12 de estos digitales y 1 analógico de 10-bit. El fabricante recomienda evitar usar los pines D11 y D12, ya que la placa al no tener una memoria incorporada, se deben dejar pines libres para realizar la conexión, además, también recomienda no utilizar los pines D09 y D10, ya que corresponden a los pines Rx y Tx respectivamente, usados para recibir y transmitir datos, por lo tanto, quedan solamente 9 pines digitales y 1 analógico.

Se debe tomar en cuenta la cantidad de sensores que se deben conectar a esta placa, los cuales son 23 digitales y 56 analógicos, al no haber una placa similar al NodeMCU con 63 pines analógicos se debe multiplexar las señales analógicas.

El pin analógico A0 tiene un rango de voltaje que va de 0 V a 3,3 V con una resolución de 10-bit, esto implica que este pin puede tomar 2^{10} valores diferentes,

es decir entre 0 y 1023. Se tienen sensores cuyo valor de salida es mayor a 3,3 V, por lo que una atenuación de señal es requerida.

En cuanto a la alimentación de la placa esta funciona con un voltaje de 3,3 V, la versión 1.0 tiene una salida 5 V como se puede ver en la figura 14, esta sirve para alimentar sensores, sin embargo, se conectarán a una fuente independiente debido a la cantidad de estos.

4.1.1.1 ESP8266

Este chip se encuentra dentro del SoC, el cual específicamente no es un microcontrolador, sino que dentro de sí contiene uno llamado *Tensilica L106* de 32-bit. De acuerdo con el fabricante *Espressif Systems* dentro de las aplicaciones de este chip se pueden citar:

- Domótica
- Control industrial inalámbrico
- Monitores para bebé
- Redes de sensores
- Seguridad
- Electrónica portátil

Las características más relevantes son:

- MCU llamado *Tensilica L106* de 32-bit
- Módulo de WiFi de 2,4 GHz
- Una memoria RAM de aproximadamente 50 KB
- Una entrada analógica de 10-bit
- 17 pines GPIO

En el anexo se pueden consultar la especificación completa del chip ESP8266.

4.1.1.2 Módulo ESP12E

Con este módulo la placa NodeMCU procesa la información, en este se encuentra el ESP8266, con el cual se establece la conexión WiFi, ideal para desarrollo de proyectos de IoT, los pines del ESP8266 están cableados hasta este

módulo, por lo que su acceso es más sencillo, aquí también se almacena los programas y la antena gracias a su memoria flash (Hernández, s.f). Las aplicaciones de este módulo son las siguientes:

- Estaciones meteorológicas
- Aplicaciones en IoT
- Domótica
- Juguetes y aplicaciones de juegos
- Sistemas de control inalámbrico
- Seguridad

La función de cada pin se encuentra en el anexo 3.

4.1.2 Sensores

Los sensores necesarios para el sistema de monitoreo consisten en sensores de presión, temperatura, corriente, voltaje, flujo y vibración. A continuación, se muestran las características de cada uno.

4.1.2.1 Sensor de presión

Los sensores de presión requeridos son para ser instalados en tubería, esto eleva un poco su costo, ya que son de carácter industrial, los costos de estos se verán en el análisis financiero.

Los sensores de presión son requeridos como se muestran en la figura 15, antes y después del compresor, antes y después del condensador, antes y después del filtro deshidratador, después de la válvula solenoide de cierre, después de la válvula de expansión termostática y antes y después del evaporador, haciendo un total de 10 sensores de presión.

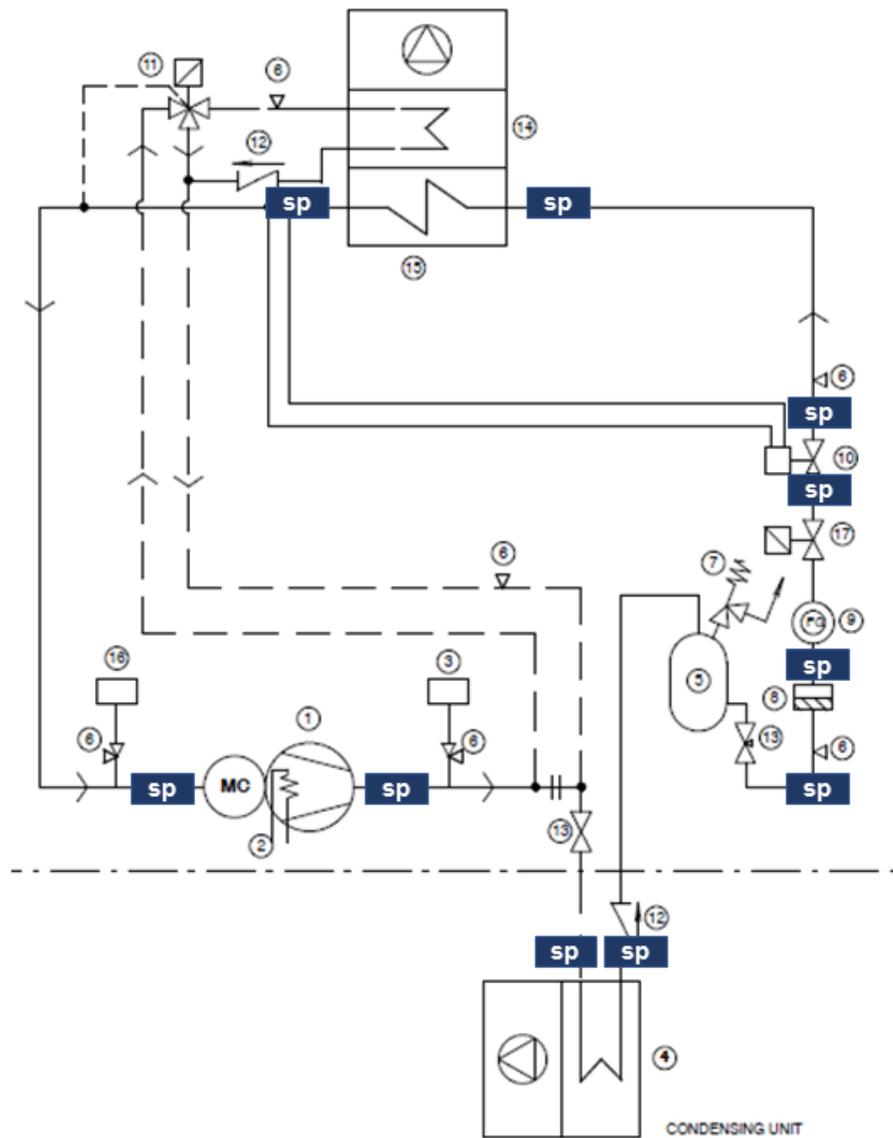


Figura 15. Colocación de sensores de presión en el circuito de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia (Basado en el circuito de refrigeración de Manual Liebert)

sp = sensor de presión

Como se puede observar en la figura 15, estos sensores se colocan en tubería, para seleccionar este sensor, se toma como referencia la presión máxima de descarga admitida por el compresor que es de 29 bar para el modelo ZR81KCE-TF5 según el fabricante, que en este caso es *Copeland*.

El sensor seleccionado es marca *Holykell*, código HPT300-C07BAE6S3X2001, en el anexo 4 se pueden consultar el significado de cada dígito del código, las especificaciones del sensor se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones del sensor de presión seleccionado.

Característica	Magnitud
Rango de presión (bar)	-1 a 35
Presión	Absoluta
Temperatura de operación (°C)	-30 a 125
Voltaje de operación (V)	24
Salida (V)	0 a 5
Tiempo de respuesta (ms)	< 20

Fuente: Elaboración propia (Basado en el fabricante)

El único acondicionamiento que se le debe hacer a estos sensores es una multiplexación de señal analógica, de forma que se evite comprar una gran cantidad de placas NodeMCU, para esto se utilizarán dos multiplexores 74LS151, el cual cuenta con 8 entradas digitales y una salida común, por lo que también se deben utilizar convertidores analógico-digital con un voltaje que va desde 0,25 V a 3,5 V.

4.1.2.2 Sensor de temperatura

Al igual que los sensores de presión, los sensores de temperatura también son para ser colocados en tubería, por lo que su costo es un poco más elevado en comparación con los sensores de corriente o voltaje.

Los sensores de temperatura son requeridos tal y como se muestra en la figura 16, antes del compresor, antes y después del condensador, antes y después de la válvula de expansión termostática y antes y después del evaporador, haciendo un total de 7 sensores analógicos de temperatura.

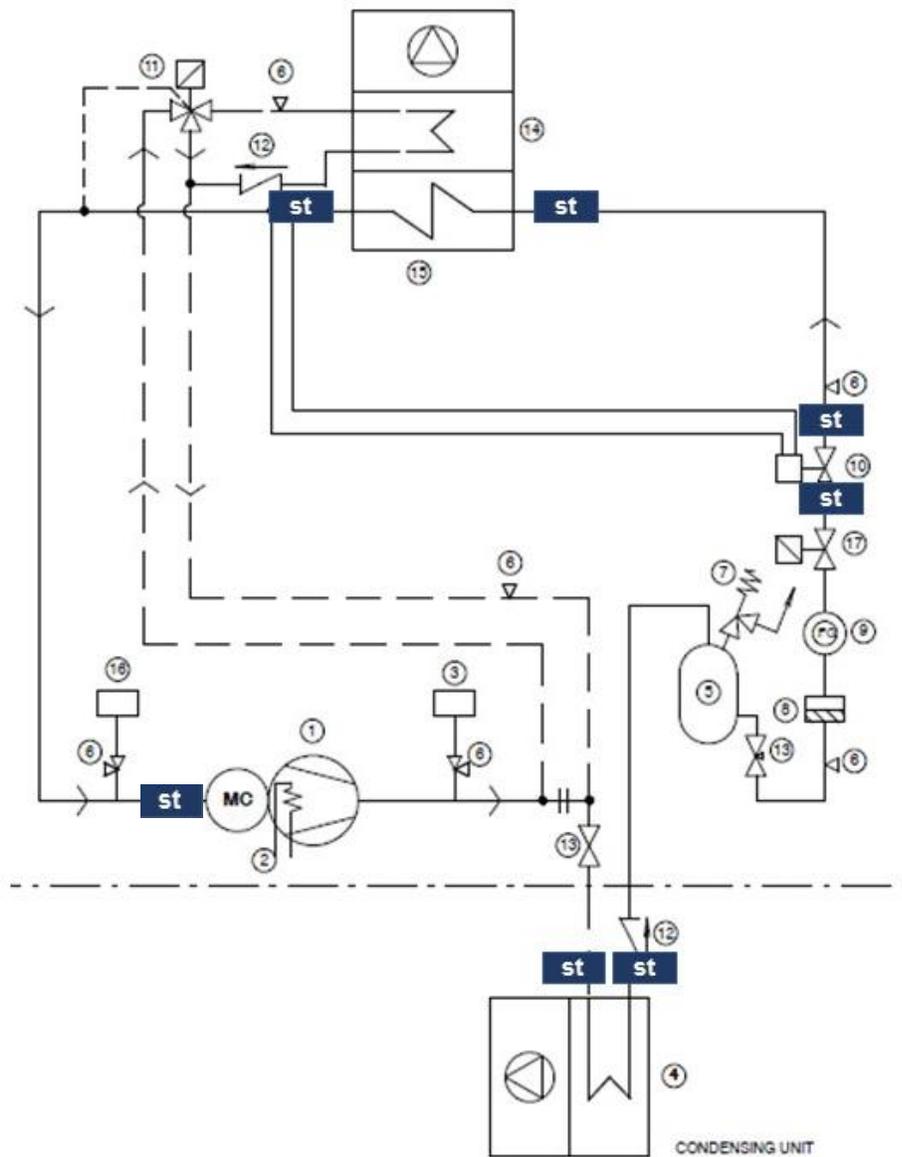


Figura 16. Colocación de sensores de temperatura en el circuito de refrigeración

Fuente: Elaboración propia (Basado en el circuito de refrigeración de Manual Liebert)

st = sensor de temperatura

Para seleccionar este sensor se toma la temperatura del refrigerante R407C a la máxima presión admitida por el compresor en la descarga, la cual es de 29 bar, según la tabla presión-temperatura para este refrigerante corresponde una temperatura de 62°C.

El sensor seleccionado es de la marca *Sensata Technologies*, modelo 5024 EGR 10K Ohm NTC, en la tabla 15 se muestran las especificaciones del sensor.

Tabla 15. Especificaciones del sensor de temperatura seleccionado

Característica	Magnitud
Rango de temperatura (°C)	-55 a 300
Tolerancia	25°C±0.8°C, 300°C±3.7°C
Tipo	NTC
Voltaje de alimentación (V)	5

Fuente: Elaboración propia (Basado en el fabricante)

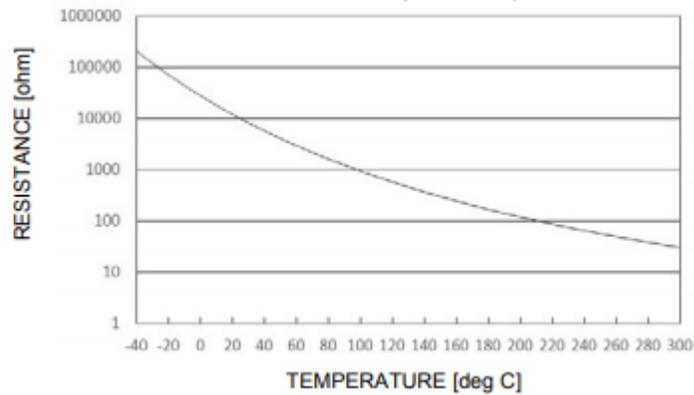


Figura 17. Curva característica de resistencia-temperatura

Fuente: Hoja de datos del sensor, Sensata Technologies

Para determinar la temperatura de un sensor de temperatura NTC, de acuerdo con Gómez (2017) se sigue la siguiente ecuación:

$$T = \left(\frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_0}\right)}{B} + \frac{1}{T_0}} \right)$$

Donde B , R_0 y T_0 son parámetros dados por el fabricante, en este caso:

$$B = 3450$$

$$R_0 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

Para multiplexar la señal de los 7 sensores requeridos, se utiliza el mismo multiplexor 74LS151, estos serán conectados a una entrada analógica de la placa NodeMCU.

4.1.2.3 Sensor de corriente

Para seleccionar los sensores de corriente requeridos por el sistema, primero se debe hacer la distinción de qué voltajes son los requeridos a medir, y si son analógicos o digitales.

En total se requieren 28 sensores de corrientes alterna de los cuales la corriente más alta corresponde a la del compresor que es de aproximadamente de 20 A. Por lo que se selecciona un sensor SCT-013, el cual tiene una corriente de entrada de 0 A a 30 A y una salida de 0 V a 1 V, por lo que no necesita atenuación, pero si se requiere multiplexar las señales, para esto se utiliza el mismo multiplexor 74LS151, de los cuales se requieren 4. Nótese que este es un sensor analógico.

4.1.2.4 Sensor de voltaje

Al igual que con los sensores de corriente se debe hacer el conteo del total de sensores requeridos. En este caso son 29 sensores de corriente alterna.

El voltaje más alto en el equipo corresponde al voltaje del autotransformador el cual es de 290 V del lado de alta y 260 V del lado de baja. Para los demás voltajes todos se encuentran por debajo de 250 V, para estos se selecciona el sensor ZMPT101B, cuyo máximo voltaje es de 250 V y la señal de salida es de 0 V a 5 V, por lo que se necesita atenuar la señal. El total de sensores necesarios de este tipo son 29. Para multiplexar la señal se necesitan 3 multiplexores 74LS151. Nótese que este es un sensor analógico.

4.1.2.5 Sensor de flujo

El sensor de flujo se coloca en la tubería de alimentación al humidificador, para esto se selecciona el YF-S201, en la tabla 16 se muestran las especificaciones del sensor.

Tabla 16. Especificaciones del sensor de flujo

Característica	Magnitud
Voltaje de operación (V)	5 a 24
Humedad de operación	35% a 90%
Tipo	Efecto Hall
Temperatura de operación (°C)	-25 a 80

Fuente: Elaboración propia (Basado en el fabricante)

Este sensor debe ser conectado al pin de interrupción de la placa NodeMCU, la tasa de flujo de agua es directamente proporcional número de pulsos entre las interrupciones por unidad de tiempo.

4.1.2.6 Sensor de vibración

La cantidad de sensores requeridos es de 4 en total, uno para el compresor, uno para el motor del ventilador del evaporador y uno para cada motor de los dos ventiladores del condensador.

El sensor de vibración para el compresor se coloca en la base de este, y el de los motores en la carcasa, esto es importante para la selección del sensor. Se selecciona el sensor MPU6050, en la tabla 17 se muestran las especificaciones. Este sensor consta de un acelerómetro y un giroscopio, de 6 grados de libertad, esto quiere decir que tiene un acelerómetro y un giroscopio en los ejes x, y y z. El sensor debe ser configurado para que su respuesta sea en mm/s.

Tabla 17. Especificaciones del sensor de vibraciones MPU6050

Característica	Magnitud
Voltaje de alimentación (V)	3 - 5
Rango del acelerómetro	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$ g
Bits de salida	16
Temperatura de operación (°C)	-40 a 85

Fuente: Elaboración propia (Basado en el fabricante)

4.1.3 Convertidor analógico-digital

De acuerdo con Di Paolo (2013), un convertidor analógico-digital, es un dispositivo electrónico que convierte una señal analógica de voltaje o corriente a un valor digital proporcional a la magnitud del voltaje o la corriente.

Al utilizar convertidores analógico-digital, se pueden conectar sensores analógicos a pines digitales de la placa NodeMCU, reduciendo la cantidad de placas a utilizar, por lo que se disminuye el costo de implementación y el cableado, además que la programación se debe realizar para menos placas.

A pesar de que se tienen variables que pueden ser medidas con sensores digitales, nótese que los sensores seleccionados tienen una salida analógica, por lo tanto, en total se tienen 79 sensores analógicos. El convertidor que se va a utilizar es el ADS1115, este tiene 4 canales de 16 bit. La resolución de este convertidor es la siguiente.

$$Resolución = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}$$

Donde el voltaje máximo para este convertidor es de 5,5 V y el voltaje mínimo es de 2 V y n son los bit, por lo tanto, la resolución es de 0,05 mV. Esto quiere decir que este convertidor detecta cambios de 0,05 mV lo que lo hace sumamente preciso.

Para el sistema de adquisición de datos se requieren 20 convertidores de este tipo.

4.2 Diseño propuesto para el sistema de adquisición de datos

Tomando en cuenta todos los sensores, multiplexores, y convertidores analógico-digital se requieren 2 placas NodeMCU conectadas directamente al servidor, ya que, con el convertidor analógico-digital, se pueden conectar sensores analógicos a pines digitales, y esta placa cuenta con 9 pines de este tipo y en total se requieren 11 pines digitales, esta cantidad lo da el número de multiplexores que se van a utilizar.

Se hará una lectura de los sensores cada 10 s, después de que la placa solicite la lectura de cada sensor por medio de comunicación serial, esta debe contener la variable física de medición, fecha y hora. Para poder enviar la información por WiFi debe solicitar la IP al router de manera que se comunique con el servidor web, una vez dentro de la red, se envía la información por el protocolo de comunicación MQTT y se almacena la información en una base de datos. Para la base de datos se propone utilizar *MySQL*, ya que es de código abierto. La visualización de datos se hará mediante una página web, alojada en el mismo servidor web, el desarrollo de esta se muestra en el capítulo V. En la figura 18 se puede ver el diagrama de secuencia del almacenamiento de datos.

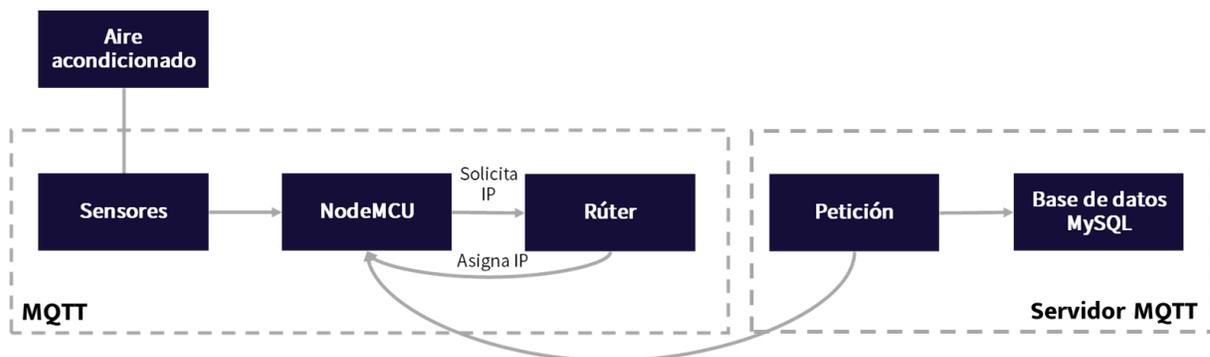


Figura 18. Diagrama de secuencia para el almacenamiento de datos

Fuente: Elaboración propia (Basada en Contreras et al, 2018)

5 Capítulo V. Desarrollo del sistema experto

Un sistema experto es una herramienta que pretende emular a un experto en una aplicación específica, brindando soluciones en distintos aspectos. En este caso, con el fin de detectar fallas en el equipo de aire acondicionado de precisión, de modo que cuando se presente alguna falla de las expuestas en el capítulo III, envíe una alerta a las personas correspondientes.

Para el desarrollo del sistema experto se sigue una metodología que permita definir explícitamente la función de este sistema. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

- Delimitar la funcionalidad del sistema experto: en este caso, es el de dar alertas a las personas correspondientes cuando se detecta algún modo de falla.
- Adquisición de información: reunir toda la información necesaria para determinar los modos de falla, tal como se abordó en el capítulo III.
- Determinar el tipo de sistema experto: para este sistema se decidió desarrollar un sistema experto basado en reglas, debido a la situación actual de que no se tienen datos de operación, además su mantenibilidad es sencilla y en caso de que se expanda el sistema, es sencillo de actualizar cuando haya datos de operación.
- Desarrollo del sistema experto: el sistema experto se desarrolla en el lenguaje de programación *Python*.
- Verificación del sistema experto: se introducen datos de prueba al sistema experto para verificar el correcto funcionamiento.

Un sistema experto basado en reglas tiene la estructura mostrada en la figura 19.

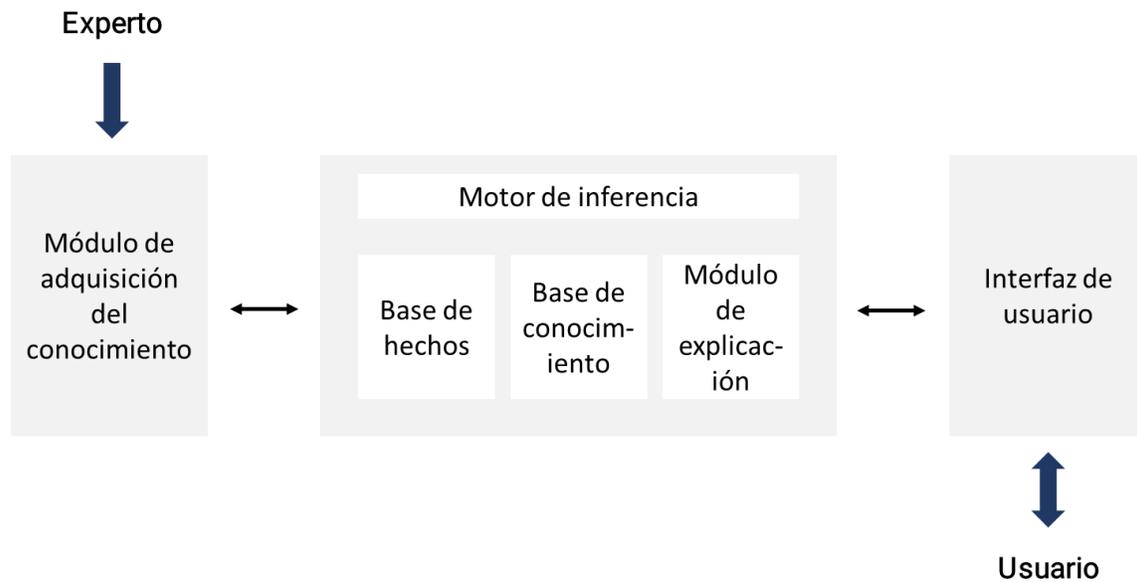


Figura 19. Estructura de un sistema experto basado en reglas

Fuente: Elaboración propia (Basado en Díez, 2010)

El módulo de adquisición del conocimiento es alimentado por la información que brinde el experto, en este caso, lo conforma la información recolectada y analizada en el capítulo III.

La base de hechos está conformada por los datos relevantes del aire acondicionado, pueden ser por datos permanentes, que en este caso son los parámetros que se utilizarán para la programación, principalmente son datos de fabricante, estos datos se caracterizan porque son datos que no cambian, se mantienen constantes. Para este proyecto no hay datos temporales, que vendrían a ser los datos históricos y los datos en tiempo real, una vez que se implemente el sistema de adquisición de datos propuesto en el capítulo IV.

En la base de conocimiento se alberga en forma de reglas la información brindada por el experto, en esta se establece una hipótesis y se le asigna su

respectiva conclusión, las conclusiones son asignadas con base en la información del experto y no en una conclusión lógica.

En el módulo de explicación se genera los diagnósticos de las fallas, aquí son generadas las alertas que llegan a las personas correspondientes vía mensaje *WhatsApp* y correo.

La interfaz es el medio por el cual el sistema experto interactúa con el usuario, esta se desarrolló en el lenguaje de programación *HTML*, *CSS* y *JavaScript*. El desarrollo de la misma se verá en detalle más adelante.

5.1 Programación del sistema experto

La programación del sistema experto se llevó a cabo en el lenguaje *Python* con el editor de código *PyCharm*. El desarrollo del sistema experto se realizó por módulos de manera que la programación sea más ordenada y sencilla de ejecutar.

Se hicieron los siguientes módulos:

- Compresor
- Filtro deshidratador
- Filtro de aire
- Válvula solenoide de cierre
- Válvula de expansión termostática
- Alertas generales
- Correo
- Mensajes

En la figura 20 se observa el árbol del sistema experto, este contiene todos los módulos anteriores, desde aquí se puede acceder a cada módulo en caso de que se requiera alguna modificación o actualización en el futuro.

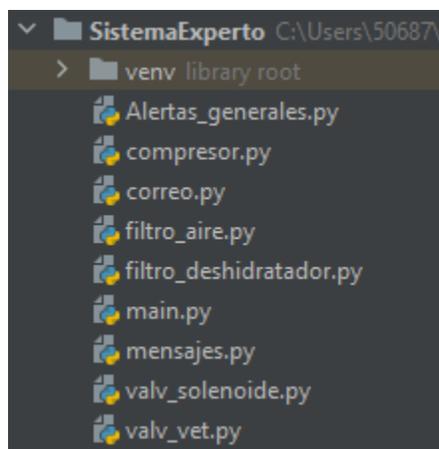


Figura 20. Árbol del sistema experto

Fuente: Elaboración propia (PyCharm)

A todos los módulos se les pasa un archivo .xlsx con datos de prueba, tal como se muestra en la figura 21, sin embargo, cuando se implemente el sistema de adquisición de datos, se debe hacer una consulta a la base de datos por medio de la IP del servidor web donde va a estar alojada de acuerdo con el planteamiento del sistema de adquisición de datos en el capítulo IV.

```
path = r"C:\Users\50687\Documents\Naty\datos_filtro.xlsx"
data_filtro_deshid = pd.read_excel(path)
data_filtro_deshid.index = data_filtro_deshid['Fecha']
data_filtro_deshid = data_filtro_deshid.drop(['Fecha'], axis=1)
```

Figura 21. Código para leer los datos de prueba

Fuente: Elaboración propia (PyCharm)

En la figura 21 se puede observar el código para pasar los datos al sistema experto, para ejecutar este código primero se debe importar la librería Pandas, la cual permite que Python pueda leer los datos en el archivo .xlsx. Primero se le debe pasar la localización del archivo. El método de Pandas .index, permite establecer cuál es la columna con los datos de entrada, en este caso, es la columna que contiene la fecha y hora en la que se hizo la toma de dato, ya que así estará en la base de datos que se desarrolle para el sistema de adquisición de datos. Las líneas

de código de la figura 21 se hizo para todos los módulos antes establecidos, solamente se cambia la localización y nombre del archivo.

A continuación, se describe la lógica de cada uno.

5.1.1 Compresor

Para el compresor se tienen 11 modos de falla de acuerdo con la tabla 6, la marca del compresor es Copeland, modelo ZR81KCE-TF5. Como se ha dicho anteriormente, al no tener datos de operación los umbrales de funcionamiento fueron tomados de la hoja de datos de fabricante (ver anexo 5).

Para desarrollar la programación del compresor, primero se determinaron los parámetros necesarios para monitorear cada modo de falla de la tabla 6. En el anexo 1 se muestra el código completo para el módulo del compresor. A continuación, se explican los parámetros seleccionados por cada modo de falla.

5.1.1.1 Paso de líquido en la línea de succión

Para detectar este modo de falla, el parámetro a monitorear es la temperatura de recalentamiento, la cual de acuerdo con Ospino (s.f) normalmente se encuentra entre 10°C y 20°C, de 5°C a 8°C corresponde al recalentamiento útil y de 12°C a 15°C corresponde al recalentamiento ambiental. En la tabla 3, se puede observar que la medición de ambos recalentamientos se realizó por aparte, es importante mantener el recalentamiento ambiental monitoreado, ya que un recalentamiento ambiental mayor a 15°C perjudica la eficiencia del sistema, ya que disminuye la temperatura de subenfriamiento, degrada el aceite del sistema y aumenta la temperatura de descarga en el compresor.

Si el recalentamiento total es menor que 10°C, la probabilidad de que el refrigerante esté en estado de mezcla a la salida del evaporador aumenta, por lo que habría líquido en la línea de succión, y esto puede dañar el compresor, por lo tanto, si la temperatura de recalentamiento se encuentra entre 10°C y 20°C se asegura que no haya líquido en la línea de succión.

El sistema experto, como se muestra en la figura 22, primero determina el recalentamiento útil y ambiental, la suma de estos corresponde al recalentamiento total, este número lo guarda en una variable llamada “temperatura_recalentamiento_total” y hace una comparación con el parámetro establecido, en este caso con 10°C, en caso de que esa temperatura sea menor a 10°C, envía una alarma por correo y por mensaje WhatsApp a las personas correspondientes. En el apéndice A, se muestra el código en PyCharm, sin embargo, no se muestra el request a la base de datos ya que esta aún no está desarrollada, sino que lee los datos directamente de un archivo .xlsx.

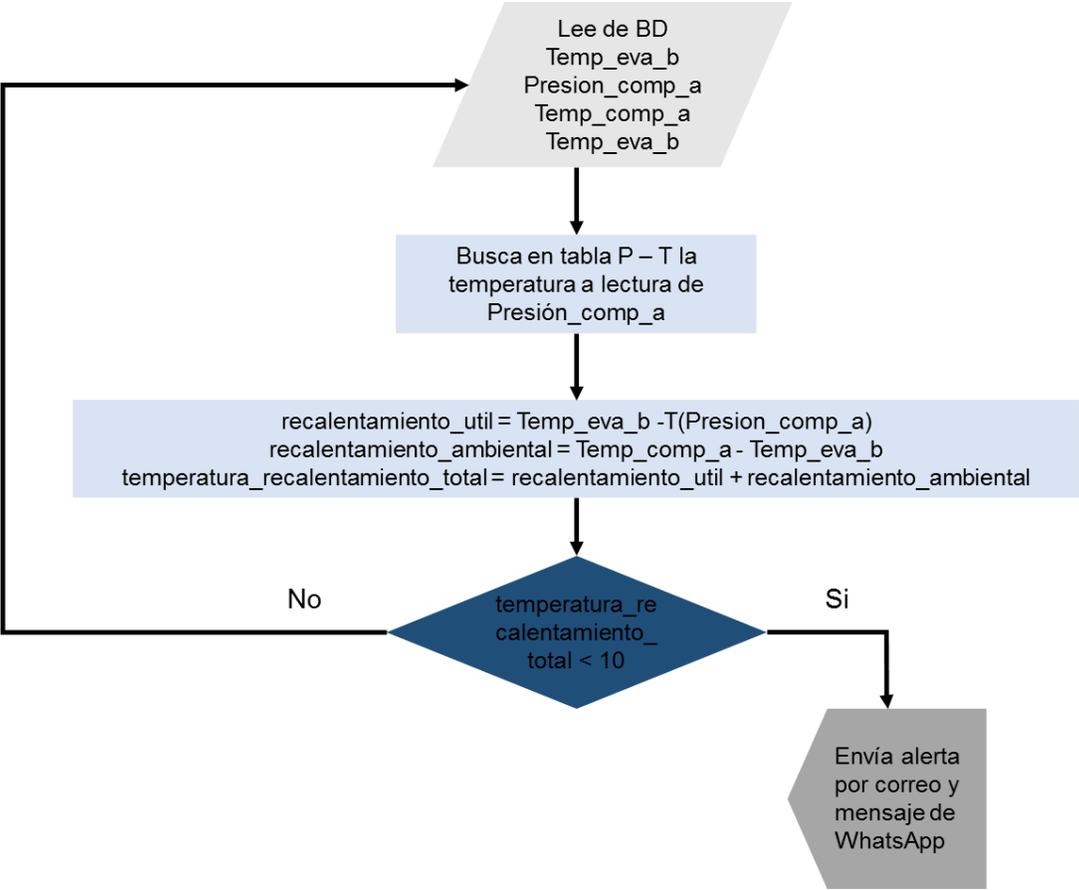


Figura 22. Diagrama de flujo para el modo de falla de líquido en la línea de succión

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

Para este código la alerta que se envía corresponde a una alerta del compresor, la cual avisa que hay líquido en la línea de succión y también envía otra alerta

correspondiente a la válvula de expansión termostática, avisando que el recalentamiento total no es el adecuado.

5.1.1.2 Resistencia de cárter dañada

Para la resistencia del cárter se tiene un modelo ZR22-81, con un voltaje de 230 V, de una fase. Para detectar esta falla, primero se debe descartar la presencia de líquido en el cárter, por lo que se debe asegurar que la temperatura de recalentamiento total esté entre 10°C y 20°C, y que el voltaje sea distinto de 230 V, en este caso se envía la alerta a las personas correspondientes. Este voltaje se determinó con la hoja de datos de la resistencia, al no tener datos de operación, la única comparación segura que se puede hacer es determinar si el voltaje en la línea de alimentación de la resistencia es distinto de 230 V, como se dijo anteriormente estos datos deben ser verificados cuando se implemente el sistema de adquisición de datos y actualizar este parámetro en el código del sistema experto.

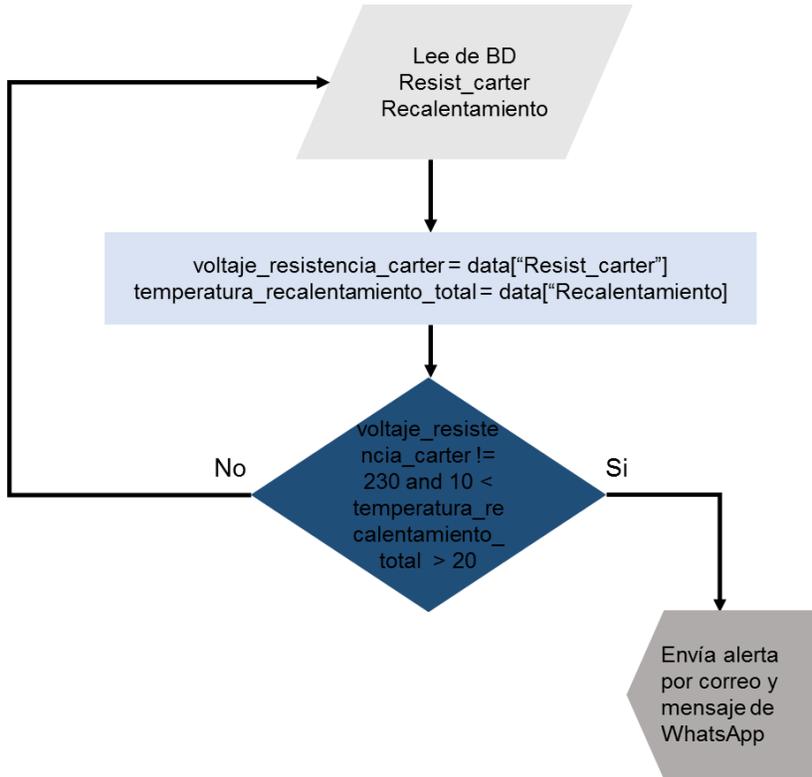


Figura 23. Diagrama de flujo para el modo de falla Resistencia del cárter dañada

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.1.3 Sobrecarga del compresor

Para detectar la sobrecarga del compresor, se monitorea la presión de descarga, para verificar que el compresor no está sufriendo un sobre esfuerzo por aumento de refrigerante innecesario, de acuerdo con el fabricante, la presión máxima admitida por el compresor a la descarga es de 29 bar, por lo que, si la presión de descarga sobrepasa este umbral, se envía la alerta a las personas correspondientes. Además, también se solicita verificar el estado del presostato de alta, ya que este presostato debería desconectar el compresor a 26 bar, por lo que indirectamente también se está verificando el funcionamiento del presostato.

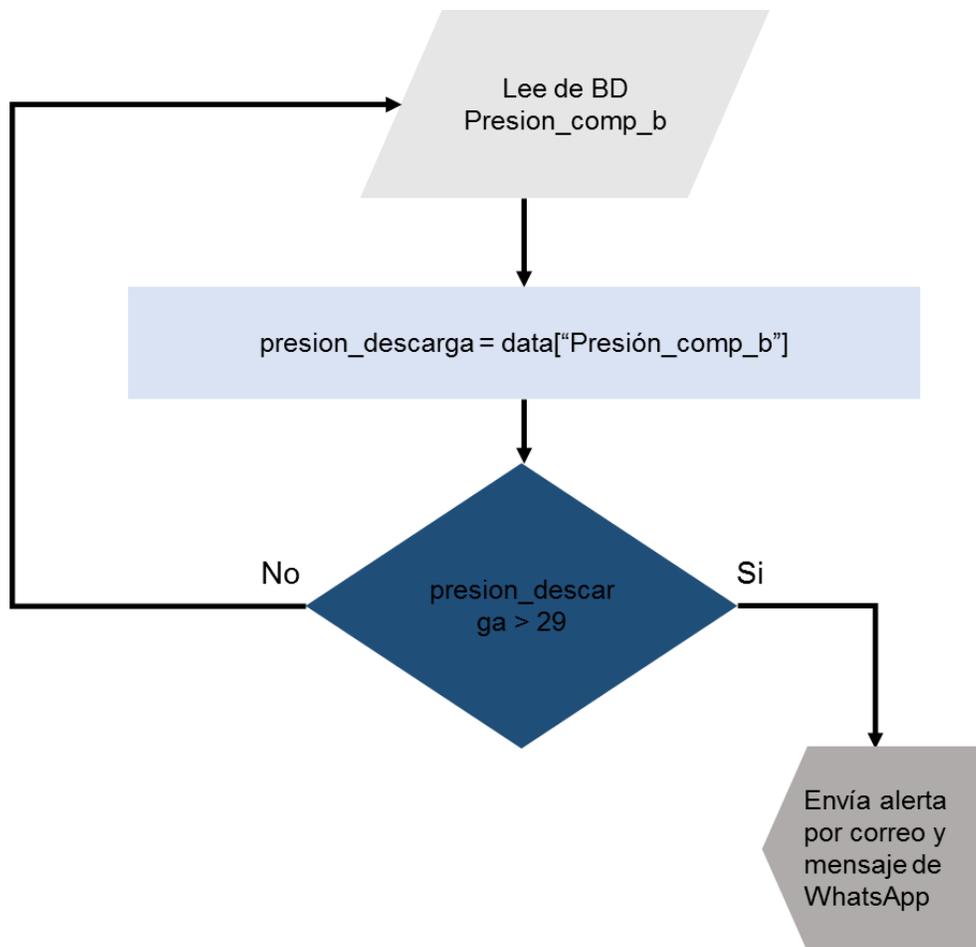


Figura 24. Diagrama de flujo para el modo de falla de sobrecarga del compresor

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.1.4 Presión de condensación muy alta o baja

Para detectar el modo de falla de presión de condensación muy alta se monitorea la presión de descarga del compresor, y esta se compara con la presión a la que está configurado el presostato de alta, ya que al llegar a esta presión el presostato debería desconectar el compresor y conectarlo hasta que se normalice la presión.

Para detectar el modo de falla de presión de condensación muy baja, se compara con una presión de 18,75 bar esta presión se determinó mediante la tabla temperatura – presión del refrigerante R407C (ver anexo 6) a una temperatura de 45°C, la cual se tomó como temperatura de condensación, ya que con esta temperatura fue seleccionado el compresor, de igual forma este dato debe ser actualizado cuando se implemente el sistema de adquisición de datos.

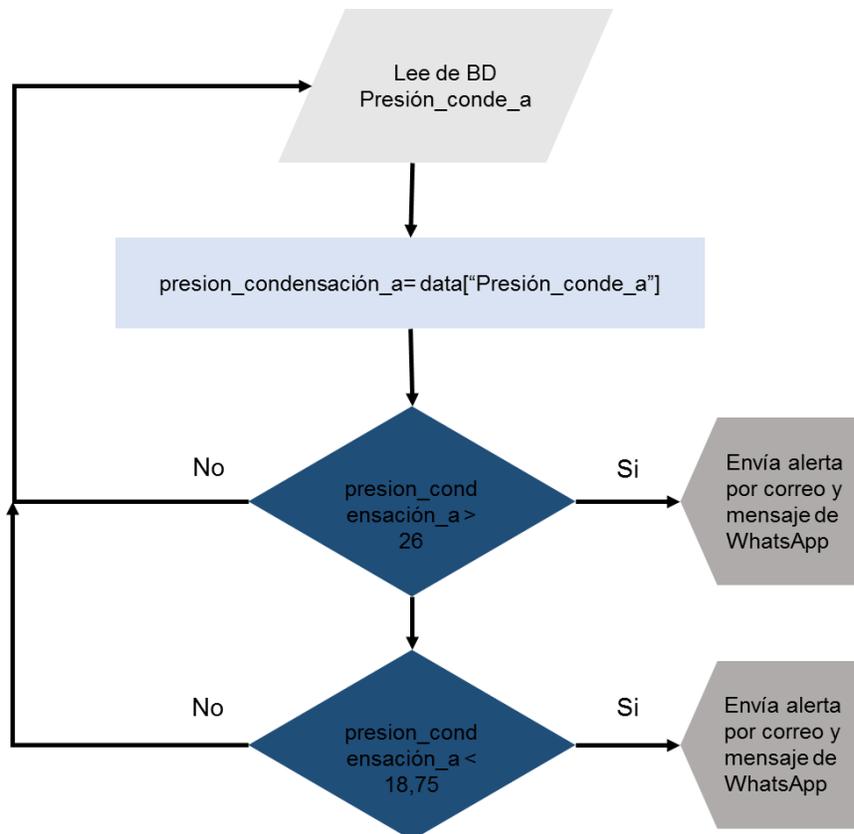


Figura 25. Diagrama de flujo para el modo de falla presión de condensación muy alta o baja

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.1.5 Vibraciones

Para detectar si hay vibraciones anormales, líquido en el cárter y/o desgaste en las partes móviles se monitorean las vibraciones del compresor, se hace una comparación con la vibración normal indicada por el fabricante (ver anexo 5) el cual establece una vibración normal de 0,0762 mm (pico-pico). Este no es un análisis de vibraciones, para hacer un análisis de este tipo, se debe someter al compresor a distintas condiciones de operación y hacer el análisis respectivo del espectro, sin embargo, una comparación como la que se hizo para detectar dichos modos de falla brinda buena información acerca de los modos de falla antes descritos al conocer el parámetro de fabricante.

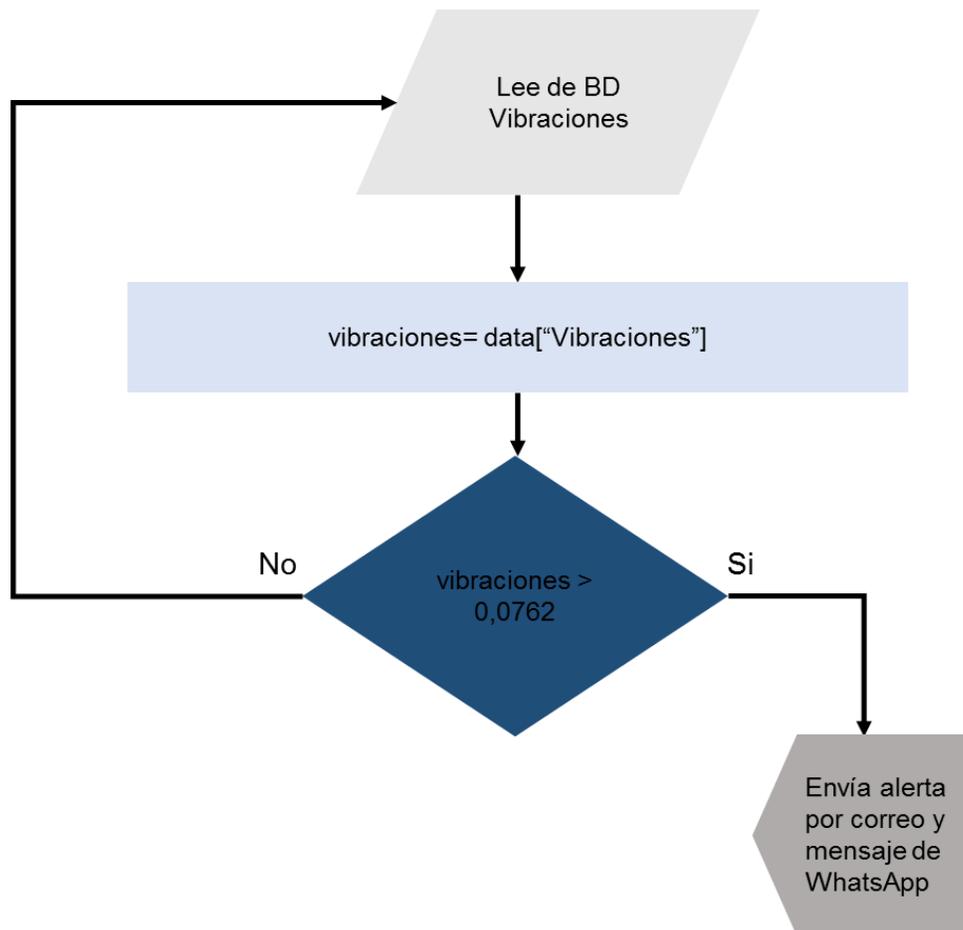


Figura 26. Diagrama de flujo para los modos de falla por vibraciones

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

Nótese que el sensor que se va a utilizar para hacer la medición debe ser configurado para que su respuesta sea de mm/s, por lo que se debe hacer la conversión a mm, que es la unidad en la que se tiene el parámetro que da el fabricante. Integrando se obtiene la siguiente fórmula:

$$D = \frac{v}{rpm \times 52,36 \times 10^{-6}}$$

Fuente: Gestión del Mantenimiento con tecnologías de control

- v: velocidad en mm/s.
- rpm: las revoluciones del compresor, en este caso se debe utilizar 3500 rpm, ya que el compresor es hermético no se le puede colocar un tacómetro en el eje.

Por la posición en la que se debe colocar el sensor en el compresor, la señal que se debe convertir es la proveniente del eje z.

5.1.1.6 Humedad en el sistema

Para detectar este modo de falla se verifica que la caída de presión en el filtro deshidratador no sea mayor a 0,7 bar, la explicación del código se hace en el módulo del filtro deshidratador.

5.1.1.7 Presión en la línea de succión muy alta

Para detectar una presión alta de succión se monitorea la presión a la entrada del condensador y se compara con la presión a la que está configurado el presostato de baja, la cual es de 2,8 bar, en caso de sobrepasar esta presión se envía una alerta a las personas correspondientes, también se recomienda verificar el presostato de baja, ya que si sobrepasa esa presión el presostato debe desconectar el compresor, por lo que indirectamente también se monitorea el funcionamiento del presostato de baja.

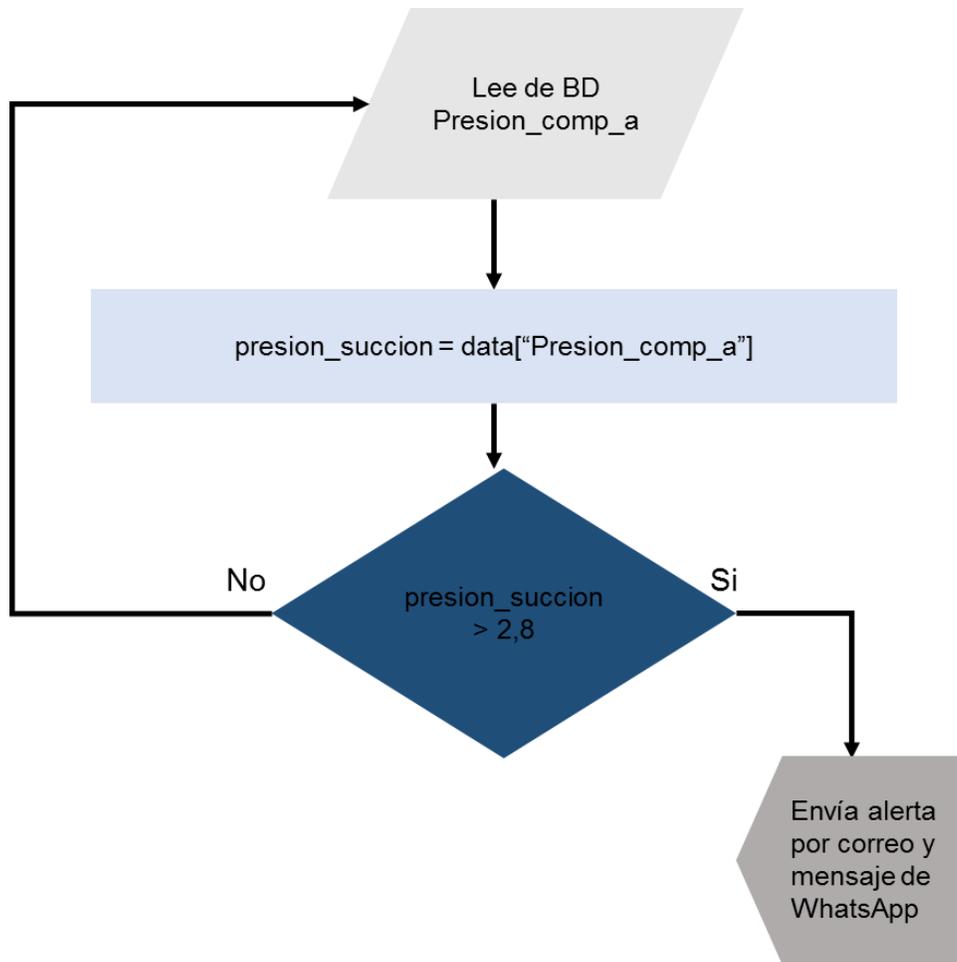


Figura 27. Diagrama de flujo para el modo de falla presión de succión muy alta

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.1.8 Motor quemado

Para detectar una falla en el compresor debido al motor quemado, se monitorea la corriente y el voltaje de cada línea, de modo que, si hay una pérdida de fase en el motor, la corriente deja de circular por el bobinado, por lo que la corriente sería igual a 0, sin embargo, el voltaje se mantiene. La lógica que se sigue es que, si la corriente en las líneas del motor es igual a 0 y el voltaje igual a 230 V, envíe una alerta indicando que el motor se ha quemado a las personas correspondientes.

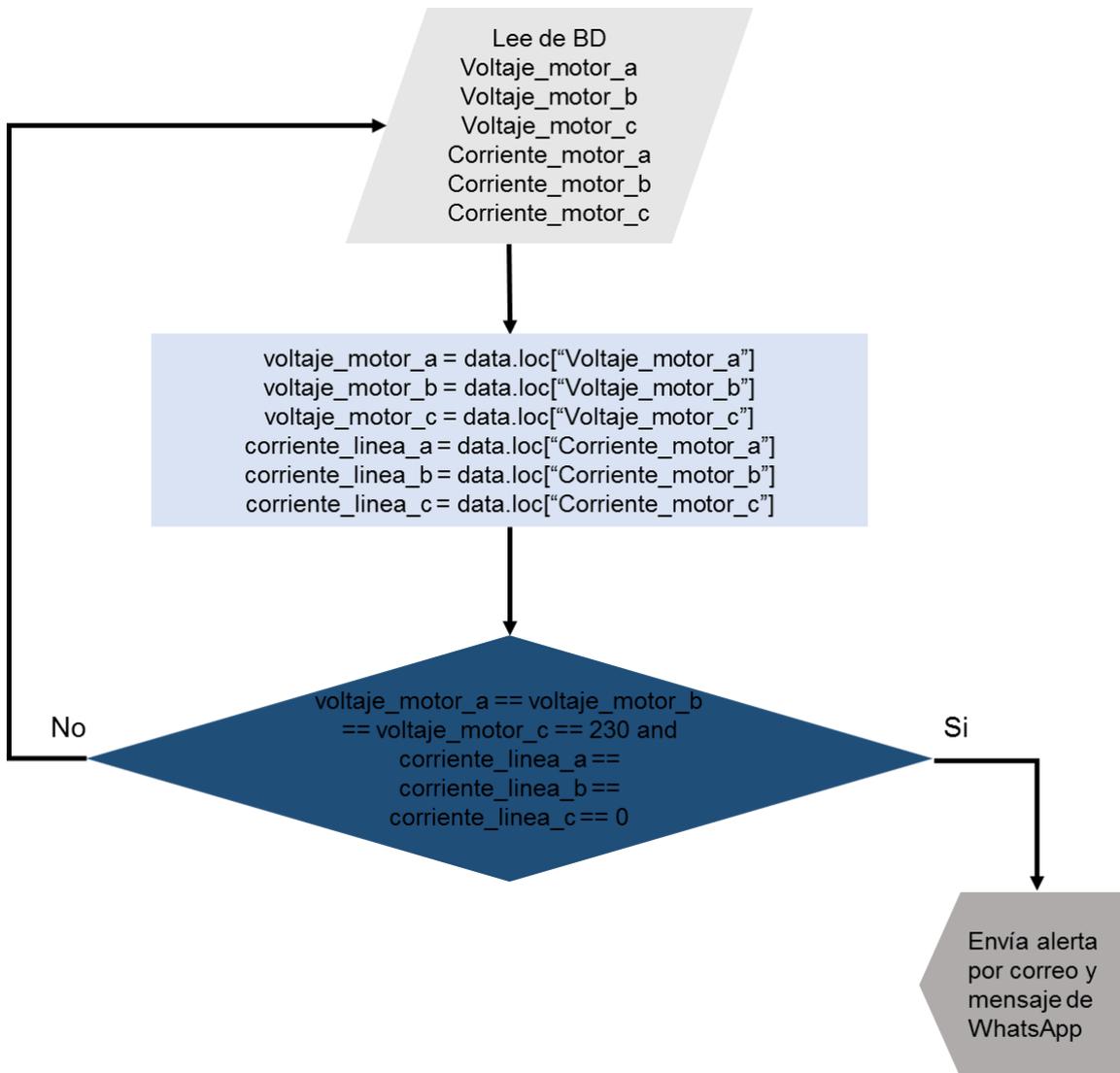


Figura 28. Diagrama de flujo para el modo de falla motor quemado

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.1.9 Elevado consumo de corriente del compresor

Para detectar un elevado consumo de corriente, se monitorea la corriente en las líneas del motor del compresor, si esta es mayor de 25,2 A (ver anexo 5) se envía una alerta sobre un alto consumo de corriente a las personas correspondientes. Este parámetro es muy importante que sea actualizado cuando se implemente el sistema de adquisición de datos propuesto, ya que la corriente que consume el compresor es afectada directamente por la condición de carga en la que se

encuentre el sistema de aire acondicionado, por lo que es esperado que este no sea un solo parámetro, sino un rango de funcionamiento normal.

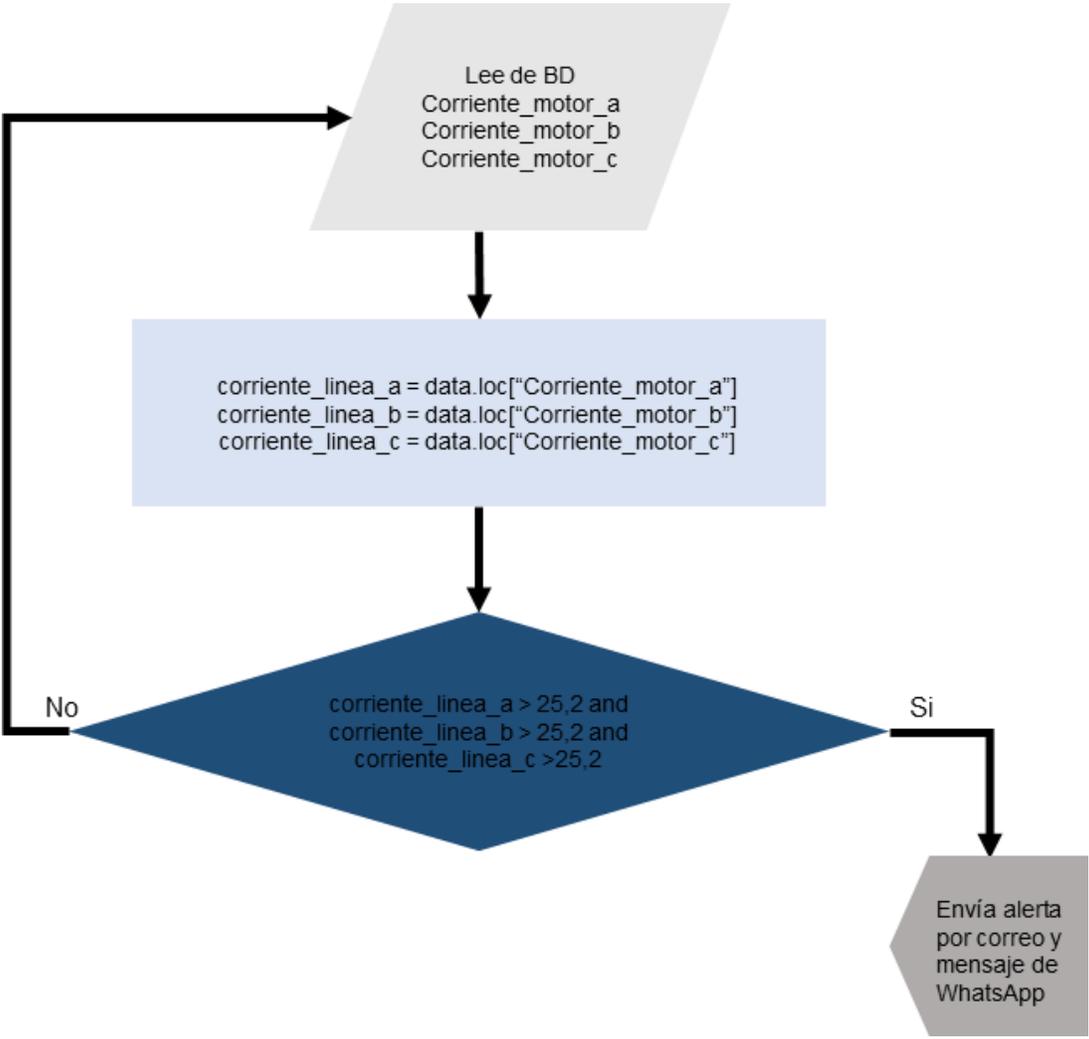


Figura 29. Diagrama de flujo para el modo de falla por elevado consumo de corriente del compresor

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.2 Filtro deshidratador y filtro de aire

Para los filtros, se utilizó un algoritmo capaz de predecir cuando estos se van a saturar con base en el comportamiento que ha tenido. El filtro deshidratador instalado es marca Castel, modelo 4316/M12S, cuyo diferencial de presión máximo

es de 0,7 bar y el filtro de aire instalado es tipo G4, cuyo diferencial de presión máximo es de 2 mbar, de acuerdo con la hoja de datos de fabricante (ver anexo 7).

De acuerdo con Moreno (2008), los métodos cuantitativos para establecer pronósticos, es una técnica utilizada para estimar valores futuros de alguna variable de interés, específicamente los modelos cuantitativos causales requieren de alguna otra variable que se relacione de manera causa efecto con la variable que se desea predecir, una vez se identifican las variables, se desarrolla un modelo estadístico que las describe, el modelo de regresión lineal simple es el modelo utilizado para realizar esta predicción.

La predicción del filtro deshidratador y del filtro de aire se hace de la misma forma, lo único que cambia es el valor de la presión diferencial permitida. A continuación, se describe el programa para el filtro deshidratador. En el apéndice B y C se muestra el código completo para el filtro deshidratador y el filtro de aire respectivamente.

Para desarrollar el modelo de regresión lineal, primero se debe importar las librerías de *Pandas* y *Sklearn*. De *Sklearn* se importa el modelo de regresión lineal y el método para determinar la correlación de los datos.

Para este modelo, primero se deben analizar los datos de presión aguas arriba y aguas abajo del filtro, en el sistema experto se hace la lectura de estas presiones por separado y se declaran los ejes y y x , aquí ambas presiones van a estar en función del tiempo, por lo que se hacen dos regresiones lineales, una para la presión aguas arriba del filtro y otra para la presión aguas abajo.

Al modelo de regresión lineal importado se le debe indicar el porcentaje de los datos que van a ser usados para el entrenamiento, de acuerdo con Hamedani (2019), normalmente se usa 20% de los datos como entrenamiento.

Por el comportamiento de los filtros, se puede decir que la tendencia de la presión va a ser a aumentar en función del tiempo, ya que con el tiempo los filtros se saturan, otro escenario es que esta presión se mantenga constante, por esta razón para asegurar que la predicción va a ser lo más precisa posible, se solicita

hacer la predicción si y solo si el índice de correlación es mayor que 0,9. Si el índice es mayor de 0,9 se hace la predicción y con ambas predicciones de presión aguas arriba y aguas abajo del filtro se genera una nueva variable de presión diferencial, la cual se compara con 0,7 bar para el caso del filtro deshidratador y 0,002 bar para el caso del filtro de aire. La predicción se solicita a una semana de tiempo, este parámetro se puede cambiar a conveniencia.

5.1.3 Válvula solenoide de cierre

Para la válvula solenoide de cierre, como se observa en la tabla 8 se tienen 3 modos de falla, la válvula modelo 1078/M12S, es normalmente abierta, su bobina es 9120/RD6 de 220 V. Para la programación de los modos de falla para esta válvula en el sistema experto, primero se determinaron los parámetros necesarios según datos de fabricante (ver anexo 8). En el apéndice B se muestra el código completo del módulo de la válvula solenoide de cierre.

5.1.3.1 Voltaje de la bobina incorrecto

Este modo de falla se detecta con el monitoreo del voltaje en la línea de alimentación de la bobina, si este es diferente de 220 V, se envía una alerta a las personas correspondientes, cuando se implemente el sistema de adquisición de datos se espera que el parámetro de comparación sea un rango de voltajes, por lo que se debe actualizar el sistema experto.

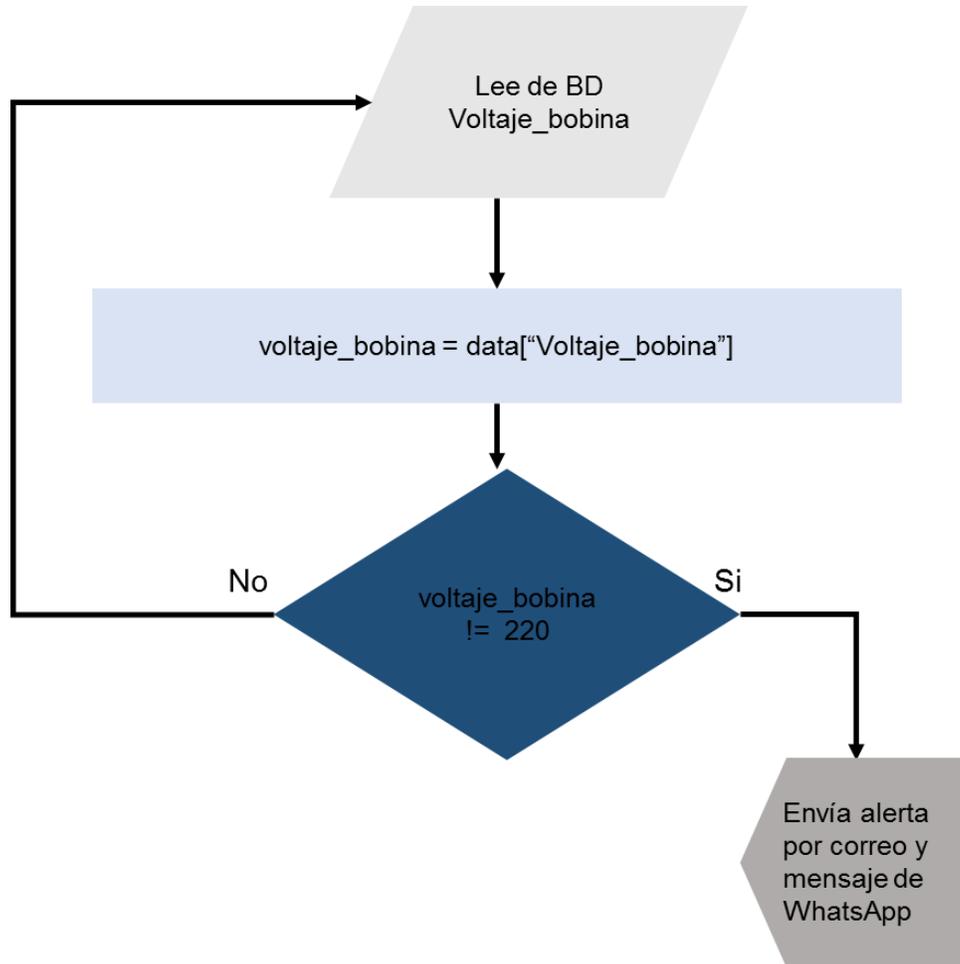


Figura 30. Diagrama de flujo para el modo de falla voltaje de la bobina incorrecto

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.3.2 Presión diferencial muy baja

Para detectar esta falla, se monitorea la presión adelante y atrás de la válvula solenoide de cierre y se determina una presión diferencial y se compara con 0,05 bar, la cual es la presión diferencial mínima admitida por la válvula para cerrar de acuerdo con el fabricante Castel.

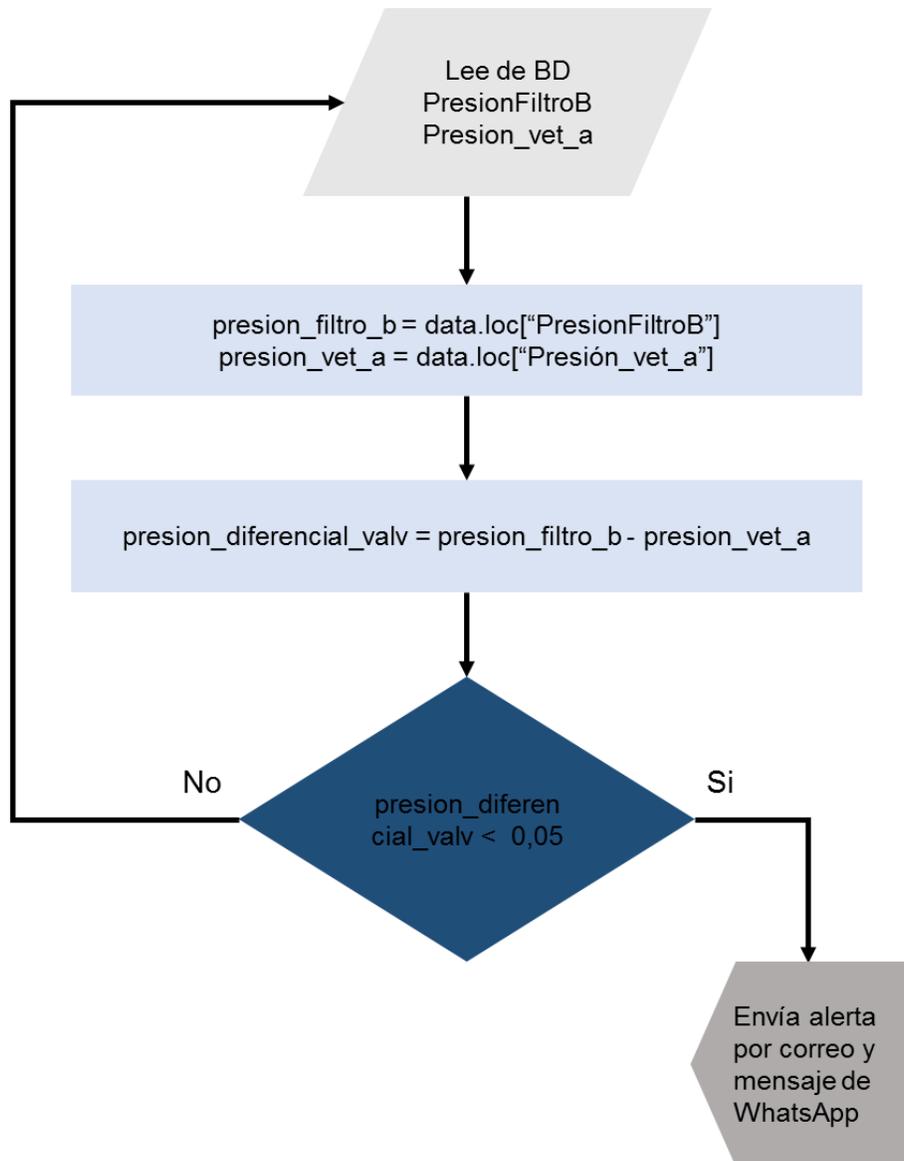


Figura 31. Diagrama de flujo para el modo de falla presión diferencial muy baja

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.3.3 Bobina quemada

Este modo de falla se detecta de manera similar al modo de falla del motor quemado, se monitorea voltaje y corriente en la línea de alimentación, si la bobina está quemada, la corriente que fluye por el bobinado es igual a 0, mostrando 0 en la lectura del sensor y el voltaje será de 220 V.

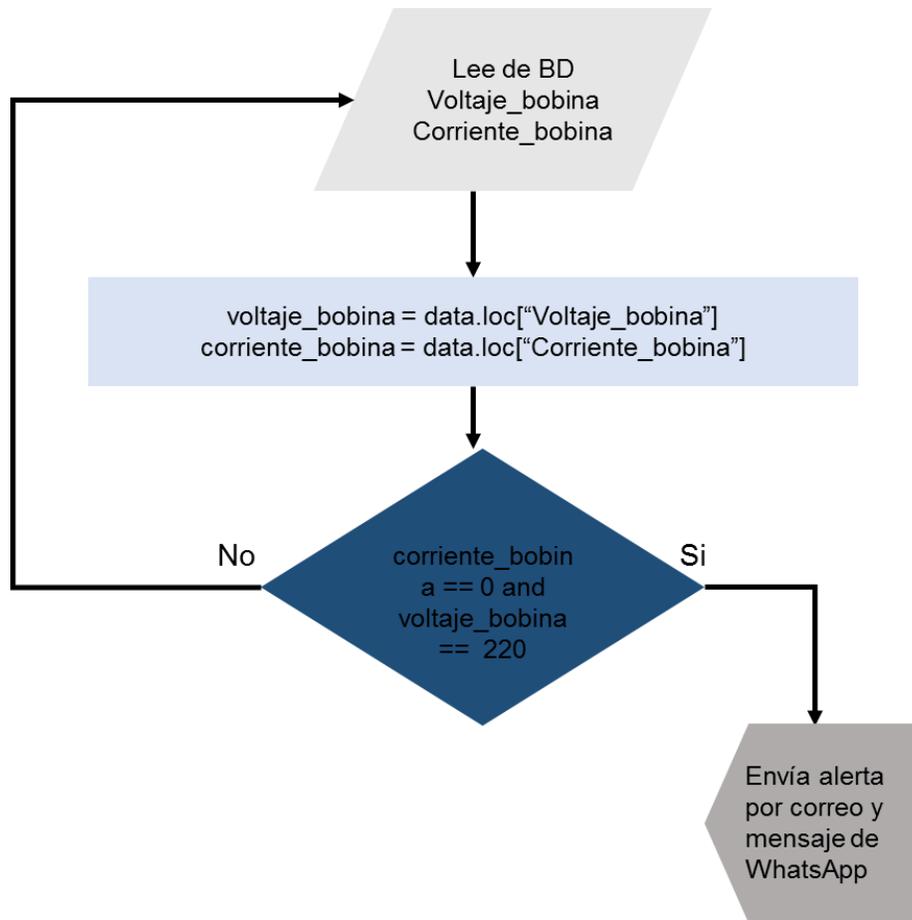


Figura 32. Diagrama de flujo para el modo de falla bobina quemada

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.4 Válvula de expansión termostática

A la válvula de expansión termostática se le identificaron 5 modos de falla, tal como se puede observar en la tabla 9, que pueden ser monitoreados. La válvula instalada es modelo TDEZ 8, marca Danfoss. Para desarrollar la programación de este módulo, primero se deben obtener los parámetros necesarios.

La hoja de datos (ver anexo 9), indica la temperatura máxima y mínima a las cuales puede trabajar la válvula, con estas temperaturas se determinaron las presiones aguas arriba y aguas abajo de la válvula respectivamente, de la tabla presión – temperatura del refrigerante R407C, se debe indicar que estas presiones son una aproximación, pues no se cuenta con los datos de fabricante ni de operación.

La temperatura máxima a la que trabaja la válvula es de 15°C, a esta temperatura le corresponde una presión de 8,97 bar, y la temperatura mínima es de -10°C, le corresponde una presión de 4,05 bar. A continuación, se muestra la lógica de cada modo de falla.

5.1.4.1 Caída de presión excesiva en el evaporador

Para detectar esta falla se debe monitorear presión y temperatura aguas arriba y aguas abajo de la válvula, y se compara con la presión y temperatura determinadas anteriormente. Si la presión en el evaporador cae de manera excesiva debido a un mal funcionamiento de la válvula de expansión, la calidad de mezcla que llega al evaporador es muy baja, habiendo más refrigerante en estado de vapor saturado, por lo que la remoción de calor del centro de datos se vuelve menos eficiente.

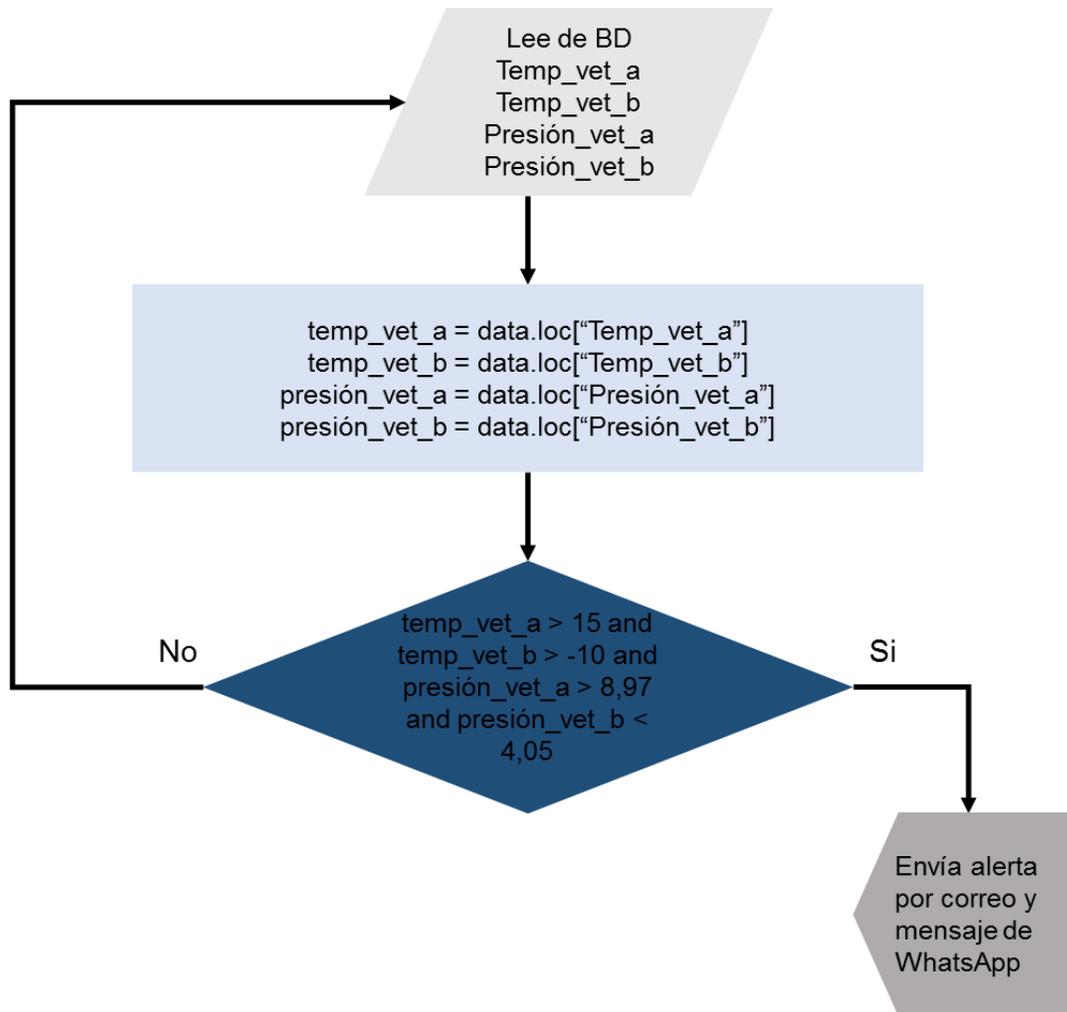


Figura 33. Diagrama de flujo para el modo de falla caída de presión excesiva en el evaporador

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.4.2 Insuficiente subenfriamiento

Para detectar este modo de falla, el parámetro que debe ser monitoreado es la temperatura de subenfriamiento, de acuerdo con Ospino (s.f) normalmente se encuentra entre 5°C y 12°C, de los cuales de 3°C a 6°C corresponden al subenfriamiento en el condensador y de 2°C a 6°C corresponden al subenfriamiento adicional, en la tabla 4 se puede observar el método que utiliza el sistema experto para determinar la temperatura de subenfriamiento total.

Es importante mantener monitoreado el subenfriamiento debido a que una temperatura de subenfriamiento fuera de los rangos anteriores disminuye la

eficiencia del sistema, ya que, al haber menor subenfriamiento, la calidad del refrigerante que llega al evaporador disminuye, habiendo más refrigerante en estado de vapor saturado y menos refrigerante líquido subenfriado, lo que a su vez disminuye la capacidad de remoción de calor del evaporador, elevando la temperatura del centro de datos.

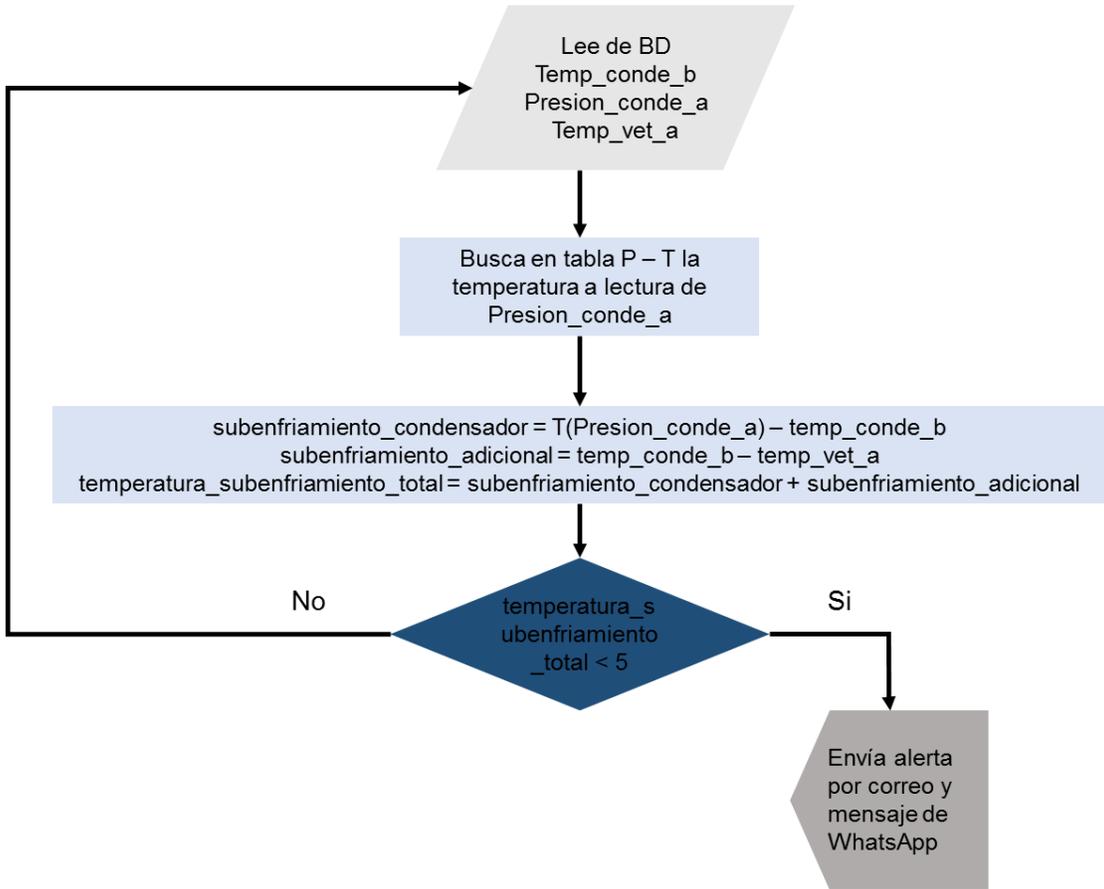


Figura 34. Diagrama de flujo para el modo de falla subenfriamiento insuficiente

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.4.3 Caída de presión menor que la de la capacidad de la válvula de expansión y/o válvula obstruida

Para detectar estos modos de falla se monitorea que la presión aguas arriba y aguas abajo de la válvula no sobrepase el rango de 8,97 bar a 4,05 bar respectivamente, en caso de que se sobrepase hacia arriba o hacia abajo este

rango, el sistema envía una alerta indicando que la presión diferencial está fuera de este rango y solicita verificar que la válvula no esté obstruida.

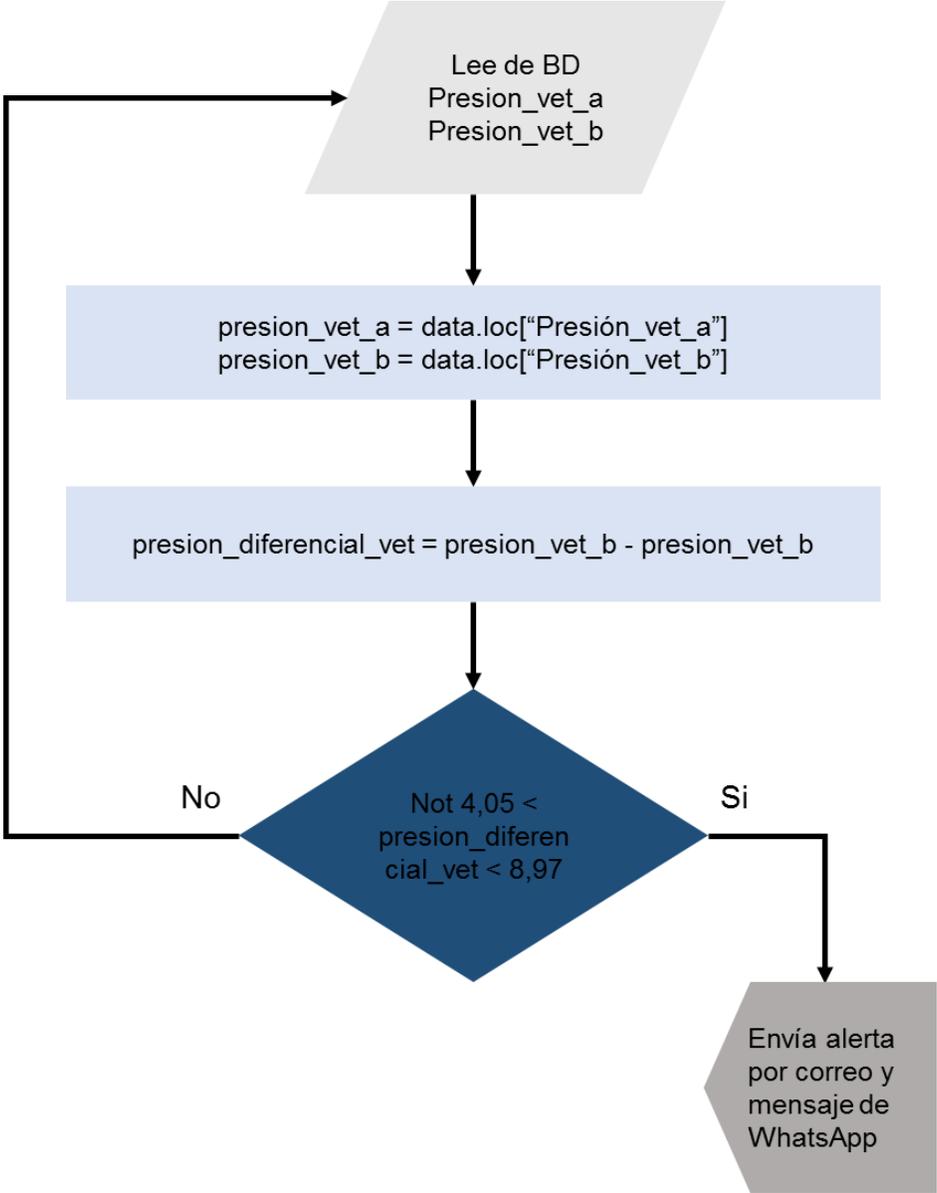


Figura 35. Diagrama de flujo para el modo de falla caída de presión menor o válvula de expansión obstruida

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.4.4 Poco recalentamiento

Para detectar este modo de falla se debe monitorear la temperatura de recalentamiento, este modo de falla se programó en el módulo del compresor, como se puede observar en la sección 5.1.1.1.

5.1.5 Alertas generales

En este módulo se desarrolló la programación del monitoreo de los componentes de las tablas 11, 12 y 13. Primero se determinaron los parámetros correspondientes a las variables que se van a monitorear, tales como corriente, voltaje y flujo. En el apéndice E se muestra el código completo para este módulo.

A continuación, se describe el monitoreo de cada componente.

5.1.5.1 Autotransformador

Al autotransformador trifásico, marca Marini, con una potencia de 2,2 KVA, se le monitorea voltaje y corriente del lado de baja y del lado de alta. El voltaje del lado de alta es de 290 V, y es el voltaje normal de operación y el voltaje del lado de baja es de 260 V, el cual es el voltaje utilizado para la deshumidificación.

Con el monitoreo de la corriente y voltaje por fase, se puede alertar cuando se tiene una pérdida de cualquier fase, ya sea de alta o de baja. En la figura 36 se puede observar la lógica para la programación de este componente, para una sola de sus fases, en el apéndice E, se encuentra el código completo.

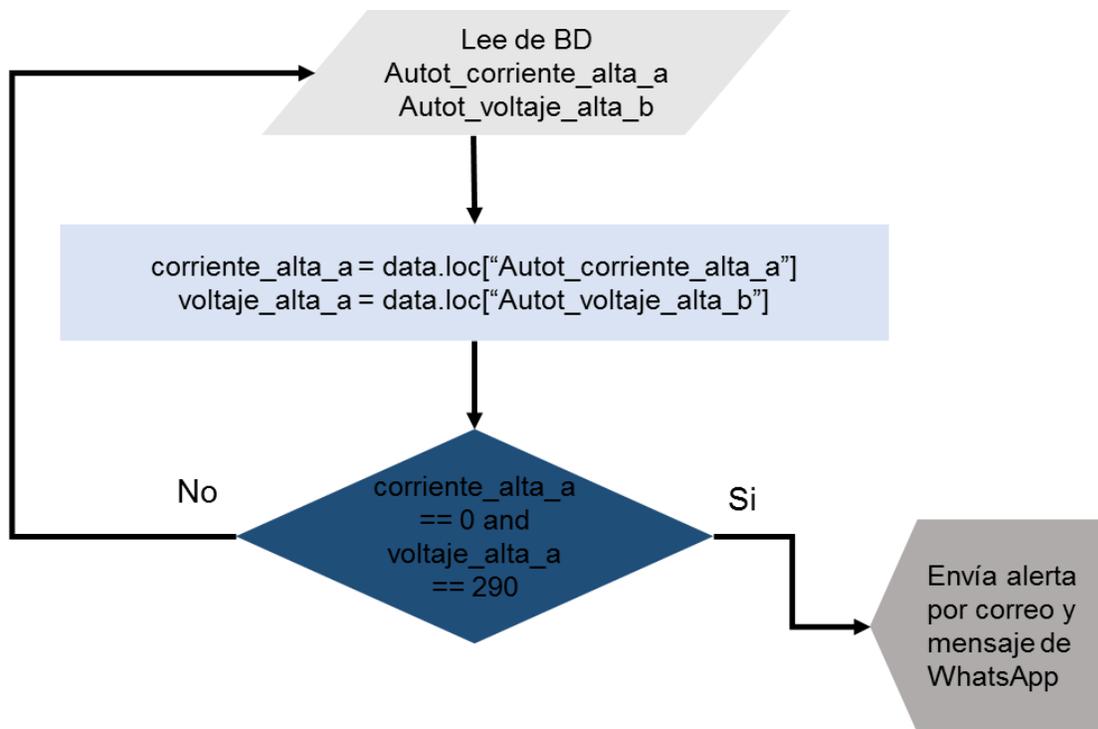


Figura 36. Diagrama de flujo para alertas del autotransformador

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.5.2 Motor del ventilador del evaporador

Para este motor marca Ziehl-Abegg, modelo ZA RH56E-4DK.6N.2R, la alerta que se envía es cuando el motor se ha quemado, para esto es necesario monitorear corriente y voltaje en las líneas de alimentación, en este caso, si se detecta una corriente igual a 0 y un voltaje de 230 V en la misma línea se envía una alerta a las personas correspondientes.

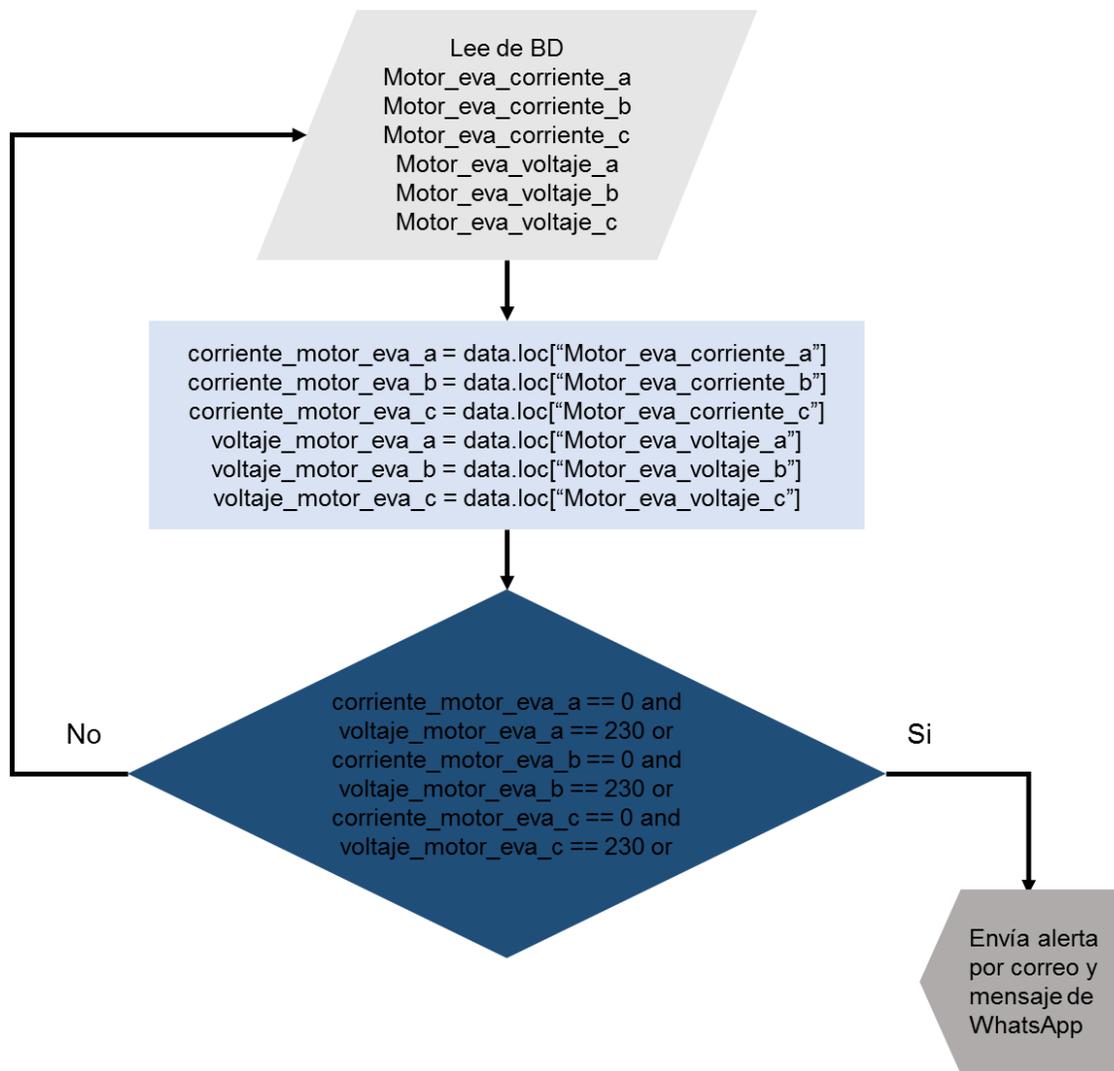


Figura 37. Diagrama de flujo para alerta del motor del ventilador de evaporador

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.5.3 Humidificador

El humidificador es del tipo de electrodos sumergidos, este humidificador cuenta con 3 electrodos, a cada línea de alimentación de los electrodos se les mide corriente y voltaje. Si se detecta que la corriente es igual a 0 en alguna de las líneas y su respectivo voltaje igual a 230 V, se envía una alerta a las personas correspondientes indicando que alguno de los 3 electrodos se ha quemado.

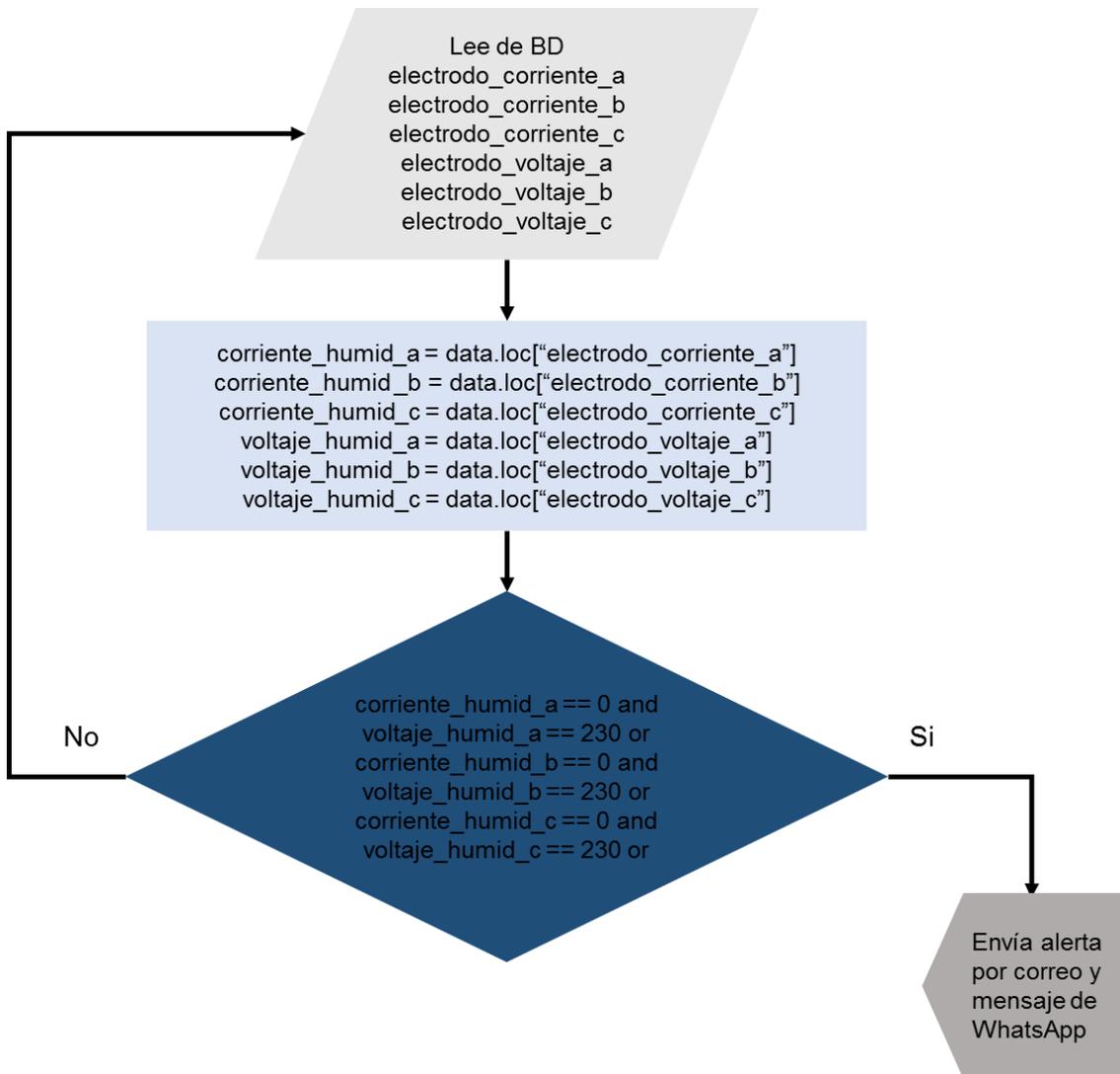


Figura 38. Diagrama de flujo para alerta de electrodo quemado de humidificador

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

Al humidificador también se le monitorea el flujo de agua en la tubería de entrada, en caso de que no haya flujo de agua cuando se requiera que se humidifique el ambiente, se envía una alerta indicando que no hay flujo de agua en la entrada del humidificador a las personas correspondientes.

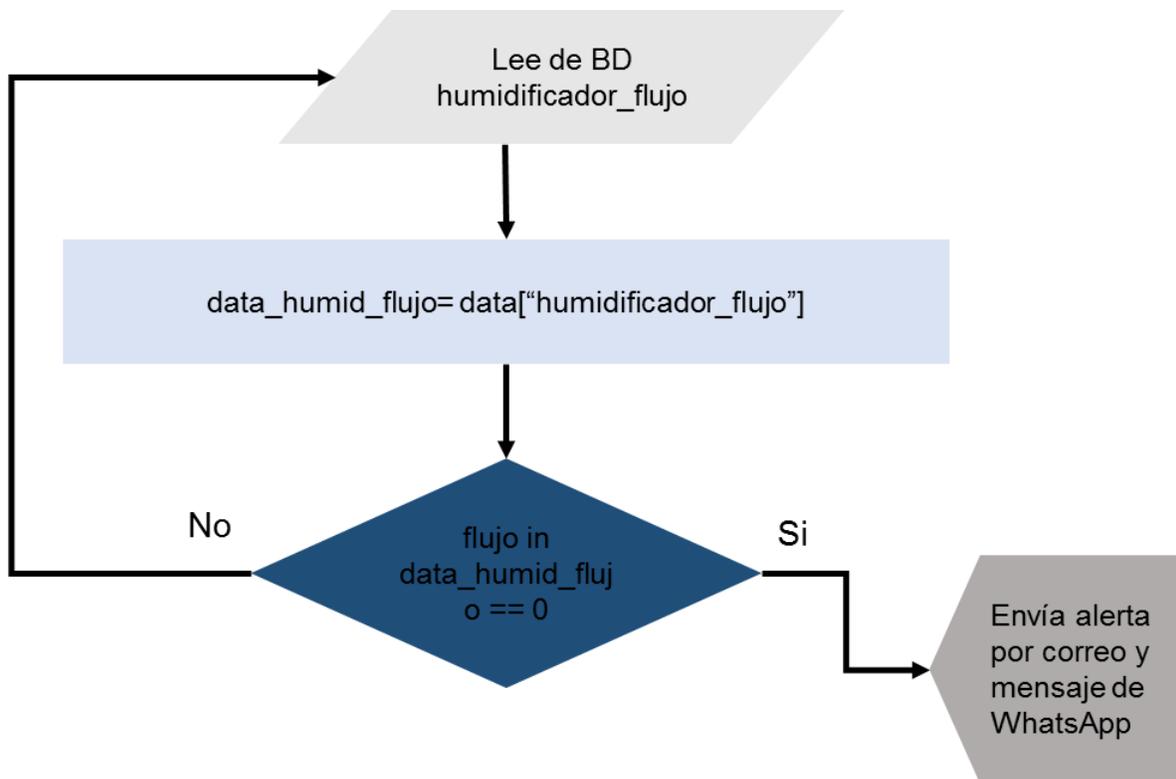


Figura 39. Diagrama de flujo para alerta de humidificador sin flujo de agua

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.5.4 Motor del ventilador del condensador

El condensador consta de dos ventiladores marca Ziehl-Abegg, modelo ZA FE050-6EK.4F.V7, a los cuales se les mide corriente y voltaje para determinar cuando el motor se quema, de igual forma que con el motor del ventilador del evaporador, si la corriente en la línea es igual a 0 y el voltaje igual a 230 V, se envía una alerta indicando que el motor se ha quemado a las personas correspondientes.

En la figura 40 se muestra la lógica solamente para el motor 1, la cual es igual para el motor 2, en el apéndice E se muestra el código completo.

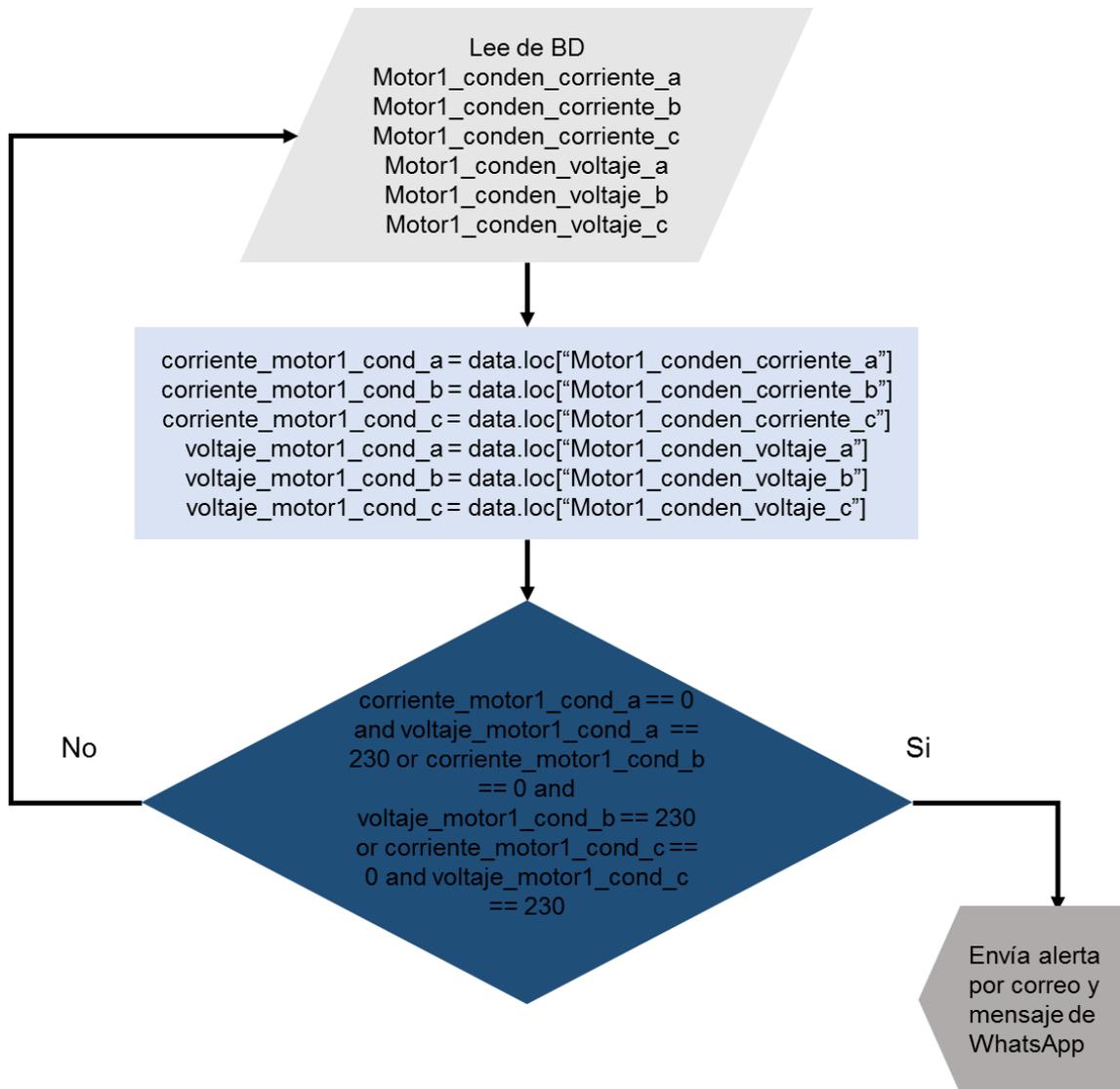


Figura 40. Diagrama de flujo para alerta de motor 1 de ventilador condensador quemado

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.1.5.5 Líneas de alimentación principales y planta de emergencia

A las líneas de alimentación principales y las de la planta de emergencia se les monitorea voltaje y corriente, con el fin de que si hay un corte en el fluido eléctrico y la planta de emergencia no entre en funcionamiento envíe una alerta a las personas correspondientes.

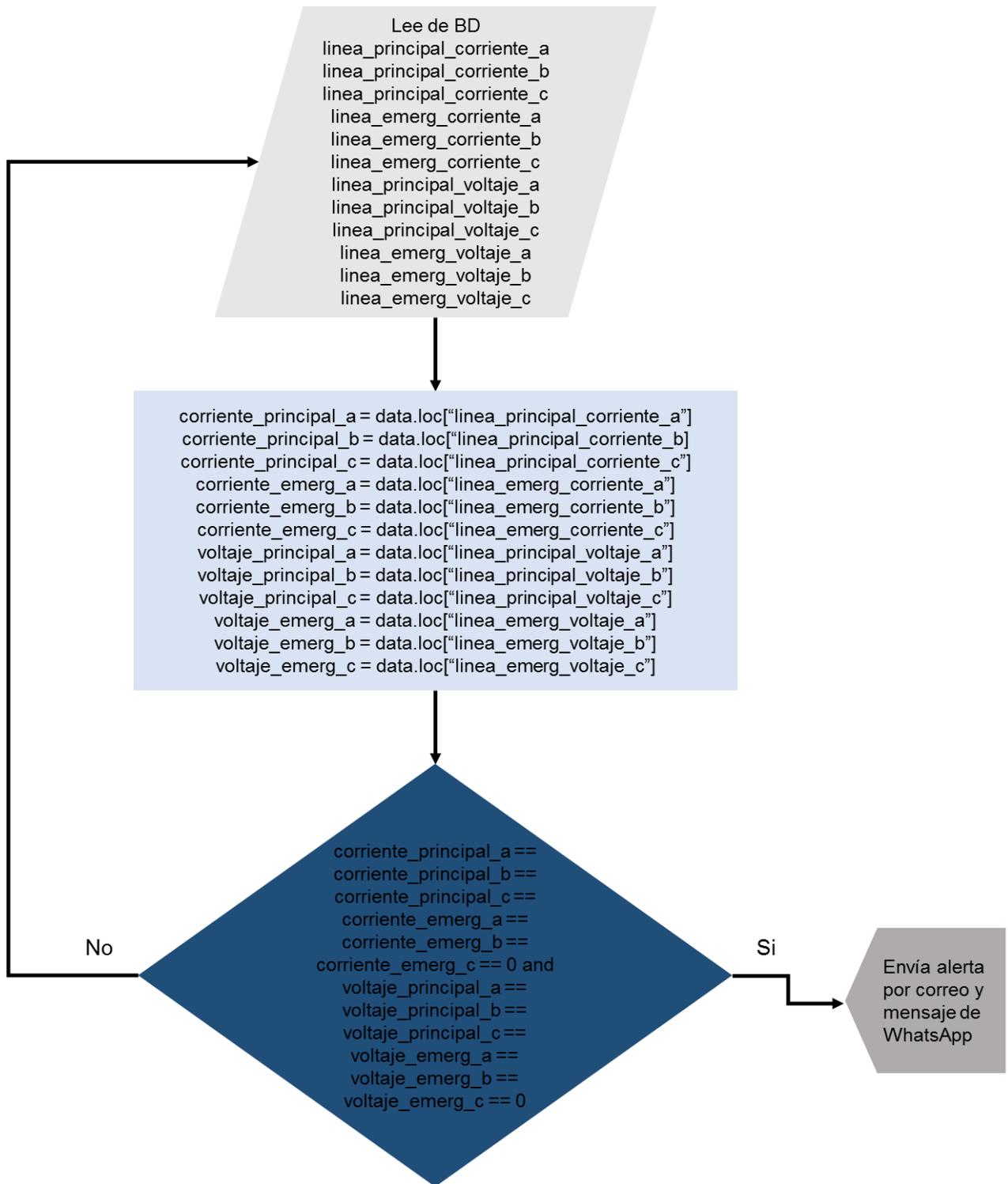


Figura 41. Diagrama de flujo para alerta planta de emergencia no entró en funcionamiento

Fuente: Elaboración propia (Power Point)

5.2 Desarrollo de interfaz web

Para la interfaz del sistema experto, se desarrolló una página web con el fin de que se pueda acceder a los datos desde cualquier lugar por las personas autorizadas a tener acceso a estos.

Una página web está conformada por tres partes, el front-end, back-end y una API. El front-end es la parte gráfica, la cual interactúa con el usuario, aquí se realiza la petición de información, el back-end está alojado en el servidor de la página web, y es donde se programan todas las funciones que se requieran por el front-end.

Para la página web desarrollada el front-end se desarrolló utilizando los lenguajes de *HTML*, *CSS* y *JavaScript* en el editor de código *Visual Studio Code* y el back-end es la programación del sistema experto en *Python*. En esta página se puede tener acceso a datos históricos y en tiempo real del compresor, filtro deshidratador, válvula solenoide de cierre y válvula de expansión termostática. En la figura 42 se puede observar los archivos necesarios con los que se desarrolló la página y su respectiva extensión, aquí también se colocan los archivos *.pdf* correspondientes a las fichas técnicas descargables desde la página web para cada componente.

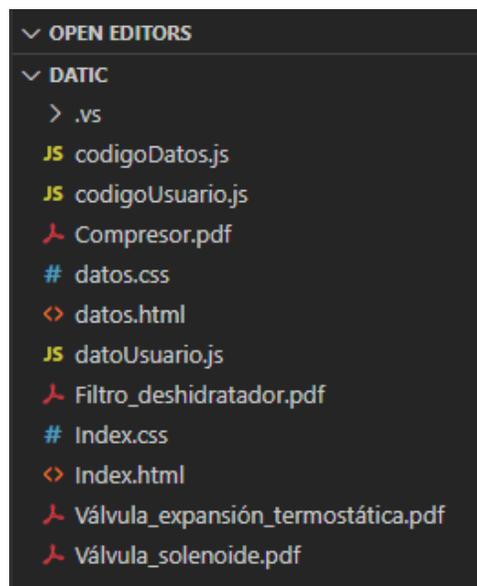


Figura 42. Archivos para el desarrollo de interfaz web

Fuente: Elaboración propia (Visual Studio Code)

El lenguaje *HTML* permite definir los objetos que deben estar en la página web, aquí se le pone el nombre a cada botón y sus etiquetas, con el lenguaje *CSS* se le da formato a cada objeto, se define el tipo de fuente, tamaño, color y se indica la posición en la pantalla. Para el desarrollo de esta página se trabajó con porcentajes con el fin de que esta se ajuste a cualquier tamaño de pantalla. Con el lenguaje *JavaScript*, se programa toda la lógica que hay detrás de cada botón, en este también se desarrolló la lógica para la visualización de los datos en gráfico.

En la figura 43, se puede observar el inicio de la página web, aquí se debe iniciar sesión, por lo que para acceder a los datos se debe tener un usuario y una contraseña.

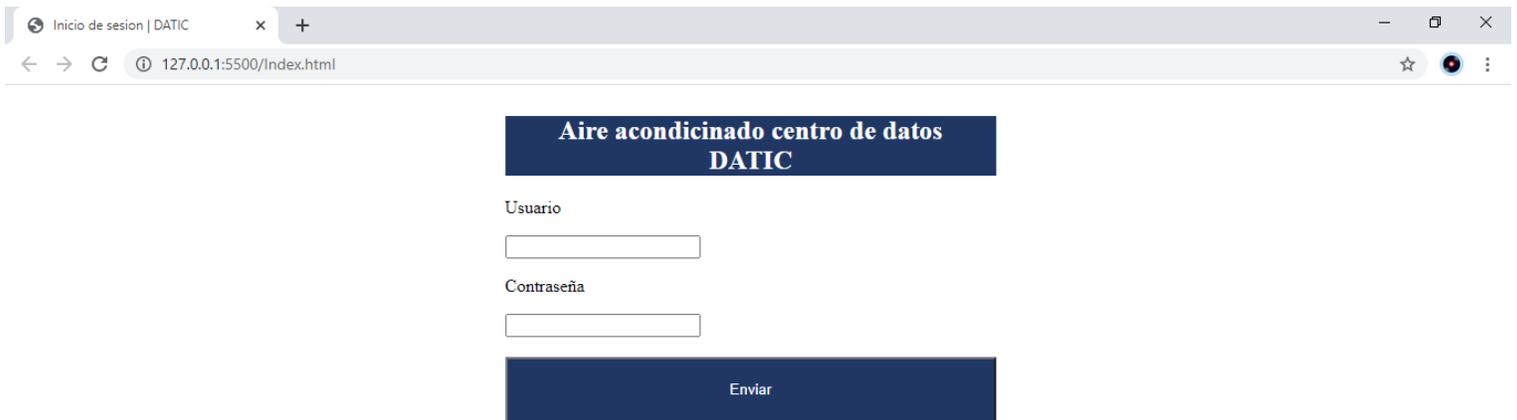
The image shows a web browser window with a single tab titled 'Inicio de sesion | DATIC'. The address bar shows the URL '127.0.0.1:5500/Index.html'. The main content area features a dark blue header with the text 'Aire acondicionado centro de datos DATIC' in white. Below the header, there are two input fields: one labeled 'Usuario' and another labeled 'Contraseña'. At the bottom of the form is a dark blue button with the text 'Enviar' in white.

Figura 43. Pantalla de inicio de la página web para el sistema experto

Fuente: Elaboración propia (*HTML, CSS*)

Para la autenticación de usuario, la lógica desarrollada corresponde al archivo que se observa en la figura 42 llamado `códigoUsuario.js` aquí se indica que debe recorrer el archivo mostrado en la misma figura llamado `datoUsuario.js` en el cual hay un arreglo que consta de un usuario y una clave, si en `códigoUsuario.js` encuentra el usuario y clave introducidos abre la visualización de los datos, la cual se observa en la figura 44, sino encuentra el usuario y la clave se muestra una alerta en pantalla indicando que el usuario y/o contraseña son incorrectos. Los archivos llamados `index.html` e `index.css` corresponden a la programación de la parte gráfica que se visualiza en la figura 43.

En la figura 44, se muestran los componentes y el intervalo de datos, aquí el usuario puede seleccionar cualquiera de los componentes y el intervalo de tiempo en el que desea visualizar los datos, de igual forma los puede ver en tiempo real.

Se debe indicar que esta página web no está alojada en un servidor web, sino que para el desarrollo de este proyecto se alojó en un servidor local, por lo que no se puede acceder por otro usuario en otro PC diferente donde se encuentra el servidor local. De igual forma los datos en tiempo real no existen porque el sistema de adquisición de datos no se ha implementado, sino que se ha desarrollado una lógica de programación que permita simular la visualización de datos en tiempo real, agregando un dato nuevo cada 10 s, el cual es el intervalo de tiempo propuesto en el sistema de adquisición de datos para cada sensor. La programación de esta lógica se encuentra en el archivo `codigoDatos.js` para todos los intervalos de tiempo.

En los archivos `datos.html` y `datos.css` se encuentra la programación de la parte gráfica mostrada en la figura 44.



Figura 44. Pantalla 2 de página web, visualización de datos

Fuente: Elaboración propia (HTML, CSS, JavaScript)

En la figura 44, también se muestra un gráfico con los datos el filtro deshidratador de 1 año se debe indicar que estos no son datos reales, sino un conjunto de datos que permiten simular la visualización de datos una vez que se tenga implementado el sistema de adquisición de datos. Además, si se presiona el botón “Descargar datos técnicos”, se descarga la ficha técnica para cada componente mostradas en los apéndices del H al K.

La página web debe ser actualizada una vez que se implemente el sistema de adquisición de datos, y enlazar la página con los datos reales que brinden los sensores instalados en el equipo. El código completo se muestra en los apéndices de L a R.

6 Análisis financiero

Para efectos del análisis financiero, se consideran los costos de la implementación del sistema de adquisición de datos, tanto el costo de los sensores y demás componentes electrónicos como la instalación de estos. En la tabla 18 se muestran los costos de los componentes electrónicos necesarios para el proyecto.

Tabla 18. Costo de los componentes del sistema de adquisición de datos

Componente	Código	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo de envío (\$)	Costo total (\$)	Costo total (€)
Sensor de presión	HPT300-C07BAE6S3X2001	10	37	110	480	289401,60
Sensor de temperatura	5024 EGR 10K Ohm NTC	7	19	35	168	101290,56
Sensor de corriente	SCT-013	28	16,95		474,6	286145,83
Sensor de voltaje	ZMPT101B	29	5,95		190,08	114603,03
Convertidor analógico-digital	ADS1115	20	5,95	17,53	119	71747,48
NodeMCU		2	9,95		19,9	11998,11
Multiplexor	74LS151	11	1,7		18,7	11274,60
Sensor de flujo	YF-S201	1	10,95		10,95	6601,97
Sensor de vibraciones	MPU6050	4	6,95		27,8	16761,18
Fuente de voltaje		1	120,99		120,99	72947,29
Cable		10 m	0,51		5,1	3074,89
					Total	€ 985 846,55

Fuente: Elaboración propia (Ver anexos11-18)

Al costo de los componentes se les debe sumar la mano de obra de instalación, la cual, de acuerdo con Rubén Rosales, asesor de la compra del equipo de aire acondicionado de precisión del Grupo Electrotécnica, tiene un valor de aproximadamente \$5000.

Para el sistema propuesto, se considera hacer una revisión del estado de los sensores y en general de todos los componentes electrónicos que los constituyen dos veces al año, tercerizando el servicio. De acuerdo con el Ministerio de Trabajo

y Seguridad Social, el salario mínimo para un técnico en electrónica y un técnico en aire acondicionado es de ₡ 11 761,76 diario, por lo tanto, a los costos se les debe sumar ₡ 47 047,04 de mano de obra por mantenimiento, y se propone mantener un presupuesto de ₡ 100 000 anuales para repuestos de sensores. Esto se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Costos por mantenimiento

	Días de trabajo	Costo por día (₡)	Costo total (₡)
Técnico en electrónica	2 por año	11 761,76	23 523,52
Técnico aire acondicionado	2 por año	11 761,76	23 523,52
Repuestos de sensores			100 000,00
		Total	₡ 147 047,04

Fuente: Elaboración propia (Excel)

Tomando en cuenta el costo de instalación y el monto total en las tablas 18 y 19, se tiene una inversión inicial de ₡ 4 147 493,59.

Actualmente el Tecnológico de Costa Rica tiene un contrato con la empresa Soporte Crítico, de Grupo Electrotécnica, esta les brinda los siguientes servicios:

- Visitas mensuales de mantenimiento preventivo en horario de lunes a viernes de 8:00 am a 5:00 pm.
- Atención de averías durante las 24 horas del día, siete días a la semana.

Por este contrato el TEC paga un costo anual de \$17 748 (ver anexo 10), por la atención al aire acondicionado de los centros de datos primario y secundario. Por lo tanto, el costo anual para el aire acondicionado ubicado en el DATIC es de \$ 8 874.

Para realizar el análisis financiero de este proyecto, se toma como saldo positivo \$8 874, los cuales serían ₡5 350 312,08 monto que en realidad es lo que el DAM invierte en el contrato anual que se tiene con Grupo Electrotécnica, con este dato se determinan los flujos de caja mostrados en la tabla 20. Se toma como índice de precios al consumidor (IPC) como 0,45% de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos. La proyección se realiza a 3 años por ser equipos electrónicos.

Tabla 20. Flujos de caja para proyección de 3 años

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
IPC	0,0045	1,0045	1,009	1,014
Inversión inicial	₴ 4 147 493,59	---	---	---
Costo contrato	---	₴ 5 374 388,48	₴ 5 422 866,81	₴ 5 496 405,45
Repuestos	---	₴ 100 450,00	₴ 101 356,08	₴ 102 730,56
Mano de obra	---	₴ 47 258,75	₴ 47 685,04	₴ 48 331,69
Flujo de caja	₴ (4 147 493,59)	₴ 5 226 679,73	₴ 5 273 825,69	₴ 5 345 343,20
TIR	114%			
VAN	₴8 528 156,00			

Fuente: Elaboración propia (Excel)

Como se puede observar en la tabla 20 la tasa interna de retorno (TIR) es del 114%, esto significa que el ingreso de ₴5 350 312,08 es mayor a la inversión inicial de ₴4 147 493,59 por lo que en realidad no hay monto que se deba retornar, es decir no hay saldos negativos, lo cual evidencia la viabilidad positiva del proyecto, sin embargo, para tener un panorama financiero más claro, se decide determinar el valor actual neto del proyecto (VAN).

Para determinar el VAN se toma una tasa de descuento de acuerdo con el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de 12%, dando como resultado un valor de ₴8 528 156,00.

Como se puede observar en la tabla 20 el resultado del VAN positivo indica que el proyecto generará beneficios, esto también indica que el proyecto ha satisfecho la tasa de descuento que se tienen para los proyectos de inversión pública, establecido por el Mideplan, y además de esto genera ganancias en el plazo que se ha proyectado de 3 años, lo que implica que el proyecto es muy viable.

Comparando el costo que se tiene del contrato con Grupo Electrotécnica por mantenimiento preventivo de ¢5 350 312,08 contra la inversión inicial de ¢4 147 493,59 se puede determinar que el ahorro que se tiene por la implementación del proyecto es del 22,5% en el primer año y aproximadamente de un 97% si se cancela dicho contrato con la empresa.

7 Conclusiones

- Con base en el análisis realizado de acuerdo con la afectación de la temperatura y humedad, integridad del equipo y a su capacidad de ser monitoreados, los componentes más críticos a monitorear son el compresor, filtro deshidratador, válvula solenoide de cierre y válvula de expansión termostática, filtro de aire, autotransformador, motores de ventiladores de evaporador, condensador y compresor, humidificador, líneas de alimentación principal y planta de emergencia.
- Se planteó un prototipo para un sistema de adquisición de datos con base en los parámetros necesarios para identificar los modos de falla mostrados en el capítulo III utilizando comunicación WiFi y el protocolo MQTT para enviar los datos. Se requieren 10 sensores de presión, 7 sensores de temperatura, 29 sensores de voltaje, 28 sensores de corriente, 1 sensor de flujo y 4 sensores de vibraciones, conectados 2 placas NodeMCU.
- Se desarrolló un sistema experto en el lenguaje *Python*, capaz de detectar los modos de falla mostrados en el capítulo III para enviar alertas cuando una o varias fallas se presenten. El sistema es capaz de detectar 29 fallas en el equipo de aire acondicionado. Además, se desarrolló una página web utilizando los lenguajes de programación *HTML*, *CSS* y *JavaScript* para mostrar los datos de monitoreo e información importante acerca del estado del equipo de aire acondicionado.
- De acuerdo con el análisis financiero realizado se tiene una inversión inicial de ₡4 147 493,59 comparado con un saldo positivo de ₡5 350 312,08 dando como resultado un VAN de ₡8 528 156,00 mostrando un ahorro del 22,5% en el primer año.

8 Recomendaciones

- Una vez que se implemente el sistema de adquisición de datos, se recomienda acumular datos de al menos un año y realizar el análisis respectivo para confirmar los modos de falla mostrados en el capítulo III y verificar cualquier otra falla o funcionalidad que no haya sido tomada en cuenta.
- Se recomienda un proyecto adicional para la creación de un sistema embebido a la medida, una vez probado el prototipo del sistema de adquisición de datos. Verificar la capacidad de todos los sensores, multiplexores y placa de desarrollo NodeMCU antes de realizar la compra.
- Al momento de implementar el sistema de adquisición de datos, se recomienda comprobar que el equipo de aire acondicionado sea el mismo, esto en caso de que DATIC haga una ampliación del centro de datos.
- Cuando se implemente el sistema de adquisición de datos se recomienda fervientemente actualizar los parámetros de fabricante por parámetros de operación del equipo, esto aumenta la precisión y eficiencia del sistema experto.
- Para implementar el sistema de adquisición de datos se recomienda contratar personal capacitado, ya que para colocar los sensores de presión y de temperatura se debe abrir el equipo de aire acondicionado.
- Se recomienda actualizar la página web y alojarla en un servidor web cuando se implemente el sistema de adquisición de datos. Además, es importante que se desarrolle por especialistas en UX/UI, para asegurar que cumpla con las capacidades de visualización. También se recomienda trabajar con especialistas en ciberseguridad para que los datos no se vean comprometidos.

9 Referencias bibliográficas

- Amendola, L. (2016). Modelos Mixtos de Confiabilidad. PMM Institute for learning.
- Anandan, S. S., & Ramalingam, V. (2008). Thermal management of electronics: A review of literature. *Thermal science*, 12(2), 5-26.
- Ashby, I. (2006). Sensores para estudio de mecánica ventilatoria. Universidad de la República de Montevideo. Seminario de Ingeniería Biomédica.
- Ashlock, D., & Warren, A. (2015). Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros. Recuperado 12 de octubre de 2020, de ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf
- ASHRAE, A. H. (2015). HVAC Applications, GA. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- ASHRAE, Inc. (2009). 2009 ASHRAE handbook: fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- Badaró, S., Ibañez, L. J., & Agüero, M. J. (2013). Sistemas expertos: fundamentos, metodologías y aplicaciones. *Ciencia y tecnología*, (13), 349-364.
- Cabrera, L. (2011). Sistemas Basados en Reglas. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Capozzoli, A., & Primiceri, G. (2015). Cooling systems in data centers: state of art and emerging technologies. *Energy Procedia*, 83, 484-493.
- Carrier, C. A. (1999). Handbook of Air Conditioning System Design. New York: Editorial McGraw Hill.
- Contreras, C., Molina, J. A., Osma, P., & Zambrano, D. (2018). Construcción de un sistema de adquisición y transmisión remota de la calidad del agua basado en el Internet de las cosas (IoT) para la acuicultura. In *Innovation in Education and Inclusion: Proceedings of the 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*.

- Datasheet, E. (2015). ESP8266EX Datasheet. Espr. Syst. Datasheet, 1-31.
- Datasheet. (2019). 5024 EGR SERIES TEMPERATURE SENSOR. Recuperado de <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-5024egr-temperature%20sensor-datasheet.pdf>
- Di Paolo Emilio, M. (2013). Data acquisition systems: from fundamentals to applied design.
- Díez, J. J. (2010). Sistemas Inteligentes T6: Sistemas Basados en Reglas. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 622-638.
- García, O. (2011). *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Principios fundamentales*. Ediciones de la U.
- García, O. (2014,). Tendencias del mantenimiento industrial. Recuperado 13 de octubre de 2020, de <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Tendencias-actuales-en-mantenimiento-industrial+97221>
- García, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Diaz de santos.
- Gestión del Mantenimiento con tecnologías de control. Transformación de los Parámetros de Vibración. (2016). *Gestión del Mantenimiento con tecnologías de control*. Recuperado el 23 de junio 2020 de <http://www.ingenieriamantenimiento.org/conversion-de-parametros-de-vibracion/>
- Gómez, M., Bestratén, M., & Gavilanes, C. (2018). Revolución 4.0: El futuro está presente. *Seguridad y Salud en el Trabajo*, 94(Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo (INSSBT)), 6-17. Recuperado de

[https://www.insst.es/documents/94886/175994/N%C3%BAmero+94+\(versi%C3%B3n+pdf\)](https://www.insst.es/documents/94886/175994/N%C3%BAmero+94+(versi%C3%B3n+pdf))

Hamedani, M. (2019). Python for Web Development, Data Science & Automation. Recuperado el 1 de noviembre 2020 de <https://programmingwithmosh.com/tutorials/>

Hernández, L. (2020). NodeMCU y el IoT tutorial paso a paso desde cero. Recuperado 31 de octubre de 2020, de <https://programafacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/>

Koomey, J. (2011). Growth in data center electricity use 2005 to 2010. A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times, 9(2011), 161.

Liang, J., & Du, R. (2007). Model-based fault detection and diagnosis of HVAC systems using support vector machine method. International Journal of refrigeration, 30(6), 1104-1114.

López, J. (1998). La incorporación de los sistemas expertos en el contexto CIM: estudio de la situación española. Dirección y Organización, (19).

Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M. (2004). Interdigital sensors and transducers. Proceedings of the IEEE, 92(5), 808-845.

Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Elsevier.

Moreno, E. (2008). Predicción con series de tiempo y regresión. Panorama, 2(4), 2.

Moya, J., Becerra, A., & Chagoyén-Méndez, C. (2012). Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín. Ingeniería Mecánica, 15(1), 01-09.

Namburu, S. M., Azam, M. S., Luo, J., Choi, K., & Pattipati, K. R. (2007). Data-driven modeling, fault diagnosis and optimal sensor selection for HVAC chillers. IEEE transactions on automation science and engineering, 4(3), 469-473.

- Ospino, A. (s. f.). TEMÁTICA DE REFRIGERACIÓN, CLIMATIZACIÓN, ELECTRICIDAD Y ENERGIA SOLAR. Recuperado 27 de noviembre de 2020, de http://refrigeracionyclimatizaciondelasabana.mex.tl/1037561_VIDEOS-DE-REFRIGERACION-Y-CLIMATIZACION-POR-AREAS-TEMATICAS.html
- Parpala, R. C., & Iacob, R. (2017). Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment. In MATEC Web of Conferences (Vol. 121, p. 02008). EDP Sciences.
- Pita, E. (2002). Acondicionamiento de Aire: Principios y Sistemas. CECSA.
- Rangel, J., Contreras, L., Romero, J., Vite, J., & Rivera, J. (2007, octubre). Sistema de monitoreo de vibraciones para la detección de fallas. Presentado en IEEE 5to Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/275343042_Sistema_de_monitoreo_de_vibraciones_para_la_deteccion_de_fallas
- Rodríguez, D., & Dolado, J. (2007). Redes bayesianas en la ingeniería del software. Cc. Uah. Es, 1-21.
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. UIS Ingenierías, 19(2), 177–191. Recuperado el 06 de julio 2020 en <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- 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. arXiv preprint arXiv:1701.03633.
- Srinivasan, R., Islam, M. T., Islam, B., Wang, Z., Sookoor, T., Gnawali, O., & Nirjon, S. (2017). Preventive maintenance of centralized HVAC systems: use of acoustic sensors, feature extraction, and unsupervised learning. In Proceedings of the 15th IBPSA Conference (pp. 2518-2524).

TEC (2019). Qué es el TEC. Recuperado el 23 de junio 2020 en <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>

Wang, S. K., & Wang, S. K. (2001). Handbook of air conditioning and refrigeration (Vol. 2). New York: McGraw-Hill. Recuperado el 23 de junio 2020 en <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.itcr.ac.cr/content/book/9780070681675>

10 Apéndices

A. Código del módulo del compresor

```
1 import pandas as pd
2 from correo import email_alert
3
4 path = r"C:\Users\50667\Documents\TGF\datos_compresor.xlsx"
5 data_compresor = pd.read_excel(path)
6 data_compresor.index = data_compresor['Hora']
7 data_compresor = data_compresor.drop(['Hora'], axis=1)
8
9 # Paso de líquido en línea de succión
10
11 data_recalentamiento = data_compresor['Recalentamiento']
12 for temperatura_recalentamiento_total in data_recalentamiento:
13     if temperatura_recalentamiento_total < 10:
14         email_alert('Alerta válvula de expansión', 'El recalentamiento es menor que el mínimo aceptado',
15                     'nacalsol@gmail.com')
16         email_alert('Alerta compresor',
17                     'Líquido en la línea de succión, verifique que no hayan ruidos irregulares y/o formación de hielo',
18                     'nacalsol@gmail.com')
19
20 # Resistencia del carter
21 for i in range(len(data_compresor)):
22     voltaje_resistencia_carter = data_compresor.loc[i, 'Resist_carter']
23     temperatura_recalentamiento_total = data_compresor.loc[i, 'Recalentamiento']
24     if voltaje_resistencia_carter != 230 and 10 < temperatura_recalentamiento_total < 20:
25         email_alert('Alerta compresor', 'Resistencia del carter dañada', 'nacalsol@gmail.com')
26
27
28 # Sobrecarga compresor
29
30 data_sobrecarga = data_compresor['Presión_comp_b']
31 for presion_descarga in data_sobrecarga:
32     if presion_descarga > 29:
33         email_alert('Alerta compresor',
34                     'El compresor está operando con sobrecarga, verificar que el compresor no este demasiado caliente y'
35                     'estado del presostato de alta',
36                     'nacalsol@gmail.com')
37
38 # Presion de condensación muy alta y muy baja
39
40 data_presion_condensacion = data_compresor['Presion_conde_a']
41 for presion_condensacion_a in data_presion_condensacion:
42     if presion_condensacion_a > 26:
43         email_alert('Alerta compresor',
44                     'La presion de condensacion muy alta, verificar que el compresor no este caliente',
45                     'nacalsol@gmail.com')
46     if presion_condensacion_a < 18.75:
47         email_alert('Alerta compresor', 'Presion de condensación muy baja, el compresor puede no arrancar',
48                     'nacalsol@gmail.com')
49
50 # Vibraciones
51 data_vibraciones = data_compresor['Vibraciones']
52 for vibraciones in data_vibraciones:
```

```

52 |     if vibraciones > 0.0762:
53 |         email_alert('Alerta compresor',
54 |                    'El compresor vibra mas de lo normal, verifique que no haya refrigerante '
55 |                    'líquido en el carter y descarte desgaste en partes móviles',
56 |                    'nacalsol@gmail.com')
57 |
58 | # Humedad en el sistema esta en filtro deshidratador
59 |
60 | # Presion linea de succion muy alta
61 | data_presion_succion = data_compresor['Presion_comp_a']
62 | for presion_succion in data_presion_succion:
63 |     if presion_succion > 2.8:
64 |         email_alert('Alerta compresor',
65 |                    'La presión de succion esta muy alta, el compresor puede no arrancar',
66 |                    'nacalsol@gmail.com')
67 |
68 |
69 | # El compresor esta encendido por mucho tiempo
70 | for i in range(len(data_compresor)):
71 |     corriente_linea_a = data_compresor.loc[i, 'Corriente_motor_a']
72 |     corriente_linea_b = data_compresor.loc[i, 'Corriente_motor_b']
73 |     corriente_linea_c = data_compresor.loc[i, 'Corriente_motor_c']
74 |     if corriente_linea_a > 21 and corriente_linea_b > 21 and corriente_linea_c > 21:
75 |         email_alert('Alerta compresor', 'El compresor tiene un elevado consumo de corriente',
76 |                    'nacalsol@gmail.com')

```

B. Código del módulo del filtro deshidratador

```
1 import pandas as pd
2 from sklearn.model_selection import train_test_split
3 from sklearn.linear_model import LinearRegression
4 from sklearn.metrics import r2_score
5
6
7 path = r"C:\Users\50687\Documents\TF6\datos_filtro.xlsx"
8 data_filtro_deshid = pd.read_excel(path)
9 data_filtro_deshid.index = data_filtro_deshid['Fecha']
10 data_filtro_deshid = data_filtro_deshid.drop(['Fecha'], axis=1)
11
12
13 Y = data_filtro_deshid[['PresionFiltroA']]
14 X = data_filtro_deshid[['Hora']]
15 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.20, random_state=1)
16
17 regression_model = LinearRegression()
18 regression_model.fit(X_train, y_train)
19
20 y_predict = regression_model.predict(X_test)
21 model_r2 = r2_score(y_test, y_predict)
22 if model_r2 >= 0.9:
23     prediction = regression_model.predict([[250]])
24     predicted_valueA = prediction[0][0]
```

```
25
26 # Filtro B
27
28 Y = data_filtro_deshid[['PresionFiltroB']]
29 X = data_filtro_deshid[['Hora']]
30 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.20, random_state=1)
31
32
33 regression_model = LinearRegression()
34 regression_model.fit(X_train, y_train)
35
36 y_predict = regression_model.predict(X_test)
37 model_r2 = r2_score(y_test, y_predict)
38 if model_r2 >= 0.9:
39     prediction = regression_model.predict([[250]])
40     predicted_valueB = prediction[0][0]
41
42 presion_diferencial = predicted_valueA - predicted_valueB
43 print(presion_diferencial)
44 if presion_diferencial >= 0.7:
45     from correo import email_alert
46     email_alert('Alerta Filtro deshidratador', 'Cambiar filtro deshidratador en 8 dias', 'nacalsol@gmail.com')
47     email_alert('Alerta compresor',
48                 'El filtro deshidratador se satura en 8 dias, '
49                 'verifique no haya humedad en el sistema en el visor de humedad',
50                 'nacalsol@gmail.com')
```

C. Código del módulo del filtro de aire

```
1 import pandas as pd
2 from sklearn.model_selection import train_test_split
3 from sklearn.linear_model import LinearRegression
4 from sklearn.metrics import r2_score
5
6
7 path = r"C:\Users\50687\Documents\TFG\datos_filtro_aire.xlsx"
8 data_filtro_deshid = pd.read_excel(path)
9 data_filtro_deshid.index = data_filtro_deshid['Fecha']
10 data_filtro_deshid = data_filtro_deshid.drop(['Fecha'], axis=1)
11
12
13 Y = data_filtro_deshid[['PresionFiltro_aireA']]
14 X = data_filtro_deshid[['Hora']]
15 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.20, random_state=1)
16
17 regression_model = LinearRegression()
18 regression_model.fit(X_train, y_train)
19
20 y_predict = regression_model.predict(X_test)
21 model_r2 = r2_score(y_test, y_predict)
22 if model_r2 >= 0.9:
23     prediction = regression_model.predict([[250]])
24     predicted_valueA = prediction[0][0]
25
```

```
26 # Filtro B
27
28 Y = data_filtro_deshid[['PresionFiltro_aireB']]
29 X = data_filtro_deshid[['Hora']]
30 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.20, random_state=1)
31
32
33 regression_model = LinearRegression()
34 regression_model.fit(X_train, y_train)
35
36 y_predict = regression_model.predict(X_test)
37 model_r2 = r2_score(y_test, y_predict)
38 if model_r2 >= 0.9:
39     prediction = regression_model.predict([[250]])
40     predicted_valueB = prediction[0][0]
41
42     presion_diferencial = predicted_valueA - predicted_valueB
43     print(presion_diferencial)
44 if presion_diferencial >= 0.002:
45     from correo import email_alert
46     email_alert('Alerta Filtro de aire', 'Cambiar filtro deshidratador en 8 dias', 'nacalsol@gmail.com')
```

D. Código del módulo de la válvula solenoide de cierre

```
1 import pandas as pd
2 from correo import email_alert
3 from filtro_deshidratador import data_filtro_deshid
4
5
6 path = r"C:\Users\50607\Documents\Waty\datos_valv_solenoide.xlsx"
7 data_valv_solenoide = pd.read_excel(path)
8 data_valv_solenoide.index = data_valv_solenoide['Hora']
9 data_valv_solenoide = data_valv_solenoide.drop(['Hora'], axis=1)
10
11
12 data_voltaje_bobina = data_valv_solenoide['Voltaje_bobina']
13 for voltaje_bobina in data_voltaje_bobina:
14     if voltaje_bobina != 220:
15         email_alert('Alerta válvula solenoide de cierre',
16                     'El voltaje en la bobina es incorrecto, la válvula puede no abrir o abrir parcialmente',
17                     'nacalsol@gmail.com')
18
19 for i in range(len(data_filtro_deshid)):
20     presion_filtro_b = data_filtro_deshid.loc[i, 'PresionFiltroB']
21     presion_vet_a = data_filtro_deshid.loc[i, 'Presion_vet_a']
22     presion_diferencial_valv = presion_filtro_b - presion_vet_a
23     if presion_diferencial_valv < 0.05:
24         email_alert('Alerta válvula solenoide de cierre',
25                     'La presión diferencial necesaria para que la válvula solenoide abra es menor, '
26                     'la válvula puede no abrir o abrir parcialmente, verifique estado del filtro deshidratador',
27                     'nacalsol@gmail.com')
```

```
28 # bobina quemada
29 voltaje_bobina = data_valv_solenoide.loc[i, 'Voltaje_bobina']
30 corriente_bobina = data_valv_solenoide.loc[i, 'Corriente_bobina']
31 if corriente_bobina == 0 and voltaje_bobina == 220:
32     email_alert('Alerta válvula solenoide de cierre',
33                 'Bobina de la válvula solenoide quemada',
34                 'nacalsol@gmail.com')
```

E. Código del módulo de la válvula de expansión termostática

```
1 import pandas as pd
2 from correo import email_alert
3
4
5 path = r"C:\Users\50687\Documents\Naty\datos_vet.xlsx"
6 data_vet = pd.read_excel(path)
7 data_vet.index = data_vet['Hora']
8 data_vet = data_vet.drop(['Hora'], axis=1)
9
10 # Caída de presión excesiva en el evaporador
11 for i in range(len(data_vet)):
12     temp_vet_a = data_vet.loc[i, 'Temp_vet_a']
13     temp_vet_b = data_vet.loc[i, 'Temp_vet_b']
14     presion_vet_a = data_vet.loc[i, 'Presion_vet_a']
15     presion_vet_b = data_vet.loc[i, 'Presion_vet_b']
16     if temp_vet_a > 15 and temp_vet_b > -10 and presion_vet_a > 8.97 and presion_vet_b < 4.05:
17         email_alert('Alerta válvula de expansión termostática',
18                     'Caída de presión excesiva en el evaporador, '
19                     'esto puede provocar una temperatura elevada en el centro de datos, '
20                     'verifique recalentamiento en la válvula y ajuste de ser necesario',
21                     'nacalsol@gmail.com')
22
23 # Caída de presión menor que la de la capacidad de la válvula
24
25 presion_diferencial_vet = presion_vet_a - presion_vet_b
26 if not 4.05 < presion_diferencial_vet < 8.97:
27     email_alert('Alerta válvula de expansión termostática',
28                 'La caída de presión de la válvula '
29                 'no corresponde a la caída de presión para la válvula instalada, '
30                 'verifique que la válvula no esté obstruida. '
31                 'Si la válvula fue cambiada verifique que su capacidad sea la correcta para el sistema',
32                 'nacalsol@gmail.com')
33
34
35 # Insuficiente subenfriamiento
36 data_subenfriamiento = data_vet['Subenfriamiento']
37 for temperatura_subenfriamiento_total in data_subenfriamiento:
38     if temperatura_subenfriamiento_total < 5:
39         email_alert('Alerta válvula de expansión termostática',
40                     'Insuficiente subenfriamiento, verifique estado del condensador',
41                     'nacalsol@gmail.com')
```

F. Código del módulo de alertas generales

```
1 import pandas as pd
2 from correo import email_alert
3
4 path = r"C:\Users\50687\Documents\Naty\datos_alertas_generales"
5 data_alertas_gen = pd.read_excel(path)
6 data_alertas_gen.index = data_alertas_gen['Hora']
7 data_alertas_gen = data_alertas_gen.drop(['Hora'], axis=1)
8
9 # Autotransformador
10
11 for i in range(len(data_alertas_gen)):
12     corriente_alta_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_alta_a']
13     voltaje_alta_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_voltaje_alta_a']
14     if corriente_alta_a == 0 and voltaje_alta_a == 290:
15         email_alert('Alerta autotransformador',
16                     'Pérdida de la fase A del lado de alta del del autotransformador',
17                     'nacalsol@gmail.com')
18     corriente_alta_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_alta_b']
19     voltaje_alta_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_voltaje_alta_b']
20     if corriente_alta_b == 0 and voltaje_alta_b == 290:
21         email_alert('Alerta autotransformador',
22                     'Pérdida de la fase B del lado de alta del autotransformador',
23                     'nacalsol@gmail.com')
24     corriente_alta_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_alta_c']
25     voltaje_alta_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_voltaje_alta_c']
26     if corriente_alta_c == 0 and voltaje_alta_c == 290:
27         email_alert('Alerta autotransformador',
```

```
28                     'Pérdida de la fase C del lado de alta del autotransformador',
29                     'nacalsol@gmail.com')
30     corriente_baja_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_baja_a']
31     voltaje_baja_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_baja_b']
32     if corriente_baja_a == 0 and voltaje_baja_a == 260:
33         email_alert('Alerta autotransformador',
34                     'Pérdida de la fase A del lado de baja del del autotransformador',
35                     'nacalsol@gmail.com')
36     corriente_baja_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_baja_b']
37     voltaje_baja_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_voltaje_baja_b']
38     if corriente_baja_b == 0 and voltaje_baja_b == 260:
39         email_alert('Alerta autotransformador',
40                     'Pérdida de la fase B del lado de baja del autotransformador',
41                     'nacalsol@gmail.com')
42     corriente_baja_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_corriente_baja_c']
43     voltaje_baja_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Autot_voltaje_baja_c']
44     if corriente_baja_c == 0 and voltaje_baja_c == 260:
45         email_alert('Alerta autotransformador',
46                     'Pérdida de la fase C del lado de baja del autotransformador',
47                     'nacalsol@gmail.com')
48
49 # Motor ventilador evaporador
50
51 corriente_motor_eva_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_corriente_a']
52 corriente_motor_eva_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_corriente_b']
53 corriente_motor_eva_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_corriente_c']
54 voltaje_motor_eva_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_voltaje_a']
```

```

55     voltaje_motor_eva_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_voltaje_b']
56     voltaje_motor_eva_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor_eva_voltaje_c']
57     if corriente_motor_eva_a == 0 and voltaje_motor_eva_a == 230 or \
58         corriente_motor_eva_b == 0 and voltaje_motor_eva_b == 230 or \
59         corriente_motor_eva_c == 0 and voltaje_motor_eva_c == 230:
60         email_alert('Alerta motor ventilador de evaporador',
61                    'Motor del ventilador del evaporador quemado',
62                    'nacalsol@gmail.com')
63
64     # Humidificador
65     voltaje_humid_a = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_voltaje_a']
66     voltaje_humid_b = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_voltaje_b']
67     voltaje_humid_c = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_voltaje_c']
68     corriente_humid_a = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_corriente_a']
69     corriente_humid_b = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_corriente_b']
70     corriente_humid_c = data_alertas_gen.loc[i, 'electrodo_corriente_c']
71     if corriente_humid_a == 0 and voltaje_humid_a == 230 or \
72         corriente_humid_b == 0 and voltaje_humid_b == 230 or \
73         corriente_humid_c == 0 and voltaje_humid_c == 230:
74         email_alert('Alerta humidificador',
75                    'Electrodo del humidificador quemado',
76                    'nacalsol@gmail.com')

```

```

77
78     data_humid_flujo = data_alertas_gen['humidificador_flujo']
79     for flujo in data_humid_flujo:
80         if flujo == 0:
81             email_alert('Alerta humidificador',
82                        'No hay flujo de agua en la entrada del humidificador',
83                        'nacalsol@gmail.com')
84
85     # Motor ventiladores condensador
86     for i in range(len(data_alertas_gen)):
87         corriente_motor1_cond_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_corriente_a']
88         corriente_motor1_cond_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_corriente_b']
89         corriente_motor1_cond_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_corriente_c']
90         voltaje_motor1_cond_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_voltaje_a']
91         voltaje_motor1_cond_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_voltaje_b']
92         voltaje_motor1_cond_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor1_conden_voltaje_c']
93         if corriente_motor1_cond_a == 0 and voltaje_motor1_cond_a == 230 or \
94             corriente_motor1_cond_b == 0 and voltaje_motor1_cond_b == 230 or \
95             corriente_motor1_cond_c == 0 and voltaje_motor1_cond_c == 230:
96             email_alert('Alerta motor 1 ventilador de condensador',
97                        'Motor 1 del ventilador del condensador quemado',
98                        'nacalsol@gmail.com')
99     corriente_motor2_cond_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_corriente_a']
100    corriente_motor2_cond_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_corriente_b']
101    corriente_motor2_cond_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_corriente_c']
102    voltaje_motor2_cond_a = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_voltaje_a']

```

```

103     voltaje_motor2_cond_b = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_voltaje_b']
104     voltaje_motor2_cond_c = data_alertas_gen.loc[i, 'Motor2_conden_voltaje_c']
105     if corriente_motor2_cond_a == 0 and voltaje_motor2_cond_a == 230 or \
106         corriente_motor2_cond_b == 0 and voltaje_motor2_cond_b == 230 or \
107         corriente_motor2_cond_c == 0 and voltaje_motor2_cond_c == 230:
108         email_alert('Alerta motor 2 ventilador de condensador',
109                    'Motor 2 del ventilador del condensador quemado',
110                    'nacalsol@gmail.com')
111
112     # Lineas principales y planta de emergencia
113     corriente_principal_a = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_corriente_a']
114     corriente_principal_b = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_corriente_b']
115     corriente_principal_c = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_corriente_c']
116     corriente_emerg_a = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_corriente_a']
117     corriente_emerg_b = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_corriente_b']
118     corriente_emerg_c = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_corriente_c']
119     voltaje_principal_a = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_voltaje_a']
120     voltaje_principal_b = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_voltaje_b']
121     voltaje_principal_c = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_principal_voltaje_c']
122     voltaje_emerg_a = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_voltaje_a']
123     voltaje_emerg_b = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_voltaje_b']
124     voltaje_emerg_c = data_alertas_gen.loc[i, 'linea_emerg_voltaje_c']

```

```

125     if corriente_principal_a == corriente_principal_b == corriente_principal_c == \
126         corriente_emerg_a == corriente_emerg_b == corriente_emerg_c == 0 and voltaje_principal_a == \
127         voltaje_principal_b == voltaje_principal_c == voltaje_emerg_a == voltaje_emerg_b == voltaje_emerg_c == 0:
128         email_alert('Alerta planta de emergencia',
129                    'Hubo un corte en el fluido eléctrico y la planta de emergencia no entró en funcionamiento,'
130                    'verifique estado de la planta de emergencia',
131                    'nacalsol@gmail.com')

```

G. Código de módulo de correo y mensaje

```

1  import smtplib
2  from email.message import EmailMessage
3
4
5  def email_alert(subject, body, to):
6      msg = EmailMessage()
7      msg.set_content(body)
8      msg['subject'] = subject
9      msg['to'] = to
10
11     user = "aireacondicionado.cd@gmail.com"
12     msg['from'] = user
13     password = 'vkiwmuuigmohunpp'
14
15     server = smtplib.SMTP('smtp.gmail.com', 587)
16     server.starttls()
17     server.login(user, password)
18     server.send_message(msg)
19
20     server.quit()

```

```

1  import pywhatkit as kit
2  kit.sendwhatmsg('numero_tel', 'mensaje', 'tiempo')

```

H. Hoja de datos compresor

Compresor

- Potencia 7150 W
- 3 fases
- Voltaje 230 V
- Corriente 17,0 A – 21,9 A
- Máxima corriente de operación 25,2 A
- Sonido 75 dBA – 80 dBA
- Vibraciones 2,0 mils – 3,0 mils
- 3500 rpm
- Tubería de succión 7/8 in
- Tubería de descarga 3/4 in
- Peso neto 40 Kg
- Refrigerante R407C

Componentes electrónicos

- Protector interno
35HM400 Sensata
- Resistencia del cárter
ZR22-81



Modelo ZR81KCE-TF5

Contacto

Grupo Electrotécnica
Rubén Rosales

+506 2010 5121

+506 8982 9391

+506 2223 7055



rrosales@grupoelectrotec
nica.com

I. Hoja de datos filtro deshidratador

Filtro deshidratador



- Superficie de filtrado 155 cm²
- Volumen nominal 250 cm³
- PS 45 bar
- TS
 - mín -40 °C
 - máx +80 °C
- TA
 - mín -20 °C
 - máx +50 °C
- Capacidad de flujo 34,9 KW
- Conexión ODS 12 mm
- Caída de presión máxima 0,7 bar
- Peso 640 g



Modelo 4316/M12S

Material higroscópico

20% alúmina activado
80% tamiz molecular

Refrigerante

- HCFC (R22)
- HFC (R32, R134a, R404A, R407C, R410A, R507)
- HFO y mezclas HFO/HFC (R1234yf, R1234ze, R448A, R449A, R450A, R452A)

Contacto

Grupo Electrotécnica
Rubén Rosales

+506 2010 5121
+506 8982 9391
+506 2223 7055

✉ rosales@grupoelectrotecnica.com

J. Hoja de datos válvula solenoide

Válvula solenoide



- PS 45 bar
- TS
 mín -35 °C
 máx +105 °C
- TA
 mín -35 °C
 máx +50 °C
- Capacidad de flujo 37,9 KW
- Conexión ODS 12 mm
- Diferencial de presión mínima 0,05 bar
- Peso 690 g



Modelo
Válvula solenoide 4316/M12S
Bobina 9120/RD6
Conector 9150/R45/R90

Refrigerante

- HCFC (R22)
- HFC (R32, R134a, R404A, R407C, R410A, R507)
- HFO y mezclas HFO/HFC (R1234yf, R1234ze, R448A, R449A, R450A, R452A)

Contacto

Grupo Electrotécnica
Rubén Rosales

+506 2010 5121

+506 8982 9391

+506 2223 7055

✉ rosales@grupoelectrotecnica.com

K. Hoja de datos válvula de expansión termostática

Válvula de expansión termostática



- Temperatura mínima
-10 °C
- Temperatura máxima
+15 °C
- Presión mínima *
4,05 bar
- Presión máxima *
8,97 bar
- Peso 600 g
- Longitud tubo capilar 1,5 m

Refrigerante

- R407C



Modelo TDEZ 8

Contacto

Grupo Electrotécnica
Rubén Rosales

+506 2010 5121
+506 8982 9391
+506 2223 7055



rrosales@grupoelectrotecnica.com

* Tomadas de tabla P-T para establecer parámetros de sistema experto

L. Código página web index.html

```
Index.html X
Index.html > ...
1  <!DOCTYPE html>
2  <html lang="es">
3  <head>
4    <meta charset="UTF-8">
5    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6    <title>Inicio de sesion | DATIC</title>
7
8    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="Index.css" media="all"/>
9
10 </head>
11 <body>
12
13   <br>
14   <div>
15     <div id="titulo">
16       <h2>Aire acondicionado centro de datos <br> DATIC</h2>
17     </div>
18
19     <div id="formInicio">
20
21       <form>
22         <p>Usuario</p>
23         <input type="text" id="TextUsuario">
24         <br>
25         <p>Contraseña</p>
26         <input type="text" id="TextContrasenia">
27         <br>
28         <br>
29         <input type="submit" id="BotonSubmit">
30       </form>
31
32     </div>
33
34   </div>
35   <script src="codigoUsuario.js" type="module"></script>
36
37 </body>
38 </html>
```

M. Código página web index.css

```
# Index.css X
# Index.css > body
1  body{
2    display: grid;
3    grid-template-columns: repeat(3, 33%);
4  }
5
6  #titulo{
7    background-color: rgb(32, 55, 100);
8    color: white;
9    text-align: center;
10 }
11
12 #BotonSubmit{
13   background-color: rgb(32, 55, 100);
14   color: white;
15   height: 60px;
16   width: 100%;
17 }
```

N. Código página web datos.html

```
datos.html X
datos.html > ...
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="es">
3 <head>
4   <meta charset="UTF-8">
5   <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6   <title>Datos | DATIC</title>
7   <link rel="stylesheet" type="text/css" href="datos.css" media="all"/>
8
9 </head>
10 <body>
11   <div id="encabezado">
12     <h1>Aire acondicionado centro de datos <br> DATIC </h1>
13     <div ></div>
14     <h1 id="fechaHora"></h1>
15   </div>
16
17   <br>
18
19   <div id="seccionMedia">
20     <div id="componentes">
21       <input type="button" id="filtro" value="Filtro deshidratador">
22       <br>
23       <br>
24       <input type="button" id="compresor" value="Compresor">
25       <br>
26       <br>
27       <input type="button" id="expansion" value="Válvula de expansión">
28       <br>
29       <br>
30       <input type="button" id="solenoide" value="Válvula solenoide">
31       <br>
32       <br>
```

```
33       <input type="button" id="descargarDatos" value="Descargar datos técnicos">
34       <br>
35       <br>
36     </div>
37   </div></div>
38
39   <div id="graficos">
40     <h3 id="tituloGrafico">Titulo</h3>
41     <canvas id="grafico"></canvas>
42   </div>
43
44   <div></div>
45
46   <div id="mantenimiento">
47     <h3>Datos de mantenimiento</h3>
48     <p>Historial de fallas</p>
49   </div>
50
51 </div>
52
53
54 <div id="seccionBaja">
55   <input type="button" id="tiempoReal" value="Datos en tiempo real">
56   <input type="button" id="2d" value="2 días">
57   <input type="button" id="10d" value="10 días">
58   <input type="button" id="1m" value="1 mes">
59   <input type="button" id="1a" value="1 año">
60 </div>
61
62 <script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/Chart.js/2.9.4/Chart.min.js"></script>
63 <script src="codigoDatos.js" type="module"></script>
64 </body>
```

O. Código página web datos.css

```
# datos.css ×
# datos.css > #encabezado
1 #encabezado{
2   display: grid;
3   grid-template-columns: 40% 30% 30%;
4   background-color: rgb(32, 55, 100);
5   text-align: center;
6   color: white;
7 }
8
9 #seccionMedia{
10  display: grid;
11  grid-template-columns: 10% 2% 66% 2% 20%;
12 }
13
14 #componentes{
15   margin-top: 18px;
16 }
17
18 #componentes > input{
19   background-color: rgb(32, 55, 100);
20   color: white;
21   padding: 10px;
22   width: 100%;
23 }
24
25 #mantenimiento > h3{
26   background-color: rgb(32, 55, 100);
27   color: white;
28   padding: 20px;
29   text-align: center;
30 }
31
32 #seccionmBaja{
```

```
33   display: inline;
34 }
35
36 #seccionBaja > input{
37   background-color: rgb(32, 55, 100);
38   color: white;
39   padding: 0.5%;
40   width: 19%;
41   margin-left: .7%;
42 }
43
44 #contenedorGraficos{
45   display: grid;
46   grid-template-columns: 49% 2% 49%;
47 }
48
49 #grafico{
50   height: 10px;
51   width: 10px;
52 }
```

P. Código página web codigoDatos.js

```
JS codigoDatos.js X
JS codigoDatos.js > bDescargar.ondick
1 // import { leerDatos } from 'leerJson.js';
2 // CODIGO ASIGNACION DE BOTONES
3 // componentes
4 const bFiltro = document.getElementById('filtro');
5 const bCompresor = document.getElementById('compresor');
6 const bExpansion = document.getElementById('expansion');
7 const bSolenoide = document.getElementById('solenoide');
8 const bDescargar = document.getElementById('descargarDatos');
9
10 //seccion baja
11 const bTiempoReal = document.getElementById('tiempoReal');
12 const b2d = document.getElementById('2d');
13 const b10d = document.getElementById('10d');
14 const b1m = document.getElementById('1m');
15 const b1a = document.getElementById('1a');
16
17 // vigilantes
18 let frecuencia;
19 let cantidadNumeros;
20 let tituloComponente;
21 let tituloFrecuencia;
22 let tiempoReal = false;
23 let componenteA = new Array();
24 let componenteB = new Array();
25
26 // CODIGO CHARTS.JS
27 const generarGrafico = (etiquetas, datosA, datosB) => {
28
29     var elementoCanvas = document.getElementById('grafico').getContext('2d');
30     var grafico = new Chart(elementoCanvas, {
31         type: 'line',
32         data: {
```

```
33         labels: etiquetas,
34         datasets: [{
35             fill: false,
36             label: 'Sensor A',
37             data: datosA,
38
39             borderColor: 'rgba(4, 147, 114, 1)',
40             borderWidth: 1
41         },
42         {
43             fill: false,
44             label: 'Sensor B',
45             data: datosB,
46
47             borderColor: 'rgba(255, 99, 132, 1)',
48             borderWidth: 1
49         }
50     ],
51     options: { }
52 });
53 return grafico
54 };//fin generarGrafico
55
56 const generarNumeros = (componente) => {
57     let numeros = new Array();
58     for(let i = 0; i < cantidadNumeros; i++){
59         numeros[i] = (Math.random() * (componente[1] - componente[0]) + componente[0]).toFixed(2);
60     }
61     return numeros;
62 }
63
64 const directorGrafico = () =>{
```

```

65     document.getElementById('tituloGrafico').innerHTML = tituloComponente + " - " + tituloFrecuencia;
66     let etiqueta = new Array();
67     let elementoA = generarNumeros(componenteA);
68     let elementoB = generarNumeros(componenteB);
69     for(let i = 0; i < cantidadNumeros; i++){
70         etiqueta[i] = i + 1;
71     }
72
73     var Chart = generarGrafico(etiqueta, elementoA, elementoB);
74     Chart.render();
75 }
76
77 //inicia grafico para que la pagina no salga en blanco
78 tituloComponente = 'Filtro deshidratador';
79 tituloFrecuencia = '1 año';
80 componenteA = [20, 26]; //filtro
81 componenteB = [19, 25];
82 cantidadNumeros = 12; // 1 anio
83 directorGrafico();
84
85
86 //eventis de los componente
87 bFiltro.onclick = () => {
88     tituloComponente = 'Filtro deshidratador';
89     componenteA = [20, 26];
90     componenteB = [19, 25];
91     directorGrafico();
92 };
93
94 bCompresor.onclick = () => {
95     tituloComponente = 'Compresor';

```

```

96     componenteA = [0.5, 2.8];
97     componenteB = [20, 29];
98     directorGrafico();
99 }
100
101 bExpansion.onclick = () => {
102     tituloComponente = 'Válvula de expansión';
103     componenteA = [0.5, 8.97];
104     componenteB = [0.5, 4.05];
105     directorGrafico();
106 }
107
108 bSolenoide.onclick = () => {
109     tituloComponente = 'Válvula solenoide';
110     componenteA = [19, 25];
111     componenteB = [0.5, 8.97];
112     directorGrafico();
113 }
114
115 bDescargar.onclick = () => {
116     let url;
117     switch(tituloComponente){
118         case 'Filtro deshidratador':
119             url = 'Filtro_deshidratador.pdf';
120             break;
121         case 'Compresor':
122             url = 'Compresor.pdf';
123             break;
124         case 'Válvula de expansión':
125             url = 'Válvula_expansión_termostática.pdf';
126             break;
127         case 'Válvula solenoide':

```

```

128         url = 'Válvula_solenoides.pdf';
129         break;
130     }
131     window.open(url, 'Datos técnicos');
132 }
133 }
134
135 const tiempoRealF = () =>{
136     cantidadNumeros = 5;
137     directorGrafico();
138
139     setTimeout(()=>{
140         directorGrafico();
141         if(tiempoReal)
142             tiempoRealF();
143     },10000);
144 }
145 }
146
147 //eventos de la frecuencia
148 bTiempoReal.onclick = () => {
149     tituloFrecuencia = 'Tiempo Real';
150     tiempoReal = true;
151     tiempoRealF();
152 }
153
154 b2d.onclick = () => {
155     tituloFrecuencia = '2 días';
156     cantidadNumeros = 2;
157     tiempoReal = false;
158     directorGrafico();
159 }

```

```

160
161 b10d.onclick = () => {
162     tituloFrecuencia = '10 días';
163     cantidadNumeros = 10;
164     tiempoReal = false;
165     directorGrafico();
166 }
167
168 b1m.onclick = () => {
169     tituloFrecuencia = '1 mes';
170     cantidadNumeros = 30;
171     tiempoReal = false;
172     directorGrafico();
173 }
174
175 b1a.onclick = () => {
176     tituloFrecuencia = '1 año';
177     cantidadNumeros = 12;
178     tiempoReal = false;
179     directorGrafico();
180 }

```

Q. Código página web datosUsuario.js

```
JS datoUsuario.js X
JS datoUsuario.js > ...
1 export const arregloUsuarios = () =>{
2   return[
3     {
4       "usuario": "root",
5       "clave": "root"
6     },
7   ]
8 }
```

R. Código página web codigoUsuario.js

```
JS codigoUsuario.js X
JS codigoUsuario.js > ...
1 import {arregloUsuarios} from './datoUsuario.js';
2
3 const enviar = document.getElementById('BotonSubmit');
4
5 const login = (nUsuario, uClave) =>{
6   const dataUsuario = arregloUsuarios();
7
8   for(let i = 0; i < dataUsuario.length; i++){
9     if(dataUsuario[i].usuario == nUsuario && dataUsuario[i].clave == uClave){
10      return true;
11    }
12  }
13  return false;
14 }
15
16 enviar.onclick = () => {
17
18   const nombreUsuario = document.getElementById("TextUsuario").value;
19   const claveUsuario = document.getElementById("TextContrasenia").value;
20   if(login(nombreUsuario, claveUsuario))
21     window.open("datos.html", "_blank");
22   else
23     alert("El usuario o la clave son incorrectos");
24 }
25 }
```

11 Anexos

1) Lista de especificaciones NodeMCU

Microcontroller	ESP-8266 32-bit
NodeMCU Model	Amica
NodeMCU Size	49mm x 26mm
Carrier Board Size	n/a
Pin Spacing	0.9" (22.86mm)
Clock Speed	80 MHz
USB to Serial	CP2102
USB Connector	Micro USB
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage	4.5V-10V
Flash Memory/SRAM	4 MB / 64 KB
Digital I/O Pins	11
Analog In Pins	1
ADC Range	0-3.3V
UART/SPI/I2C	1 / 1 / 1
WiFi Built-In	802.11 b/g/n
Temperature Range	-40C - 125C

Fuente: <https://www.make-it.ca/nodemcu-arduino/nodemcu-details-specifications/>

2) Lista de especificaciones del chip ESP8266

Categories	Items	Parameters
Wi-Fi	Certification	Wi-Fi Alliance
	Protocols	802.11 b/g/n (HT20)
	Frequency Range	2.4 GHz – 2.5 GHz (2400 MHz – 2483.5 MHz)
	TX Power	802.11 b: +20 dBm
		802.11 g: +17 dBm
		802.11 n: +14 dBm
	Rx Sensitivity	802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)
802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)		
802.11 n: -72 dbm (MCS7)		
Antenna	PCB Trace, External, IPEX Connector, Ceramic Chip	
Hardware	CPU	Tensilica L106 32-bit processor
	Peripheral Interface	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR Remote Control
		GPIO/ADC/PWM/LED Light & Button
	Operating Voltage	2.5 V – 3.6 V
	Operating Current	Average value: 80 mA
	Operating Temperature Range	-40 °C – 125 °C
	Package Size	QFN32-pin (5 mm x 5 mm)
External Interface	-	
Software	Wi-Fi Mode	Station/SoftAP/SoftAP+Station
	Security	WPA/WPA2
	Encryption	WEP/TKIP/AES
	Firmware Upgrade	UART Download / OTA (via network)
	Software Development	Supports Cloud Server Development / Firmware and SDK for fast on-chip programming
	Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP
	User Configuration	AT Instruction Set, Cloud Server, Android/iOS App

Fuente: Hoja de datos ESP8266EX

3) Lista de especificación de pines para el módulo ESP12E

Pin	Name	Description
1	RST	Reset Pin of the module
2	ADC	Analog Input Pin for 10-bit ADC (0V to1V)
3	EN	Module Enable Pin (Active HIGH)
4	GPIO16	General Purpose Input Output Pin 16
5	GPIO14	General Purpose Input Output Pin 14
6	GPIO12	General Purpose Input Output Pin 12
7	GPIO13	General Purpose Input Output Pin 13
8	VDD	+3.3V Power Input
9	CS0	Chip selection Pin of SPI interface
10	MISO	MISO Pin of SPI interface
11	GPIO9	General Purpose Input Output Pin 9
12	GPIO10	General Purpose Input Output Pin 10
13	MOSI	MOSI Pin of SPI interface
14	SCLK	Clock Pin of SPI interface
15	GND	Ground Pin
16	GPIO15	General Purpose Input Output Pin 15
17	GPIO2	General Purpose Input Output Pin 2
18	GPIO0	General Purpose Input Output Pin 0
19	GPIO4	General Purpose Input Output Pin 4
20	GPIO5	General Purpose Input Output Pin 5
21	RXD0	UART0 RXD Pin
22	TXD0	UART0 TXD Pin

Fuente: <https://components101.com/wireless/esp12e-pinout-datasheet>

4) Código del sensor de presión Holykell HPT300-C07BAE6S3X2001

HPT300-C Selection Type	12	B	G	E5	S3	3	1	002
Pressure Range	Range reference to pressure range selection table code							
Pressure Unit	B=Bar P=PSI K=kPa M=MPA H=mH2O							
Pressure type	G=Gage A=Absolute N=Negative							
Signal Output	E0= 1-5V (3 wires) E5= 4-20mA(2 wires) E6= 0-5V (3 wires) E7= 0-10V (3 wires) E8= 0.5-4.5V(3 wires) E16=0.5-3.5V(3 wires) E20=4-20mA(3 wires) X= By Customized							
Power Supply	S3=24 V DC (Standard) S6=5V DC (for E8) S10=12~30 V DC (for E8,E5) S14=15~30 V DC (for E6, E7)							
Pressure connection	1=7/16-20UNF male 2=7/16-20UNF Female 3= 1/4" NPT male 4=1/4" NPT Female 6=G1/4"male 5=1/8"NPT male 7=G1/4"Female X= By Customized							
Accuracy	1=1.0%F.S 2=0.5%F.S							
Cable length	000=Non-Cable 001= Cable 1M 002= Cable 2M X= By Customized							

Fuente: Fabricante Holykell (2020)

5) Hoja de datos de compresor Copeland ZR81KCE-TF5

ZR81KCE-TF5

HFC, R-407C, 60 Hz, 3 -Phase, 200/230 V
Air Conditioning

COPELAND™

Production Status: Available for sale to all U.S. customers. Please check with your local Emerson Climate Technologies Representative for international availability.

Performance

Evaporator Temp. (°F)	45	45
Condensing Temp. (°F)	130	100
Return Gas Temp. (°F)	65	65
Liquid Temp. (°F)	115	85
Capacity (Btu/hr)	78600	94000
Power (W):	7150	4870
Current (Amps):	21.85	17.05
EER (Btu/Wh):	11.00	19.30
Mass Flow (lbs/hr):	1125	1155
Sound Data		
Sound Power (dBA):	75 Avg	80 Max
Vibration mils(peak-peak):	2.0 Avg	3.0 Max
Record Date:	2015-05-26	

Mechanical

Displacement	6.58
Displacement(ft ³ /hr):	
Overall Length (in):	9.69
Overall Width (in):	9.69
Overall Height (in):	17.95
Mounting Length (in):	7.50
Mounting Width (in):	7.50
Mounting Height (in):	18.20 *
Suction Size (in),Type:	7/8 Stub
Discharge Size (in),Type:	3/4 Stub
Initial Oil Charge (oz):	60
Oil Recharge (oz):	56
Net Weight (lbs):	86.0
Internal Free Volume (in ³):	258.0
Horse Power:	
*Overall compressor height on Copeland Brand Product's specified mounting grommets.	

Electrical

LRA-High*(Amp):	164.0
LRA Low* (Amp):	
LRA-Half Winding (Amp):	
MCC (Amps):	35.0
Max Operating Current(Amp):	25.2
RLA, MCC/1.4;use for contactor selection (Amp):	25.0
RLA, MCC/1.56;use for breaker & wire size selection (Amp):	22.4
RPM:	3500
Box IP	21
UL File No:	SA-2337
UL File Date:	1993-07-26
*Low and High refer to the low and high nominal voltage ranges for which the motor is approved.	

Capacitors

Fuente: Fabricante Copeland (2020)

6) Propiedades termo físicas del refrigerante R407C

Refrigerant 407C [R-32/125/134a (23/25/52)] Properties of Liquid on Bubble Line and Vapor on Dew Line

Pres- sure, psia	Temp., °F		Den- sity, lb/ft ³	Volume, ft ³ /lb		Enthalpy, Btu/lb		Entropy, Btu/lb-°F		Specific Heat c_p , Btu/lb-°F			Vel. of Sound, ft/s		Viscosity, lbm/ft-s		Thermal Cond., Btu/h-ft-°F		Surface Ten- sion, sur- face dyn/cm	Pre- tonic, sur- face
	Bubble	Dew		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
1	-125.19	-111.30	96.24	43.0887	-26.34	93.96	-0.07002	0.23254	0.3095	0.1568	1.183	3404	496.3	2.112	0.0199	0.0894	0.00385	25.65	1	
1.5	-115.58	-101.85	95.28	29.4430	-23.40	95.34	-0.06135	0.27716	0.3060	0.1600	1.182	3300	489.5	1.867	0.0204	0.0874	0.00403	24.66	1.5	
2	-108.36	-94.75	95.55	22.4776	-21.18	96.37	-0.05469	0.27966	0.3060	0.1624	1.181	3225	485.3	1.712	0.0208	0.0860	0.00416	23.93	2	
2.5	-102.52	-88.99	95.97	18.2333	-19.39	97.21	-0.04984	0.27966	0.3060	0.1644	1.181	3166	486.2	1.601	0.0212	0.0848	0.00427	23.34	2.5	
3	-97.57	-84.12	96.47	15.2685	-17.87	97.92	-0.04572	0.26881	0.3060	0.1662	1.181	3117	488.6	1.515	0.0214	0.0839	0.00436	22.84	3	
4	-89.43	-76.11	96.64	11.7361	-15.37	98.09	-0.04349	0.26485	0.3078	0.1693	1.181	3037	502.4	1.389	0.0219	0.0823	0.00452	22.02	4	
5	-82.81	-69.61	96.97	9.5211	-13.34	100.03	-0.03365	0.26284	0.3080	0.1719	1.182	2974	505.3	1.299	0.0222	0.0810	0.00465	21.36	5	
6	-77.20	-64.09	96.40	8.0252	-11.60	100.83	-0.03089	0.26025	0.3080	0.1742	1.182	2921	507.6	1.229	0.0225	0.0799	0.00476	20.81	6	
7	-72.30	-59.27	96.89	6.9456	-10.09	101.52	-0.02846	0.25805	0.3098	0.1762	1.183	2875	509.5	1.172	0.0228	0.0789	0.00485	20.32	7	
8	-67.94	-54.97	96.44	6.1272	-8.74	102.13	-0.02349	0.25705	0.3100	0.1781	1.184	2835	511.1	1.125	0.0230	0.0781	0.00494	19.90	8	
10	-60.30	-47.55	97.66	4.9690	-6.39	103.19	-0.01265	0.25464	0.3120	0.1814	1.186	2765	513.8	1.050	0.0234	0.0766	0.00509	19.16	10	
12	-53.96	-41.23	96.98	4.1864	-4.38	106.08	-0.01059	0.25272	0.3120	0.1844	1.188	2707	515.8	0.992	0.0238	0.0754	0.00522	18.54	12	
14	-48.34	-35.71	96.39	3.6210	-2.62	106.85	-0.00929	0.25114	0.3120	0.1871	1.189	2656	517.4	0.945	0.0241	0.0743	0.00534	18.00	14	
14.7 ^b	-46.53	-33.93	96.19	3.4593	-2.06	106.10	-0.00902	0.25005	0.3130	0.1880	1.190	2639	517.9	0.930	0.0241	0.0739	0.00537	17.82	14.7	
16	-43.32	-30.78	95.85	3.1929	-1.05	105.54	-0.00869	0.24879	0.3140	0.1896	1.191	2610	518.7	0.906	0.0243	0.0733	0.00544	17.52	16	
18	-38.77	-26.31	95.36	2.8570	0.39	106.15	0.00002	0.24683	0.3150	0.1919	1.193	2570	519.8	0.872	0.0246	0.0725	0.00553	17.08	18	
20	-34.67	-22.23	96.91	2.5862	1.70	106.71	0.00002	0.24760	0.3160	0.1941	1.195	2532	520.7	0.843	0.0248	0.0717	0.00562	16.69	20	
22	-30.76	-18.45	96.50	2.3632	2.92	107.22	0.00047	0.24698	0.3170	0.1961	1.197	2498	521.4	0.817	0.0250	0.0710	0.00570	16.33	22	
24	-27.18	-14.93	96.10	2.1761	4.06	107.70	0.00950	0.24566	0.3180	0.1981	1.199	2466	522.0	0.794	0.0252	0.0703	0.00578	15.99	24	
26	-23.85	-11.64	95.73	2.0169	5.13	108.14	0.01196	0.24510	0.3180	0.1999	1.201	2436	522.6	0.773	0.0253	0.0697	0.00585	15.68	26	
28	-20.66	-8.54	95.38	1.8790	6.15	108.55	0.01426	0.24462	0.3187	0.2017	1.203	2408	523.0	0.754	0.0255	0.0691	0.00592	15.38	28	
30	-17.67	-5.60	95.05	1.7603	7.10	108.93	0.01643	0.24378	0.3205	0.2034	1.205	2382	523.4	0.737	0.0257	0.0685	0.00598	15.11	30	
32	-14.88	-2.82	95.73	1.6553	8.02	109.30	0.01868	0.24319	0.3213	0.2051	1.207	2356	523.6	0.721	0.0258	0.0680	0.00605	14.84	32	
34	-12.13	-0.17	95.43	1.5622	8.89	109.64	0.02062	0.24265	0.3223	0.2067	1.209	2332	523.9	0.706	0.0260	0.0675	0.00610	14.59	34	
36	-9.25	2.37	95.14	1.4791	9.72	109.97	0.02227	0.24213	0.3229	0.2083	1.211	2309	524.1	0.692	0.0261	0.0670	0.00616	14.36	36	
38	-7.07	4.79	95.85	1.4045	10.53	110.28	0.02304	0.24165	0.3236	0.2098	1.213	2288	524.2	0.679	0.0262	0.0666	0.00622	14.13	38	
40	-4.70	7.12	95.58	1.3371	11.30	110.58	0.02373	0.24120	0.3246	0.2113	1.215	2267	524.3	0.667	0.0263	0.0661	0.00627	13.91	40	
42	-2.41	9.37	95.32	1.2759	12.04	110.86	0.02435	0.24077	0.3251	0.2127	1.217	2246	524.3	0.656	0.0265	0.0657	0.00632	13.71	42	
44	-0.20	11.53	95.06	1.2201	12.76	111.13	0.02491	0.24036	0.3259	0.2141	1.219	2227	524.4	0.645	0.0266	0.0653	0.00637	13.51	44	
46	1.95	13.61	94.82	1.1698	13.46	111.39	0.02541	0.23998	0.3265	0.2155	1.221	2208	524.4	0.635	0.0267	0.0649	0.00642	13.31	46	
48	3.98	15.63	94.58	1.1220	14.13	111.64	0.02586	0.23961	0.3272	0.2169	1.223	2190	524.3	0.626	0.0268	0.0646	0.00646	13.13	48	
50	5.98	17.58	94.34	1.0766	14.79	111.88	0.02626	0.23926	0.3279	0.2182	1.225	2172	524.3	0.617	0.0269	0.0642	0.00651	12.95	50	
55	10.71	22.21	95.78	0.9832	16.34	112.44	0.02926	0.23864	0.3296	0.2214	1.230	2130	526.0	0.596	0.0272	0.0633	0.00663	12.53	55	
60	15.13	26.53	95.25	0.9037	17.81	112.96	0.03163	0.23771	0.3313	0.2246	1.235	2091	523.6	0.577	0.0274	0.0626	0.00673	12.13	60	
65	19.27	30.58	95.75	0.8359	19.19	113.44	0.04250	0.23703	0.3329	0.2276	1.240	2054	523.2	0.560	0.0276	0.0618	0.00684	11.77	65	
70	23.18	34.40	95.27	0.7774	20.49	113.88	0.04519	0.23661	0.3346	0.2305	1.245	2019	522.6	0.544	0.0278	0.0611	0.00694	11.43	70	
75	26.88	38.02	95.82	0.7264	21.74	114.29	0.04773	0.23594	0.3376	0.2333	1.250	1986	522.0	0.530	0.0280	0.0605	0.00703	11.10	75	
80	30.39	41.46	97.38	0.6816	22.92	114.67	0.05014	0.23510	0.3380	0.2361	1.255	1955	523.3	0.517	0.0282	0.0598	0.00712	10.80	80	
85	33.75	44.73	96.95	0.6415	24.06	115.03	0.05263	0.23400	0.3389	0.2389	1.260	1925	523.6	0.505	0.0284	0.0593	0.00721	10.51	85	
90	36.96	47.87	96.54	0.6064	25.16	115.37	0.05462	0.23302	0.3408	0.2416	1.266	1896	519.8	0.493	0.0286	0.0587	0.00730	10.23	90	
95	40.06	50.87	96.15	0.5746	26.21	115.68	0.05621	0.23207	0.3426	0.2442	1.271	1869	519.0	0.483	0.0288	0.0582	0.00739	9.97	95	
100	43.00	53.75	95.76	0.5459	27.23	115.98	0.05761	0.23164	0.3440	0.2468	1.276	1842	518.1	0.473	0.0289	0.0576	0.00747	9.72	100	
110	48.00	59.21	95.02	0.4959	29.16	116.53	0.06250	0.23065	0.3475	0.2520	1.287	1792	516.3	0.454	0.0293	0.0567	0.00763	9.25	110	
120	53.00	64.30	94.32	0.4540	30.99	117.03	0.06602	0.23191	0.3502	0.2570	1.298	1745	514.3	0.438	0.0296	0.0558	0.00780	8.81	120	
130	58.75	69.08	95.64	0.4183	32.72	117.47	0.06832	0.23322	0.3528	0.2621	1.310	1700	512.3	0.423	0.0299	0.0549	0.00796	8.41	130	
140	63.30	73.59	95.99	0.3875	34.36	117.88	0.07064	0.23458	0.3566	0.2671	1.321	1658	510.2	0.409	0.0302	0.0541	0.00812	8.03	140	
150	67.70	77.86	95.37	0.3607	35.94	118.24	0.07297	0.23597	0.3596	0.2721	1.334	1618	508.0	0.396	0.0304	0.0534	0.00828	7.67	150	
160	71.98	81.92	95.76	0.3372	37.45	118.57	0.07518	0.23738	0.3628	0.2772	1.346	1580	505.7	0.385	0.0307	0.0527	0.00844	7.33	160	
170	75.97	85.79	95.17	0.3163	38.90	118.87	0.07706	0.23882	0.3660	0.2824	1.359	1543	503.4	0.374	0.0310	0.0520	0.00860	7.01	170	
180	79.80	89.49	95.59	0.2976	40.30	119.15	0.07861	0.24028	0.3695	0.2876	1.373	1508	501.1	0.364	0.0312	0.0514	0.00876	6.71	180	
190	83.47	93.04	95.02	0.2809	41.66	119.39	0.07987	0.24176	0.3727	0.2929	1.387	1474	498.7	0.354	0.0315	0.0507	0.00893	6.42	190	
200	87.00	96.45	95.47	0.2656	42.97	119.61	0.08023	0.24325	0.3762	0.2983	1.401	1441	496.3	0.345	0.0317	0.0501	0.00909	6.15	200	
220	93.69	102.90	96.40	0.2393	45.49	119.99	0.09271	0.24265	0.3825	0.3095	1.432	1379	491.4	0.328	0.0323	0.0490	0.00942	5.64	220	
240	99.96	108.92	97.35	0.2171	47.88	120.29	0.09491	0.24259	0.3907	0.3213	1.466	1320	486.3	0.313	0.0328	0.0480	0.00976	5.17	240	
260	105.82	114.56	96.33	0.1982	50.17	120.52	0.10088	0.24264	0.3986	0.3338	1.502	1265	481.2	0.299	0.0333	0.0470	0.01011	4.73	260	
280	111.37	119.88	95.33	0.1819	52.36	120.68	0.10464	0.24280	0.4070	0.3473	1.542	1211	475.9	0.287	0.0339	0.0461</				

7) Hoja de datos filtro deshidratador Castel 4316/M12S

Disegno Drawing Dessin Zeichnung	N° catalogo Part number N° catalogue Katalog Nr.	Codice internazionale International code Code international Internationaler Code	Attacchi Connections Raccords Anschlüsse				Cubatura nominale Nominal volume Cubature nominale Nominaler Rauminhalt [cm ³]	PS [bar]	TS [°C]		Confezione n° pz Package pcs Emballage Verpackung
			ODS		ODM				min	max	
			Ø [in.]	Ø [mm]	Ø [in.]	Ø [mm]					
	4303/2S	032S	1/4"	-	3/8"	-	50	45 (1)	-40	+80	45
	4303/2.5S	-	5/16"	-	3/8"	-	50				45
	4303/3S	033S	3/8"	-	1/2"	-	50				45
	4305/2S	052S	1/4"	-	3/8"	-	80				34
	4305/3S	053S	3/8"	-	1/2"	-	80				34
	4305/M10S	-	-	10	-	12	80				34
	4308/2S	082S	1/4"	-	3/8"	-	130				24
	4308/3S	083S	3/8"	-	1/2"	-	130				24
	4308/M10S	-	-	10	-	12	130				24
	4308/M12S	-	-	12	-	14	130				24
	4308/4S	084S	1/2"	-	5/8"	16	130				24
	4316/3S	163S	3/8"	-	1/2"	-	250				28
	4316/M10S	-	-	10	-	12	250				28
	4316/M12S	-	-	12	-	14	250				28
	4316/4S	164S	1/2"	-	5/8"	16	250				28
	4316/5S	165S	5/8"	16	3/4"	-	250				28
	4316/7S	167S	7/8"	-	1.1/8"	-	250				28
	4330/3S	303S	3/8"	-	1/2"	-	500				12
	4330/4S	304S	1/2"	-	5/8"	16	500				12
	4330/5S	305S	5/8"	16	3/4"	-	500				12
	4330/7S	307S	7/8"	-	1.1/8"	-	500				12
	4330/9S	309S	1.1/8"	-	1.3/8"	35	500				12
	4332/4S	304S	1/2"	-	5/8"	16	500				15
	4332/5S	305S	5/8"	16	3/4"	-	500				15
	4341/4S	414S	1/2"	-	5/8"	16	670				14
	4341/5S	415S	5/8"	16	3/4"	-	670				14
	4341/6S	416S	3/4"	-	7/8"	-	670				14
	4341/7S	417S	7/8"	-	1.1/8"	-	670				14
	4375/4S	754S	1/2"	-	5/8"	16	1340				1
	4375/5S	755S	5/8"	16	3/4"	-	1340				1
	4375/6S	756S	3/4"	-	7/8"	-	1340				1
	4375/7S	757S	7/8"	-	1.1/8"	-	1340				1
	4375/9S	759S	1.1/8"	-	1.3/8"	35	1340				1

Fuente: Tomado de Castel (2020)

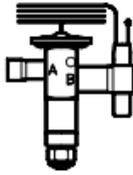
8) Hoja de datos válvula solenoide de cierre Castel 1078/M12S

TABLE 2: General characteristics of NC valves with ODS connections																
Operating Principles	Catalogue Number	Connections ODS		Seat size nominal Ø [mm]	Kv Factor [m³/h]	Opening Pressure Differential [bar]					PS [bar]	TS [°C]		TA [°C]		Risk Category according to PED Recast
		Ø [in.]	Ø [mm]			min OPD	MOPD					min.	max.	min. (3)	max.	
							coil series									
							9100 9110 9300 (AC)	9160 (AC)	9120 9320 (AC)	9120 9320 (DC)						
Direct Acting	1028/2#	1/4"	–	2,2	0,15	0	21	28	35	21	45	–35	+110 (2)	–35	+50	Art. 4.3
	1028/2#.E	1/4"	–	3	0,23											
	1028/3#	3/8"	–													
	1028/M10#	–	10													
Diaphragm Pilot Operated	1068/3#	3/8"	–	6,5	0,80	0,05	21	28	35	18	45	–35	+105 (1)	–35	+50	Art. 4.3
	1068/M10#	–	10													
	1068/M12#	–	12													
	1068/4#	1/2"	–													
	1078/M12#	–	12													
	1078/4#	1/2"	–	12,5	2,20											
	1078/5#	5/8"	16													
	1079/7#	7/8"	22	16,5	2,61											
	1098/5#	5/8"	16													
	1098/6#	3/4"	–	10	3,80											
	1098/7#	7/8"	22													
	1099/9#	1.1/8"	–													
	1078/9#	1.1/8"	–	25,5	10											
1079/11#	1.3/8"	35	13													

Fuente: Tomado de Castel (2020)

9) Hoja de datos válvula termostática de expansión Danfoss TDEZ 8

Ordering
Standard range - continued



Range AC = -10 → +15°C with MOP 115 psig/9 bar abs.
Static superheat SS = 4 K

R407C

Type and rated capacity Q _{max} (1) TR	Rated capacity Q _{max} (1) kW	Inch version		mm version	
		Connection Solder ODF × ODF A × B in.	Code no. Multi pack (2)	Code no. Industrial pack (3)	Connection Solder ODF × ODF A × B mm

TDEZ 3 - 7.5 Single port

TDEZ 3	10.5	1/8 × 1/8	068H7220	068H8148	10 × 16	068H7276	068H8149
TDEZ 3	10.5	1/8 × 1/8	068H7221	068H8150	12 × 16	068H7277	068H8151
TDEZ 4	14	1/8 × 1/8	068H7222	068H8152	12 × 22	068H7278	068H8153
TDEZ 6	21	1/8 × 1/8	068H7223	068H8154	12 × 16	068H7279	068H8155
TDEZ 6	21	1/8 × 1/8	068H7224	068H8156	12 × 22	068H7280	068H8157
TDEZ 6	21	1/8 × 1/8	068H7225	068H8158	16 × 22	068H7281	068H8159
TDEZ 7.5	26	1/8 × 1/8	068H7226	068H8160	16 × 22	068H7282	068H8161

TDEZ 8 - 19 Single port

TDEZ 8	28	1/8 × 1/8	068H7227	068H8162	16 × 22	068H7283	068H8163
TDEZ 11	38.5	1/8 × 1/8	068H7228	068H8164	16 × 22	068H7284	068H8165
TDEZ 11	38.5	1/8 × 1/8	068H7229	068H8166	16 × 28	068H7285	068H8167
TDEZ 12.5	44	1/8 × 1/8	068H7230	068H8168	16 × 22	068H7286	068H8169
TDEZ 12.5	44	1/8 × 1/8	068H7231	068H8170	16 × 28	068H7287	068H8171
TDEZ 16	56	1/8 × 1/8	068H7232	068H8172	16 × 28	068H7288	068H8173
TDEZ 16	56	1/8 × 1/8	068H7233	068H8174	22 × 28	068H7289	068H8175
TDEZ 19	66.5	1/8 × 1/8	068H7234	068H8176	22 × 28	068H7290	068H8177

TDEBZ 8 - 19 Balanced port

TDEBZ 8	28	1/8 × 1/8	068H7235	068H8178	16 × 22	068H7236	068H8179
TDEBZ 11	38.5	1/8 × 1/8	068H7237	068H8180	16 × 22	068H7238	068H8181
TDEBZ 11	38.5	1/8 × 1/8	068H7239	068H8182	16 × 28	068H7240	068H8183
TDEBZ 12.5	44	1/8 × 1/8	068H7241	068H8184	16 × 22	068H7242	068H8185
TDEBZ 12.5	44	1/8 × 1/8	068H7243	068H8186	16 × 28	068H7244	068H8187
TDEBZ 16	56	1/8 × 1/8	068H7245	068H8188	16 × 28	068H7246	068H8189
TDEBZ 16	56	1/8 × 1/8	068H7247	068H8190	22 × 28	068H7248	068H8191
TDEBZ 19	66.5	1/8 × 1/8	068H7249	068H8192	22 × 28	068H7250	068H8193

TDEBZ 20 - 40 Balanced port

TDEBZ 20	70	1/8 × 1/8	068H7251	068H8194	22 × 28	068H7252	068H8195
TDEBZ 26	91	1/8 × 1/8	068H7253	068H8196	22 × 35	068H7254	068H8197
TDEBZ 30	105	1/8 × 1/8	068H7255	068H8198	22 × 35	068H7256	068H8199
TDEBZ 30	105	1/8 × 1/8	068H7257	068H8200	28 × 35	068H7258	068H8201
TDEBZ 40	140	1/8 × 1/8	068H7259	068H8202	28 × 35	068H7260	068H8203

Fuente: Tomado de Danfoss (2020)

10) Costo del contrato con Soporte técnico



Modalidad de contrato Preferencial con visitas en frecuencia Mensual

- Visitas en frecuencia Mensual de mantenimiento preventivo en horario de lunes a viernes desde las 8:00 a.m. hasta las 5:00 p.m.
- Atención de averías durante las veinticuatro horas del día, los siete días de la semana (24/7).
 - i. Tiempo de respuesta en sitio para la atención de averías:
 - Área Metropolitana: cuatro (4) horas máximo.
 - Gran Área Metropolitana: cinco (5) horas máximo.
 - Fuera del Gran Área Metropolitana: doce (12) horas máximo.

Los tiempos anteriormente indicados inician a partir del momento en que se responde la llamada y hasta el momento en que el técnico se presenta en las Instalaciones.

Equipos en contrato:

	Ubicación	Marca	Modelo	Capacidad	Número de serie	Monto Mensual	
1	Cartago, Cartago, TEC Laymi 2	LIEBERT	EVAPORADOR HPM 20KW/6TON 208/60HZ/3F UPFLOW - ELECTRIC REHEAT (S20OA031VVG0021M0)	20 KW	8996840002	\$725.00	
2	Cartago, Cartago, TEC Cartago/ DATIC	LIEBERT	EVAPORADOR HPM 20KW/6TON 208/60HZ/3F DOWNFLOW (S20UA230VDG0020MX)	20 KW	8996860001	\$725.00	
						Subtotal	\$1,450.00
						Total neto	\$17,400.00
						IVA	\$348.00
						Total	\$17,748.00

Fuente: Departamento de Administración de Mantenimiento (2020)

11) Cotización sensor de presión

Hello Natalia,

Thanks for inquiry, Even is glad to deal with your business.

Attached the datasheet for reference firstly, below is parameters based on your P/N: HPT300-C07BAE6S3X2001

Pressure range: -1~35bar

Type: absolute

Output: 0-5V

Power: 24V DC

Thread: 7/16-20UNF female

Cable length: 1m

Unit price USD37/pc based on EXW terms

Shipping cost USD110(10pcs) by DHL door to door service

Delivery time 10-12 working days

By the way, would you please confirm the application is refrigeration? and know the temperature range?

The PI will be sent after your decision.

Best wishes

Even_Yang | Sales Manager | Mob/Whatsapp/Wechat +86 18874830056 | E

sales08@holykell.com | Skype +86 18874830056

Holykell technology CO., LTD. | No.100 LuYun Road, LuGu, Changsha 410205, Hunan China

Please contact me by Calling/Whatsapp/Wechat to confirm if our bank account have changed!!!

Fuente: Holykell (2020)

12) Cotización sensor de temperatura

Clasificar	Detalle de los productos	Descripción	Cantidad	Disponibilidad	Precio unitario (USD)	Precio ext. (USD)	
1	 <p> Mouser N.º: 682-5024-0762 Fabricante N.º: 5024-0762 Fabricante: Sensata Ref. Cliente: <input type="text" value="Ref. Cliente"/> </p>	<p> Sensores de temperatura industriales 10K Ohm NTC SS Probe Sensor w/integrated Connector, 150C to 300C, 76.2 mm L, M14 X 1.5mm En conformidad con la RoHS QuickView  </p>	<input type="text" value="7"/>	7 Se envía ahora	\$19.00	\$133.00	

<p>Al enviar su pedido, usted acepta estos términos y condiciones. Para obtener más información acerca de la disponibilidad, haga clic en el N.º de artículo de Mouser.</p>		<p> Mercadería: \$133.00 Envío: <input type="text" value="DHL International Express"/> \$35.00 + Más opciones de envío Subtotal: \$168.00 </p>
--	--	--

Fuente: Mouser Electronics, distribuidores de Sensata Technologies (2020)

13) Costo sensor de corriente

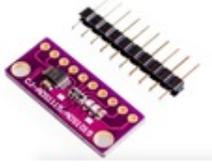
Cesta de compra

Producto	Cantidad	Precio por unidad.	Total
SCT-013 Non-Invasive AC Current Sensor (0 - 30A)(0 - 1V)	<input type="text" value="28"/>	US\$16,95	US\$474,60 ✖
Total			US\$474,60

[Sigue comprando](#)
[Actualizar cesta](#)
[Pasar por caja](#)

Fuente: MicroJPM (2020)

14) Costo sensor de voltaje, convertidor analógico-digital y NodeMCU

Cart Items	Qty	Item Price	Item Total
 ADS1115 4 Channel 16-Bit ADC with i2c	<input type="text" value="20"/> Remove	\$5.95	\$119.00
 AC Voltage Sensor Module	<input type="text" value="1"/> Remove	\$5.95	\$5.95
 NodeMcu V3 Lua LoLin ESP8266 Dev Board	<input type="text" value="1"/> Remove	\$9.95	\$9.95
Subtotal:			\$134.90
Sales Tax:			\$17.53
Grand Total:			\$152.43

Fuente: CRCibernética (2020)

15) Costo sensor de flujo

Cesta de compra

Producto	Cantidad	Precio por unid.	Total
YF-S201 Water Flow Sensor	<input type="text" value="1"/>	US\$10,95	US\$10,95 ✖
Total			US\$10,95

Sigue comprando **Actualizar cesta** **Pasar por caja**

Fuente: MicroJPM (2020)

16) Costo sensor vibración

Cesta de compra

Producto	Cantidad	Precio por unid.	Total
MPU6050 Module Triple-Axis Gyroscope Accelerometer For Arduino	<input type="text" value="4"/>	US\$6,95	US\$27,80 ✖
Total			US\$27,80

Sigue comprando **Actualizar cesta** **Pasar por caja**

Fuente: MicroJPM (2020)

17) Costo fuente de voltaje

Cesta de compra			
Producto	Cantidad	Precio por unid.	Total
DVP-515 Nippon Fuente Regulada 1.5 - 15V @ 5A	<input type="text" value="1"/>	US\$120,99	US\$120,99 ✖
Total			US\$120,99

[Sigue comprando](#) [Actualizar cesta](#) [Pasar por caja](#)

Fuente: MicroJPM (2020)

18) Costo multiplexores

Cesta de compra			
Producto	Cantidad	Precio por unid.	Total
74LS151 Multiplexor 8 Entradas	<input type="text" value="11"/>	US\$1,70	US\$18,70 ✖
Total			US\$18,70

[Sigue comprando](#) [Actualizar cesta](#) [Pasar por caja](#)

Fuente: MicroJPM (2020)