

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**Sistema de Monitoreo y Alerta de Modos de Fallas basado en el Pronóstico y
Evaluación de la Salud de los Sistemas de Acondicionamiento del Laboratorio de
Biotecnología del Tecnológico de Costa Rica sede Central**

**Informe de práctica de especialidad para optar por el título de Ingeniería en
Mantenimiento Industrial, con el grado académico de Licenciatura**

Jeremy Marín Hernández

II SEMESTRE 2020



Carrera evaluada y acreditada por:

Canadian Engineering Accreditation Board
Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes d'Ingénierie

Profesor Guía

Ing. Sebastián Mata Ortega

Asesor Industrial

Ing. Manuel Centeno López

Tribunal Examinador

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Ing. Fernando Bonilla Lorenzo

Datos personales

Nombre completo: Jeremy Marín Hernández
Número de cédula: 1-1711-0533
Número de carné: 2016183395
Edad: 22 años
Número de teléfono: (506) 8721-9178
Correo electrónico: jeremy.marinh@gmail.com
Dirección de domicilio: Condominio Albacete, de riteve Cartago, 1.5 km oeste. Quebradilla, Cartago, Costa Rica.

Datos de la empresa

Nombre: Instituto Tecnológico de Costa Rica
Actividad Principal: Docencia, investigación y extensión de la tecnología y las ciencias conexas para el desarrollo de Costa Rica.
Dirección: Cartago, calle 15, avenida 14, 1 km al norte de la Basílica de los Ángeles.
Teléfono: (506) 2552-5333



Sistema de Monitoreo y Alerta de Modos de Fallas basado en el Pronóstico y Evaluación de la Salud de los Sistemas de Acondicionamiento del Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico de Costa Rica sede Central por Jeremy Marín Hernández se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Dedicatoria

A Dios.

A mis padres quienes me apoyaron e impulsaron a ser mejor cada día y no darme por vencido.

A mi hermana quien siempre estuvo a mi lado apoyándome.

A mis amigos, por toda la ayuda para realizar de la mejor manera este proyecto y que me acompañaron durante todos estos años.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mis padres, por todo su sacrificio para permitirme cumplir mis objetivos, apoyarme en todo momento y por enseñarme a siempre dar lo mejor de mí. También a Fabi, quien siempre estuvo para motivarme y sacarme una sonrisa.

Le tengo especial aprecio a mis amigos que estuvieron a lo largo de estos años universitarios y hasta más por todo su apoyo, buenos momentos y consejos.

Al equipo de natación del ITCR y a mi entrenadora Liz, porque me dieron la oportunidad de disfrutar aún más este proceso universitario, a crecer como persona y atleta, conocer personas increíbles y llevarme muy buenos recuerdos de competencias y entrenamientos.

Al Ing. Sebastián Mata Ortega por la guía en el desarrollo del proyecto, así como al Ing. Juan José Montero Jiménez de quien, a pesar de encontrarse fuera del país, aprendí bastante y fue una ayuda fundamental para gran parte del trabajo. También agradecido con el Ing. Carlos Piedra Santamaría, quien me ayudó con el proceso para definir este proyecto de graduación.

Carta de aceptación de la Empresa:

Señor

Ignacio Del Valle Granados

Coordinador de práctica profesional

Escuela de Ingeniería Electromecánica

Estimado don Ignacio,

Le informo por este medio que se ha autorizado al estudiante **Jeremy Marín Hernández** cédula **1-1711-0533** carné **2016183395** a realizar su práctica profesional para optar por el título de grado de licenciatura de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, desarrollando el siguiente proyecto:

Sistema Inteligente para Modos de Fallas del Aire Acondicionado del Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico de Costa Rica

Durante el periodo comprendido del 31 de agosto al 4 de diciembre del 2020

Este proyecto será de gran relevancia para el departamento, ya que ayudará a mejorar el mantenimiento que se le da al equipo de aire acondicionado del laboratorio de Biotecnología e impulsará hacia el uso y aplicación de nuevas tecnologías o Industria 4.0.

Sin otro particular.

Atentamente,

MANUEL ADOLFO
CENTENO LOPEZ
(FIRMA)



Firmado digitalmente
por MANUEL ADOLFO
CENTENO LOPEZ (FIRMA)
Fecha: 2020.07.03
10:44:18 -06'00'

Ing. Manuel Centeno López

mcenteno@itcr.ac.cr

Director

Departamento de Administración de Mantenimiento del ITCR

Contenido

Resumen	1
Abstract	3
1. Capítulo I: Introducción	5
1.1. Introducción	5
1.2. Reseña de la empresa	7
2. Capítulo II. Planteamiento del problema	11
2.1. Antecedentes	11
2.2. Planteamiento del problema	12
2.3. Objetivos del proyecto	14
2.4 Justificación del proyecto	15
2.5. Viabilidad	18
2.6. Metodología	19
2.7. Alcance del proyecto	21
2.8. Limitaciones	21
3. Capítulo III. Marco teórico	23
3.1. Marco teórico	23
4. Capítulo IV. Análisis de los sistemas de climatización	35
4.1. Análisis de criticidad	35
4.2. Análisis de modos de falla y efectos	38

4.3. Enfoque de sistemas de ingeniería	43
5. Capítulo V. Sistemas de monitoreo	45
5.1. Sistemas de aire acondicionado	47
5.2. Sistema de refrigeración	61
5.3. Sistema de inyección – extracción	66
5.4. Equipos y sensores	68
6. Capítulo VI. Simulación del RUL: Filtro de aire	69
6.1. Simulación de datos	70
6.2. Modelo propuesto	78
7. Capítulo VII. Análisis Financiero	89
7.1. Mantenimientos correctivos.....	89
7.2. Sistemas de Monitoreo	92
7.3. Factibilidad del proyecto.....	95
8. Conclusiones.....	98
9. Oportunidades de mejora	100
Referencias	101
Apéndices.....	106
Anexos.....	116

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de Sistema Experto, a partir de Badaró et al. (2013)	24
Figura 2. Red Neuronal Artificial. Tomado de Engelbrecht (2007).....	25
Figura 3. Elementos principales de A/C. Recuperado de www.tecnologia.org	27
Figura 4. Sistema de A/C Compacto. Tomado de Manual de operaciones Carrier.....	28
Figura 5. Componentes de sistema de aire acondicionado separado. Tomado de aireacondicionado.com	29
Figura 6. Sistema de aire acondicionado tipo Chiller. Tomado de la página web de York ..	29
Figura 7. El producto inteligente. Del Val Román (2016)	31
Figura 8. Bases tecnológicas de la I4.0. Del Val Román (2016).....	31
<i>Figura 9.</i> Características de LabVIEW para pruebas automatizadas. National Instruments (2020).....	32
<i>Figura 10.</i> Estimación del RUL. Goebel et al. (2012)	34
Figura 11. Estructura de Sistema de Monitoreo	45
Figura 12. Unidades condensadoras de cuartos en el Laboratorio de Biotecnología	47
Figura 13. Diagrama de bloques para temperatura y humedad. LabVIEW	49
Figura 14. Diagrama de bloques para filtro de aire. LabVIEW	50
Figura 15. Diagrama de bloques para filtro deshidratador. LabVIEW	52
Figura 16. Diagrama de bloques para zonas de alta y baja presión. LabVIEW	53
Figura 17. Monitoreo de corriente de compresor. LabVIEW.....	55
Figura 18. Diagrama de bloques para monitoreo de corriente. LabVIEW.....	55
Figura 19. Diagrama de bloques para notificaciones vía correo electrónico. LabVIEW	56
Figura 20. Interfaz del Sistema de Monitoreo de A/C. LabVIEW	57
Figura 21. Alarma en correo electrónico. Gmail	58
Figura 22. Diagrama de bloques para almacenamiento de datos. LabVIEW.....	58
Figura 23. Datos almacenados en un documento Excel. Microsoft Excel	59
Figura 24. Visualización gráfica de datos obtenidos. Microsoft Power Bi	60
Figura 25. Visualización móvil de los datos. Microsoft Power Bi.....	61
Figura 26. Cuarto frío	61
Figura 27. Unidad Condensadora	62
Figura 28. Interfaz del Sistema de Monitoreo para Cuarto Frío. LabVIEW	65

Figura 29. Sistema de inyección-extracción de aire	66
Figura 30. Características de un filtro seco. Soler&Palau	71
Figura 31. Tendencia de saturación de un filtro seco	72
Figura 32. Programación para simular comportamiento del filtro	72
Figura 33. Gráfica con datos simulados	73
Figura 34. Gráfico de saturación con datos simulados	75
Figura 35. Casos de saturación de filtro	77
Figura 36. Grupos de muestreo.....	78
Figura 37. Curvas de aprendizaje	82
Figura 38. Predicción del RUL.....	83
Figura 39. Selección de tarea. RapidMiner	84
Figura 40. Selección de modelos deseados. RapidMiner	85
Figura 41. Comparación de modelos. RapidMiner.....	86
Figura 42. Gráfico de predicciones SVM. RapidMiner.....	87
Figura 43. Fórmula para calcular Valor Actual de Costos	96
Figura 44. Fórmula para el Costo Actual Uniforme Equivalente.....	97

Índice de tablas

Tabla 1. Requerimientos funcionales, de comportamiento, estructurales y de experiencia .	33
Tabla 2. Análisis de criticidad para sistemas de A/C	37
Tabla 3. Modos de falla para sistema de a/c del cuarto de Crecimiento Vegetal in vitro	42
Tabla 4. Enfoque de sistemas de ingeniería	44
Tabla 5. Caída de presión final máxima para filtros.....	50
Tabla 6. Caídas de presión máximas recomendadas para filtros deshidratadores.....	52
Tabla 7. Saturación simulada de filtro de aire	74
Tabla 8. Arreglo de datos	79
Tabla 9. Predicciones del modelo SVM	87
Tabla 10. Tipos de mantenimientos correctivos en unidades de A/C	90
Tabla 11. Cuantificación de paros en unidades de A/C.....	91
Tabla 12. Cuantificación de paros en sistema de refrigeración.....	92
Tabla 13. Salario de técnico en A/C.....	92
Tabla 14. Costos de los sistemas de monitoreo	93
Tabla 15. Costo mantenimiento de monitoreo A/C.....	94
Tabla 16. Costo mantenimiento de monitoreo refrigeración	94
Tabla 17. Comparación del CAUE.....	97

Índice de abreviaturas

ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
HVAC	Heat, Ventilation and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)
I 4.0	Industria 4.0
A/C	Aire Acondicionado
ISO	International Organization of Standardization (Organización Internacional de Normalización)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)
AMFE	Análisis de Modos de Fallas y Efectos
RUL	Remaining Useful Life (Vida Útil Remanente)
DAM	Departamento de Administración de Mantenimiento
AN	Artificial Neuron (Neurona Artificial)
NN	Neural Network (Red Neuronal)
SVM	Support Vector Machine (Máquinas de Vector Soporte)
MLP	Multilayer Perceptron (Perceptrón Multicapa)
RMSE	Root Mean Square Error (Raíz del Error Cuadrático Medio)
INCOSE	Consejo Internacional en Ingeniería de Sistemas
PHM	Prognostics and Health Management (Mantenimiento basado en el Pronóstico de fallas y Gestión de la Salud)
CBM	Condition-Based Maintenance (Mantenimiento Basado en la Condición)
PdM	Predictive Maintenance (Mantenimiento Predictivo)
UPS	Uninterruptible Power Supply (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)
SI	Sistema Internacional
RLA	Running Load Amperage (Amperaje de Carga Nominal)
LRA	Locked Rotor Amperage (Amperaje de Rotor Bloqueado)
VAN	Valor Neto Actual
TIR	Tasa Interna de Retorno
CAUE	Costo Anual Uniforme Equivalente
VA	Valor Actual

Resumen

El presente proyecto propone diseñar un sistema de monitoreo y alerta de modos de fallas basado en el pronóstico y evaluación de la salud de los diferentes sistemas de climatización del Laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cuando se desconoce el estado actual de los sistemas, muchas investigaciones, trabajos y materiales críticos del laboratorio se ven expuestos a malos funcionamientos sin ser detectados con anticipación, lo que compromete las funciones principales del centro de investigación. Además, el Departamento de Administración de Mantenimiento se ve en la obligación de subcontratar a otra empresa para realizar ciertos mantenimientos correctivos que se podrían ahorrar al tener monitoreados los sistemas.

Realizando el Análisis de Criticidad, se establecieron los sistemas de acondicionamiento ambiental que requieren de mayor control en el recinto, siendo estos: cinco unidades de aire acondicionado, un sistema de refrigeración y otro de inyección – extracción de aire. Con el Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE), se examinaron estos sistemas de climatización para así definir los parámetros que requieren de un monitoreo constante. Dichas variables son las que, posteriormente, se tomarán en cuenta para diseñar el sistema de monitoreo a cada sistema por separado.

Posteriormente, con el software LabVIEW, se desarrolló el sistema de monitoreo para los diferentes equipos, capaz de emitir alarmas ante cualquier comportamiento anormal y enviar notificaciones a las partes interesadas. Conforme los datos se reflejan en la interfaz del programa, la información va siendo almacenada para su posterior análisis con ayuda de otras herramientas computacionales.

Después, se realizó una simulación de la Vida Útil Remanente (RUL) con una red neuronal de tipo MLP para un filtro de aire mediante comportamientos teóricos y parámetros reales. Esto se llevó a cabo para así demostrar el alcance que tiene un sistema de monitoreo y la importancia del análisis de datos para el mantenimiento predictivo. También, se exploraron otros algoritmos capaces de predecir resultados con mayor exactitud, dejando abierta la oportunidad de profundizar más en el tema de la ciencia de los datos y la información.

Finalmente, mediante estimaciones de las pérdidas económicas ocasionadas por los mantenimientos correctivos que se pueden detectar con antelación implementando el sistema de monitoreo, se utiliza el indicador financiero del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) para comparar el caso actual contra la implementación del proyecto a los sistemas de climatización antes definidos. Se estiman ahorros de hasta tres millones de colones anuales para las unidades de aire acondicionado y dos punto cinco millones de colones para el sistema de refrigeración.

Palabras clave:

Sistema de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, predicción del rul, redes neuronales, sistemas de aire acondicionado, sistema de refrigeración

Abstract

This project proposes the design of a monitoring and fault detection system based on the prognostic and health evaluation of the different air conditioning systems, located in the Biotechnology Laboratory of the Technological Institute of Costa Rica. Ignoring the health state of these systems, lots of ongoing research, academic experiments and crucial materials are exposed to sudden failures, which compromise the main functions of this research center. Furthermore, the Maintenance Department must pay out source services for corrective maintenance that could be prevented with the implementation of a monitoring system.

After the Critical Analysis of the systems, it was established that the environmental air condition systems that require most control in the premises are five air conditioning units, a refrigeration and a ventilation system. With the Failure Modes and Effects Analysis, every system was examined to establish the monitoring parameters that should be controlled constantly. These variables are the ones that would be taken into account to design the monitoring system for each system.

Later, with the LabVIEW software, the monitoring system was developed for all the climatization units, being capable of warning about any abnormal behavior and notify the stakeholders about actual situation. As data is shown in the program's interface, the information is being collected and stored for further studies with different computer tools.

Then, the simulation of the Remaining Useful Life (RUL) was proposed with an MLP Neural Network for an air filter, based on theoretical behaviors and real parameters. The purpose of this section is to demonstrate the scope that a monitoring system can reach, and also, the value of the data science in the Predictive Maintenance field. Also, different, and

more powerful algorithms were tested to predict values with more precision, opening the opportunity to further explore on the topic of data and information science.

Finally, after estimating the economic losses caused by the corrective maintenance operations, which can be detected in advance by the monitoring system, Equivalent Annual Cost is used to compare the current case against the implementation of the project. It is estimated that around three million colones can be saved installing the monitoring unit on the five air conditioning systems and two point five million colones in the refrigeration system.

Keywords:

Monitoring system, fault detection and diagnostics, prediction of RUL, Neural Networks, air conditioning system, refrigeration system.

1. Capítulo I: Introducción

1.1. Introducción

El Instituto Tecnológico de Costa Rica es una universidad líder en el país en lo que respecta al uso de nuevas tecnologías. Esto se debe ver reflejado no solo en el área académica y de investigación, sino también en las diferentes prácticas de mantenimiento que se dan en sus instalaciones. Ante el auge de la implementación de novedosos métodos de mantenimiento a nivel industrial y, para seguir el rumbo tecnológico de la institución, se realiza este proyecto.

Los costos de mantenimiento, el ahorro energético y las condiciones de climatización necesarias, son las principales preocupaciones al instalar un sistema de aire acondicionado. El laboratorio de biotecnología del ITCR debe permanecer bajo ciertos rangos de temperatura y humedad por las investigaciones que se llevan a cabo y que se verían afectadas negativamente si hay un fallo en el sistema de climatización. Es así como el Departamento de Administración en Mantenimiento del ITCR debería tener una herramienta para controlar de manera más eficaz los aspectos antes mencionados.

En los últimos años, se han realizado investigaciones y pruebas sobre diferentes métodos para el análisis, diagnóstico y detección de fallas para los diferentes sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés), como para las manejadoras de aire y los *chillers*. Un ejemplo de esto sería la investigación de Wang, Wang, He, Gu, y Yan, (2017) en su investigación, quienes utilizaron su método propuesto, basado en redes Bayesianas, para la identificación de nuevos tipos de fallas con alta precisión.

Mientras que, en la industria, diferentes empresas ya implementan sistemas de monitoreo y control para sus instalaciones, garantizándole al cliente ahorros de energía, programación de mantenimientos computarizados, detección temprana de problemas y entre otros aspectos. Es así como el ITCR, pionero en innovación, podría implementar estos sistemas inteligentes de detección de fallas para la optimización de procesos de mantenimiento y así ser parte de la Industria 4.0 (I4.0).

1.2. Reseña de la empresa

Como lo describe el Instituto Tecnológico de Costa Rica (2020b) en su página web, esta es una institución nacional autónoma 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 ley No. 4.777 del 10 de junio de 1971.

Durante la gestión del presidente de la República, José Figueres Ferrer, tanto él como el presidente de la Asamblea Legislativa, Daniel Oduber Quirós, 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 otras dejando de lado dos opciones: un programa de desarrollo agropecuario y una carretera a San José.[...]

El primer rector del Tecnológico de Costa Rica fue Vidal Quirós Berrocal, un ingeniero civil de 33 años con formación en administración de empresas en el Tecnológico de Monterrey. En sus comienzos, el Tecnológico de Costa Rica estuvo instalado en el Edificio Pirie (hoy Casa de la Ciudad), el cual fue donado por la Municipalidad de Cartago.

Dos años después de su creación, en 1973, comenzaron las tres primeras carreras del TEC, opciones totalmente novedosas en el país: Ingeniería en Construcción, Ingeniería en Producción Industrial e Ingeniería en Mantenimiento Industrial. Estas fueron escogidas por las necesidades planteadas en el país y la influencia del contexto mexicano.

Luego de esta etapa, fueron ocurriendo una serie de acontecimientos, como la formación de la carrera de Ingeniería Electrónica, Computación, Administración de Empresas, que fueron dando a lo que es el ITCR hoy en día. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020b)

Misión:

Contribuir al desarrollo integral del país, mediante formación del recurso humano, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico, tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego a las normas éticas, humanísticas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad a nivel nacional e internacional. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020b)

Visión:

El Instituto Tecnológico de Costa Rica seguirá contribuyendo mediante la sólida formación del talento humano, el desarrollo de la investigación, la extensión, la acción social y la innovación científico-tecnológica pertinente, la iniciativa emprendedora y la estrecha vinculación con los diferentes actores sociales a la edificación de una sociedad más solidaria e inclusiva; comprometida con la búsqueda de la justicia social, el respeto de los derechos humanos y del ambiente. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020b)

El fin del ITCR es formar profesionales en el campo tecnológico que aúnen al dominio de su disciplina, una clara conciencia del contexto socioeconómico, cultural y ambiental en que la tecnología se genera, transfiere y aplica; lo cual les permite participar en forma crítica y creativa en las actividades productivas nacionales. Así como Generar, adaptar e incorporar en forma sistemática y continua, la tecnología necesaria para utilizar y transformar provechosamente para el país los recursos y fuerzas productivas.

Departamento de Administración de Mantenimiento (DAM)

Ahora, el departamento en el cual el proyecto va a estar apoyado es el de Administración de Mantenimiento. Según su página web, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (2020a) define que este departamento se divide en dos unidades: Unidad Civil, encargada de las zonas verdes, lavado a presión de edificios, pintura, carpintería, mantenimiento, remodelación de edificios e infraestructura. La segunda unidad es la Electromecánica, encargada del área eléctrica, fontanería, soldadura, redes, equipos móviles, aire acondicionado y electrónica.

Misión:

Velar por la conservación y seguridad de los bienes muebles así como del mantenimiento de servicios básicos de agua, electricidad y teléfonos necesarios para el desarrollo de las actividades y fines del ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020a).

Visión:

- Velar por el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas eléctrico y mecánico de los equipos e instalaciones que conforman las instalaciones de la institución.
- Velar por el mantenimiento preventivo y correctivo de la planta física de la institución.
- Brindar mantenimiento a las zonas verdes de la institución.
- Mantener en operación la planta de tratamiento de aguas negras del ITCR.
- Velar por la seguridad e higiene del espacio laboral, así como los bienes muebles e inmuebles de la institución. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020a)

2. Capítulo II. Planteamiento del problema

2.1. Antecedentes

Los sistemas de monitoreo han sido muy utilizados en diferentes localidades a nivel mundial. Belhadj, Hamanah, y Kassas (2017) diseñaron un sistema de monitoreo en tiempo real con la herramienta LabVIEW para tener el control de un sistema residencial de HVAC en Arabia Saudita. Un aire acondicionado (A/C, por sus siglas en inglés) opera bajo condiciones extremas, por lo que decidieron monitorear parámetros eléctricos y ambientales, como humedad, temperatura, caudal del aire, la irradiación, la velocidad del viento y la potencia consumida por los equipos. También especifican que, la herramienta computacional seleccionada presenta un buen desempeño en la comunicación con diferentes componentes y es capaz de mostrar muchas variables en tiempo real para una mejor interpretación de los resultados. Inclusive, el sistema desarrollado terminó siendo un gran aporte para la investigación y educación.

González Romero (2016) expone en su tesis otra aplicación a los sistemas de monitoreo. Diseñó un medidor de eficiencia energética para aires acondicionados basado en el principio de funcionamiento de un SCADA o sistema de supervisión, control y adquisición de datos. Con la ayuda de sus microcontroladores, midió parámetros de humedad relativa, temperatura, velocidad de flujo de aire y además, logró enlazarlos a la red con un módulo wifi para el posterior análisis de los datos obtenidos.

Los sistemas de monitoreo tienen aplicaciones muy amplias y variadas. Serra, Catuogno, De Angelo, y Bossio (2008) diseñaron uno para su investigación con el fin de aplicarlo en turbinas eólicas. Mencionan que es una forma eficiente de reducir costos de mantenimiento y mejorar así la productividad tanto de la máquina como de la empresa.

Además de reducir costos y conocer la condición de los equipos en tiempo real, los sistemas de monitoreo pueden lograr un alcance aún mayor. Tal es el caso de la investigación de Coble y Hines (2011), la cual consistió en mostrar los pasos desde la recolección de datos, detectar comportamientos anómalos y determinar la falla correspondiente hasta obtener la vida útil remanente del equipo analizado. Así, es posible implementar las nuevas tecnologías y tendencias sobre Industria 4.0 y optimizar procesos de mantenimientos y de producción.

2.2. Planteamiento del problema

En la actualidad, los sistemas de climatización de los laboratorios de biotecnología no poseen un sistema de monitoreo para el control y evaluación de los equipos. Esto conlleva a una serie de consecuencias no solo para los sistemas, sino también para la aplicación por los cuales fueron instalados, así como para el ITCR.

Hay parámetros muy importantes que se deben tener en cuenta al instalar un equipo de climatización. De acuerdo con Sreedharan (2001), estos serían los costos de mantenimiento, la energía consumida y la vida útil del equipo. En este caso, el mantenimiento se realiza cada vez que ocurre una falla, lo que significa mayor dinero en repuestos y más horas hombre que no se aprovechan adecuadamente porque, en lo que la persona encargada revisa el sistema y hace un diagnóstico, se invierte incorrectamente el tiempo del operador. El sistema se instaló, pero no hay información de que se monitoree. Esto va de la mano con la vida útil de los equipos. Entre mejor se cuide el sistema, el tiempo de funcionamiento se prolongará.

Como no se toman en cuenta ninguno de estos parámetros, el sistema de aire acondicionado puede ser ineficiente en muchos aspectos, tanto en sus equipos como en el

nivel de confort de los ocupantes, como lo exponen Trojanova, Vass, Macek, Rojiček, y Stluka (2009). Además, los autores también mencionan que los ahorros energéticos pueden estar relacionados directamente con un sistema experto, como el que se propone para este trabajo.

Con respecto a lo anteriormente expuesto, Najafi, Auslander, Bartlett, Haves, y Sohn (2012) indican que se ha encontrado que de un 5 % - 15 % de ahorro energético es posible con solo implementar un sistema de estos y optimizando los sistemas de control. Cabe destacar que el caso de estudio en el presente documento carece de estos controles en los equipos. Najafi et al. (2012) también manifiestan que las fallas por operación son una de las causas por lo que los sistemas de HVAC pueden terminar siendo ineficientes.

Parte de esta ineficiencia se puede demostrar dentro de los laboratorios de biotecnología, el cual presenta uno de los problemas principales: el exceso de humedad por los diferentes fallos del sistema de aire acondicionado. Subils (1991) afirma que si se sobrepasa de los rangos establecidos de humedad dentro de este tipo de recintos, se favorece el incremento de hongos y otros contaminantes microbiológicos, lo cual pone en riesgo no solo la salud de los ocupantes, sino también la calidad del equipo dentro del recinto y las investigaciones en curso. Debido a lo anterior, fallos repentinos y un monitoreo inexistente del sistema de climatización puede resultar bastante crítico desde este punto de vista.

Los costos de mantenimiento, control de la energía consumida, la vida útil de los equipos e investigaciones realizadas dentro del recinto son algunos de los muchos parámetros que se descuidan o de los cuales no se tienen control actualmente, por lo que implementando el sistema propuesto se pueden minimizar costos y evitar fallas repentinas en el equipo de HVAC.

2.3. Objetivos del proyecto

Objetivo general

Diseñar un sistema inteligente de modos de falla basado en el pronóstico y evaluación de la salud para el mantenimiento de los sistemas de acondicionamiento del Laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Objetivos específicos

- 1- Examinar los sistemas de climatización por medio de un estudio de Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE) para la construcción de un registro de datos.

Indicador de logro: AMFE de los sistemas

- 2- Desarrollar un sistema de monitoreo de los sistemas de climatización por medio de herramientas computacionales como LabVIEW para la evaluación y diagnóstico de su desempeño operacional.

Indicador de logro: Sistema de monitoreo

- 3- Desarrollar una simulación de la Vida Útil Remanente (RUL) de un elemento crítico de los sistemas de acondicionamiento por medio de programas como Python y RapidMiner para ejemplificar el alcance de un sistema de monitoreo.

Indicador de logro: Simulación del RUL

- 4- Determinar la viabilidad financiera del sistema inteligente basado en los costos de implementación mediante el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

Indicador de logro: el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

2.4 Justificación del proyecto

El ITCR, como lo dice su misión, es líder a nivel nacional en áreas científicas, tecnológicas y técnicas, por lo que debe estar actualizado con las diferentes formas de mantenimiento que existen hoy en día y las que apuntan al futuro. Por eso, se debe cambiar el paradigma actual y encaminar a la universidad hacia la Industria 4.0.

Actualmente, el departamento de mantenimiento solo realiza trabajos correctivos y los registros de los equipos son pocos y además están en papel. Del Val Román (2016) establece que “La I4.0 es un nuevo modelo de organización y de control de la cadena de valor a través del ciclo de vida del producto apoyado y hecho posible por las tecnologías de la información,” por lo que implementar un sistema inteligente de modos de falla iniciaría el cambio hacia mantenimientos más eficientes y apoyados en la tecnología, teniendo así un registro actualizado, digital y ordenado de los equipos.

Las ventajas de instalar un sistema experto son muchas, tal y como lo expone Lauriac (2016), quien destaca estos sistemas como una ayuda a la toma de decisiones para alcanzar los resultados esperados. De hecho, verifica que la operación sea la adecuada según los parámetros establecidos en un inicio. Es así como la instalación de un sistema inteligente en el aire acondicionado de estos laboratorios sería de gran ayuda para los operarios al momento de realizar los trabajos de mantenimiento necesarios.

Cuando se habla sobre implementar sistemas de monitoreo en equipos críticos, inmediatamente se relaciona con el mantenimiento predictivo de estos. Sus beneficios van de la mano con los de aplicar nuevas tecnologías y tiene ciertos aspectos superiores, comparado a otros métodos de mantenimiento, como la reducción de costos y, un punto muy importante, el aumento de la seguridad en el funcionamiento de los equipos. Esto se logra por tener una

vigilancia constante de los equipos, según Mosquera, De la Victoria, y Armas (2001). Es por lo que, aplicando este mantenimiento, no solo se tendrán aspectos positivos en cuanto a aspectos técnicos, sino también energéticos y económicos.

Ahora, también Mosquera et al. (2001) mencionan que el mantenimiento predictivo, como lo dice su nombre, se basa en predecir a través de mediciones continuas o periódicas ciertos parámetros obtenidos con dispositivos y con la opinión técnica de los operadores. Una vez que se tienen estos datos, el sistema inteligente interviene y se logra una detección temprana de las fallas. Así, la respuesta de los operarios será más eficiente y se acortarán los tiempos de espera entre el fallo y la reparación o mantenimiento.

Validando lo anterior, Alcántara (2019) presenta que según un reporte de PricewaterhouseCoopers en México, entre los resultados que se han obtenido se puede mencionar que algunas empresas han estado invirtiendo en mantenimiento predictivo 4.0. Han incrementado hasta en un 60% el tiempo que la máquina está operando (desempeño del uptime), redujeron costos hasta en 12%, riesgos relacionados con la seguridad y medio ambiente en 14% y lograron extender la vida de las máquinas hasta en un 20%. Los beneficios de implementar sistemas basados en la Industria 4.0 son notorios e impactan positivamente a muchas organizaciones.

En la norma ISO/IEC 17025, en la sección de requisitos técnicos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, la International Standardization Organization (2017) menciona la importancia de monitorear las condiciones internas para asegurar un ambiente óptimo para las diferentes prácticas dentro de los laboratorios. También, Subils (1991) menciona que la humedad relativa debe estar dentro de un rango preferible del 30 % al 50 % para estas aplicaciones, por lo que, instalar un sistema como el propuesto, permite que las condiciones necesarias para este tipo de recintos no se vean

afectadas en gran medida y se pueda intervenir el equipo de climatización a tiempo en caso de fallos y alertas.

La implementación de este sistema inteligente para modos de falla no solo aporta múltiples beneficios al lugar donde se encuentra el equipo al que se le aplicará, sino que también va en el mismo rumbo al cual está dirigido el país. Así es como el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Telecomunicaciones y Gobernanza Digital (MICITT, 2015) menciona, en el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, que es de mucha importancia que se haya identificado con claridad que la innovación no es una actividad exclusiva de un grupo específico, tiene presencia en diversos sectores y da indicios de las características que muestran correlación entre innovación y crecimiento económico. Con este proyecto se le está aportando al país y al ITCR conocimiento tecnológico y nuevas técnicas de mantenimiento.

2.5. Viabilidad

Durante la ejecución del proyecto, se necesita recolectar datos de funcionamiento del sistema de aire acondicionado, los cuales serán proporcionados por los operadores. Hay otra manera de obtener datos y es mediante la instalación de sensores. La universidad posee convenios y descuentos de parte de algunas empresas, por lo que es factible la compra.

Para implementar un sistema inteligente de modos de falla se necesita de diversos softwares, tanto para el procesamiento de datos como para la detección de fallas. Para crear el programa que lo lleve a cabo, los especialistas en el tema los facilitarán para lograr un correcto desarrollo del proyecto y cumplir con los objetivos.

Con relación al capital humano, se tiene el necesario para ejecutar el sistema. El personal del Departamento de Administración de Mantenimiento (DAM) dará las recomendaciones y supervisión técnica requerida. Mientras que en el área teórica de simulación y de implementación se tendrá el apoyo del profesor guía y de un profesor experto en mantenimiento predictivo y sistemas expertos. También, el encargado de realizar el proyecto tiene las habilidades y equipo necesario para llevarlo a cabo.

2.6. Metodología

El proyecto por desarrollar consta de cuatro etapas principales, las cuales deben cumplirse en el orden en el que se plantean, debido a que una debe completarse en su totalidad antes de que la siguiente comience.

1- Estudio de criticidad de los sistemas de climatización.

Lo primero que se debe hacer es un análisis de los equipos que conforman el sistema de climatización del laboratorio. Lo anterior para realizar un estudio de criticidad y así comenzar con la construcción de un registro de datos. Esto se logra consultando los aspectos técnicos con los operarios y verificando el estado de operación de los equipos en sitio.

Tener un registro de datos es de suma importancia, ya que esta información es la que se va a utilizar para desarrollar la simulación y el sistema de monitoreo. El fin de esta etapa del proyecto es determinar los equipos críticos y prestarles especial atención para un adecuado análisis posterior.

2- Desarrollar el sistema de monitoreo

Para esta etapa ya se tiene un registro de los equipos críticos del sistema de aire acondicionado. Después, se procede a determinar las variables que se van a medir en los equipos ya mencionados. Como en la etapa anterior, este paso se realiza en conjunto con los operarios ya que tienen mayor experiencia con el sistema. De igual manera, si se presenta la posibilidad de utilizar sensores sería ideal, pues se obtendrían más datos y su precisión es superior a otros métodos de medición.

Una vez que se tengan los sensores por utilizar se procede a realizar el sistema de monitoreo mediante programación gráfica, de la cual dispone el software LabVIEW. De esta manera, se debe hacer una interfaz sencilla, eficiente y amigable para que los operarios y partes interesadas puedan desenvolverse con el sistema. Dentro de la programación, se debe configurar para que los datos recolectados se almacenen y así generar una base de datos para su posterior análisis.

3- Simulación del RUL

Se sabe que teniendo un sistema de monitoreo, los datos obtenidos se pueden analizar y así programar mantenimientos inteligentes y basados en la condición actual de los equipos. Asimismo, esta información que se almacena con respecto al tiempo se puede utilizar para predecir los comportamientos operacionales de dichos equipos. Este punto es totalmente investigativo y el propósito es demostrar el potencial que tiene implementar un sistema de monitoreo determinando la vida útil remanente de un elemento crítico de los sistemas antes analizados.

4- Viabilidad financiera del sistema inteligente

Una vez que se diseñe el sistema inteligente, se analizan datos como costos operacionales, costos de mantenimiento según el fabricante y se comparan con los mismos parámetros de antes de la implementación del sistema de monitoreo, para así tener el dato real del aporte, sea económico o en términos de mantenimientos. La viabilidad financiera será determinada con el indicador del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

2.7. Alcance del proyecto

El proyecto busca mejorar los procesos y prácticas de mantenimiento que se utilizan actualmente en el sistema de aire acondicionado del laboratorio de biotecnología. Para que los trabajos sean más eficientes, se puedan tomar acciones inmediatas cuando ocurre una falla y tener un registro completo de estas, contribuyendo de manera positiva el accionar del DAM.

El diseño e implementación de este sistema inteligente representaría un cambio de paradigma en los mantenimientos tradicionales y migraría hacia lo que es la cuarta revolución industrial. Esto no solo beneficiaría a la operación del DAM, sino también a la Escuela de Biotecnología y al ITCR en general y a su imagen, fomentando el uso de estas tecnologías para sus propias instalaciones.

2.8. Limitaciones

En lo que respecta a los sistemas inteligentes, es un tema poco abarcado en el país y en la Escuela Electromecánica, por eso, para el desarrollo de este se necesita acudir a información y estudios realizados en otras latitudes, por lo que puede considerarse como una limitante. El acceso a los softwares necesarios para este diseño se puede ver comprometido, ya que hay programas tanto de acceso libre como de los que disponen de una licencia, por lo que podría afectar en algunos aspectos de precisión en los cálculos y procesamiento de datos.

Debido a la situación por la cual está pasando el país y el mundo (COVID-19), las visitas al sitio se ven comprometidas y son sujetas a cambios en todo momento, lo que puede generar retrasos en el avance del proyecto. Como una solución alternativa están los medios digitales, sin embargo, al ser un sistema que se pretende instalar en el lugar, de igual manera pueden surgir ciertas complicaciones.

3. Capítulo III. Marco teórico

3.1. Marco teórico

Sistemas expertos

Por definición, “un Sistema Experto es un sistema que emplea conocimiento humano capturado en una computadora para resolver problemas que normalmente requieran de expertos humanos” (Badaró, Ibañez, y Agüero, 2013). La idea principal de estos sistemas es imitar el proceso de razonamiento que normalmente se utiliza para resolver problemas. Dependiendo de su diseño, pueden hasta funcionar mejor que cualquier humano experto tomando decisiones.

Los Sistemas Expertos (SE) tienen los siguientes componentes básicos (Badaró et al., 2013):

- Subsistema de adquisición de conocimiento: consta de acumular y transformar la experiencia para resolver mediante un medio computacional.
- Base de conocimiento: tiene el conocimiento adecuado para comprender, formular y resolver problemas.
- Base de hechos: es una memoria que se encarga de contener los hechos sobre un problema.
- Motor de inferencia: es conocido como la estructura de control, este componente es un programa utilizado para el razonamiento de información en la base de

conocimiento. Consta de tres elementos principales: el intérprete, el programador y el control de consistencia.

- Subsistema de justificación: explica el comportamiento del SE encontrando soluciones.

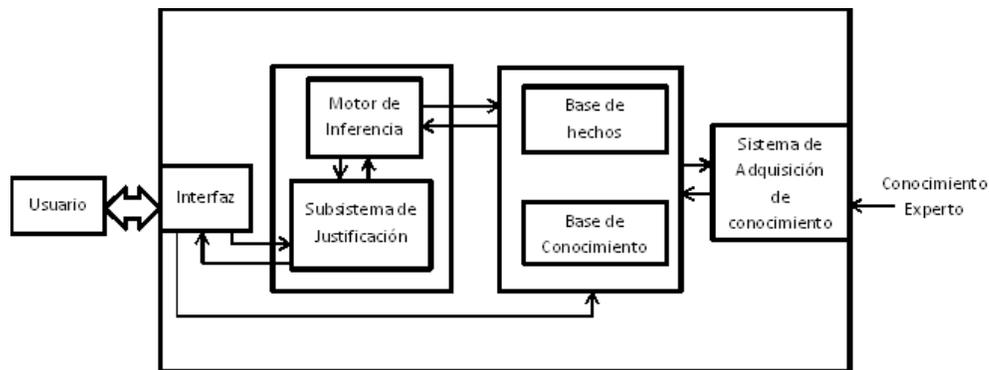


Figura 1. Estructura de Sistema Experto, a partir de Badaró et al. (2013)

Badaró et al (2013) también establece que hay varios tipos de Sistemas Expertos, entre ellos:

- Basados en reglas previamente establecidas: se les aplica las reglas, comparan resultados y aplican nuevas reglas basadas en la situación modificada.
- Reglas «Si ... entonces...»: son el principal tipo de conocimiento utilizado en SE. Capturan razonamiento de expertos que se emplean a menudo.
- Basados en caos: se basa en solucionar nuevos problemas basándose en las soluciones de problemas anteriores. Es una manera de razonar haciendo analogías.
- Basados en redes Bayesianas: representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales a través de un gráfico autodirigido.
- Sistemas Expertos difusos: se desarrollan bajo el concepto de lógica difusa, que trabaja con incertidumbre

Redes Neuronales

La estructura de un sistema neuronal biológico está conformada por células, llamadas neuronas. Están compuestas por el cuerpo de la célula, dendritas y axones. Las neuronas están masivamente interconectadas desde el axón de una neurona hasta la dendrita de otra, llamada conexión sináptica. Señales son enviadas y recibidas en todo momento, compartiendo gran cantidad de información.

Una neurona artificial (AN) sigue el modelo de una biológica. Cada AN recibe señales del ambiente o de otras AN y las transmite a las demás. Se trata de un elemento que recibe datos de entrada, sean positivos o negativos, la neurona los procesa con una función de activación y como resultado da una señal de salida (Engelbrecht, 2007).

Una red neuronal (NN) consiste en capas formadas por un conjunto de neuronas artificiales, la cual consiste generalmente en capas de entrada, capas ocultas y capas de salida, como se muestra en la Figura 2. Las AN pueden estar parcial o completamente conectadas con las de la siguiente capa, e inclusive pueden tener conexiones hacia atrás, es decir, con capas anteriores.

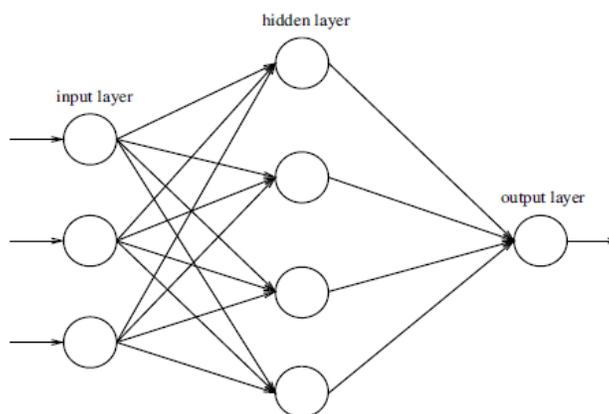


Figura 2. Red Neuronal Artificial. Tomado de Engelbrecht (2007)

Al ser un sistema compuesto, las redes neuronales se pueden entrenar para tener resultados más precisos, por consiguiente, necesitan aprender del comportamiento de los datos que se les brindan. Existen tres principales tipos de aprendizaje:

- 1- Aprendizaje Supervisado: consiste en que a una neurona o a la NN se le provee los datos de entrada y también la salida deseada asociada con cada input. El objetivo es ajustar el valor de los pesos para minimizar el error entre el output real y el obtenido del sistema.
- 2- Aprendizaje No Supervisado: el objetivo es descubrir los patrones o características en los datos de entrada sin una ayuda externa.
- 3- Aprendizaje por Refuerzo: consiste en premiar a la neurona por su rendimiento o más bien penalizarla por mal desempeño.

Aire acondicionado

Primeramente, se debe tener claro lo que es la climatización. Este es un proceso de tratamiento del aire que se efectúa a lo largo del año, considerando parámetros como la temperatura, la humedad, la pureza y velocidad del aire. Esto con el fin de crear condiciones adecuadas para los usuarios y tomando en cuenta las consideraciones especiales que se requieran (Colocho, Daza, Guzmán, y Brito, 2011).

El aire acondicionado se utiliza para crear las condiciones adecuadas según una necesidad específica. Este es un sistema utilizado para controlar la temperatura en un espacio, la salida del aire, eliminación de humedad en el aire, la circulación y limpieza de aire

(Colocho et al., 2011). Los sistemas de A/C están constituidos por cuatro principales elementos:

- Compresor
- Condensador
- Evaporador
- Válvula de expansión

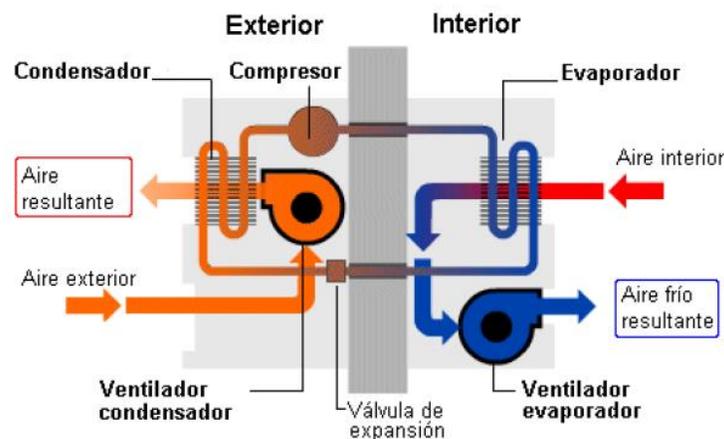


Figura 3. Elementos principales de A/C. Recuperado de www.tecnologia.org

El ciclo de operación de estos sistemas se basa en cuatro etapas. El refrigerante, inicialmente, se encuentra en estado líquido a baja presión, esto para evaporarse al pasar por un serpentín o evaporador para el respectivo intercambio de calor, como se aprecia en la Figura 3.

El refrigerante, que ahora se encuentra en estado gaseoso, es succionado por el compresor, aumentando temperatura y presión. Luego, debe pasar por otro serpentín para su respectiva condensación. Mediante la válvula de expansión, se nivela la presión y temperatura, para posteriormente repetir el ciclo de refrigeración.

Existen diferentes tipos de aires acondicionados, algunos de ellos son:

- Sistema de aire acondicionado Compacto: equipo unitario, compacto. El aire es expulsado directamente al espacio a través de la unidad.

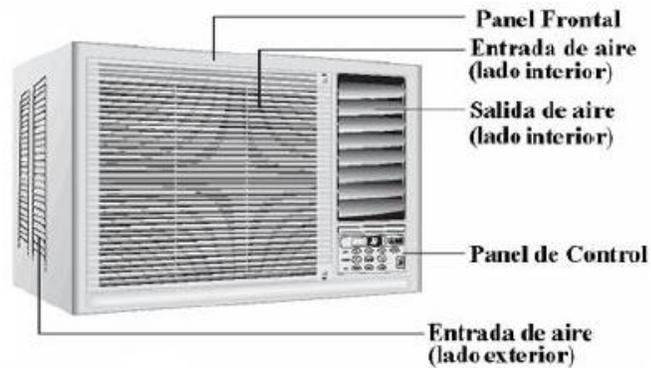


Figura 4. Sistema de A/C Compacto. Tomado de Manual de operaciones Carrier

- Sistema de aire acondicionado Portátil: equipo unitario, compacto, el aire enfriado es expulsado directamente al espacio a través de la unidad. Es óptimo para habitaciones de viviendas y pequeños locales.
- Sistema de aire acondicionado tipo Split: el compresor y el condensador están situados en el exterior, se comunican entre sí por las líneas de refrigerante y conexiones eléctricas.
- Sistema de aire acondicionado Central Separado: el aire se distribuye a través de ductos y es expulsado en los diferentes espacios por medio de difusores. Cuenta con una unidad evaporadora y una condensadora. Se conectan entre sí por medio de una tubería de cobre de dos líneas, la primera para el refrigerante y otra para el retorno.

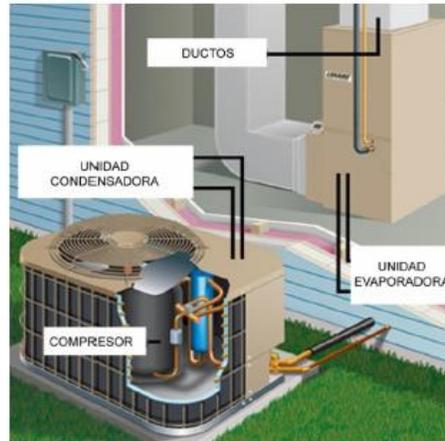


Figura 5. Componentes de sistema de aire acondicionado separado. Tomado de aireacondicionado.com

- Sistema de aire acondicionado tipo Paquete: son de tipo central, todas las unidades están contenidas, es decir, el condensador y el evaporador se encuentran en el mismo sistema y el aire se distribuye por medio de ductos.
- Sistema de aire acondicionado tipo Chiller: el aire se distribuye a los diferentes espacios a través de ductos. Se compone por un sistema central que se encarga de enfriar un fluido, el cual se distribuye a los diferentes equipos de enfriamiento ubicados en las áreas que requieren climatización.



Figura 6. Sistema de aire acondicionado tipo Chiller. Tomado de la página web de York

Industria 4.0

Del Val Román (2016) define la I4.0 como “un nuevo modelo de organización y de control de la cadena de valor a través del ciclo de vida del producto apoyado y hecho posible por las tecnologías de la información”. Este nuevo término también engloba el modelo del Internet de las cosas. En general, estos conceptos tienen en común un proceso de transformación digital de la información, que viene de las tecnologías de la informática y el software.

La necesidad de modificar la industria viene de la mano con las necesidades del cliente. Los servicios y productos deben ser cada vez más innovadores, lo que lleva a añadir la informática a casi cualquier producto. La inteligencia de esta nueva fábrica es el resultado de una combinación de las tecnologías de la información con otras industriales y el desarrollo de nuevos procesos de organización (del Val Román, 2016).

Hay cuatro pilares que conforman la inteligencia en la Industria 4.0, son:

- Soluciones inteligentes: se basan en los productos inteligentes, los cuales disponen de electrónica, software y conectividad. Estos son sistemas ciber-físicos y son parte del ambiente del Internet de las cosas. Esta misma conectividad es la que permite la comunicación máquina a máquina (M2M, por sus siglas en inglés).
- Innovación inteligente: los nuevos productos y empresas nacen de la innovación que los clientes demandan, y se apoyan en soluciones informáticas como en comunidades virtuales o herramientas para el manejo del ciclo de vida del producto (PLM).
- Cadenas de suministro inteligentes: estarán altamente automatizadas e integradas. Será posible por la integración del software y las comunicaciones en la industria.

Usando redes de colaboración ágiles, la industria puede aprovechar muchas oportunidades de un mercado globalizado.

- La fábrica inteligente: se forma por unidades de producción inteligentes (CPPS, por sus siglas en inglés), como se ve en la Figura 7, el producto debe tener distintas características para ser atractivo al cliente. Esta producción se puede organizar según un modelo de oferta-demanda. Cada CPPS puede decidir su programa de producción, basándose a su tiempo de procesamiento, entregas o demás objetivos planteados.

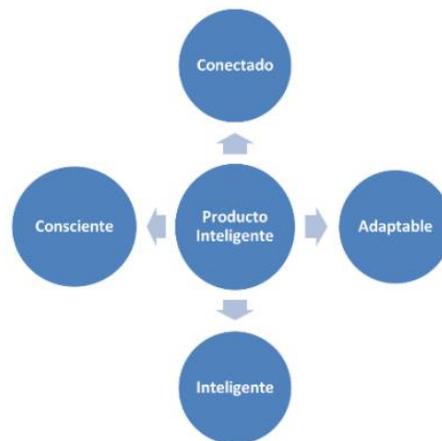


Figura 7. El producto inteligente. Del Val Román (2016)

Existen tecnologías que son básicas para sustentar la Industria 4.0. Estas se pueden apreciar en la figura 8.

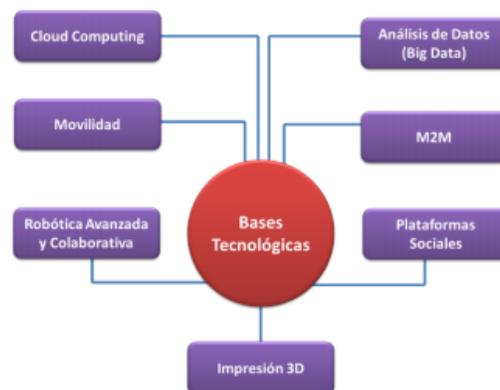


Figura 8. Bases tecnológicas de la I4.0. Del Val Román (2016)

LabVIEW

LabVIEW es un software de la compañía National Instruments (2020), la cual en su página web describe que es un programa de ingeniería de sistemas para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos. También, LabVIEW, ofrece un tipo de programación gráfica que ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación. Desarrolla algoritmos de análisis de datos y diseña interfaces de usuario de ingeniería personalizadas.

El programa dispone que diferentes módulos para aplicaciones variadas, tal es el caso del Módulo LabVIEW Real-Time, el cual se puede utilizar para crear e implementar aplicaciones de sistemas distribuidos en tiempo real para pruebas, monitoreo y control. Tiene ventajas como garantizar la fiabilidad y temporización precisa en un sistema autónomo. Como se muestra en la Figura 9, tiene diferentes módulos y controladores en los cuales se puede tener automatizar cualquier proceso y visualizar los datos tanto en un ordenador fijo como en una aplicación móvil.

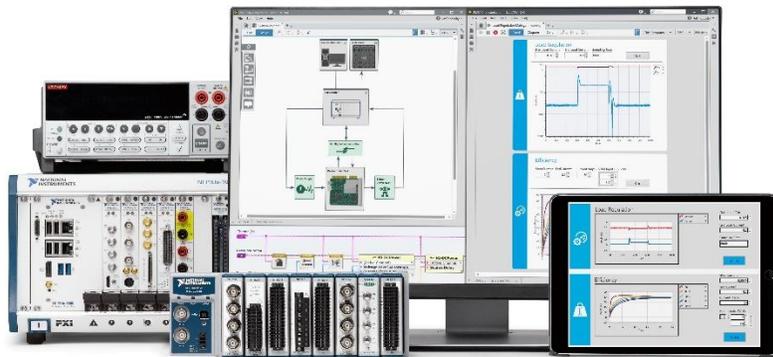


Figura 9. Características de LabVIEW para pruebas automatizadas. National Instruments (2020)

Enfoque de sistemas de ingeniería

Según el Consejo Internacional de Ingeniería en Sistemas (INCOSE, por sus siglas en inglés) un sistema es definido como un conjunto de elementos o ensambles integrados para cumplir un objetivo definido. La función principal de un enfoque de sistemas de ingeniería es darle objetividad a la solución de un problema, analizando y entendiendo los comportamientos deseados del sistema a lo largo de su ciclo de vida (Montero Jiménez y Vingerhoeds, 2019).

Basado en los deseos y necesidades de los interesados en el modelo, Brazier, Van Langen, Lukosch y Vingerhoeds (2018) resumen los requerimientos para estos sistemas en la Tabla 1, en la cual están los funcionales que hablan sobre el sentido y propósito del sistema, y los de comportamiento que se miden mediante los indicadores clave de desempeño y especifican los comportamientos deseados del sistema con respecto a su misión. Los de estructura se basan en definir las funciones de los componentes del sistema y sus interdependencias, mientras que los de experiencia se definen el impacto deseado del sistema aplicado en el mundo real, ante aplicaciones reales.

Tabla 1.

Requerimientos funcionales, de comportamiento, estructurales y de experiencia

Funcional	El propósito del sistema	¿Por qué? ¿Para quién? ¿Dónde?
Comportamiento	La forma en que el sistema trabaja	¿Cómo? ¿Cuándo?
Estructura	Los componentes del sistema y sus interacciones	¿Qué?
Experiencia	Sentimientos, emociones, percepciones hacia el sistema	¿Con quién? ¿Por quién? ¿Con qué efecto?

Nota. Recuperado de Brazier et al. (2018)

Vida Útil Remanente (RUL)

La vida útil remanente es un término que se utiliza para el pronóstico del estado de una máquina o también, es el tiempo de un componente que se espera que continúe operando bajo las condiciones esperadas, como sus comandos de entrada, el ambiente en el que se encuentra y las cargas a la cuales se ve sometido (Kai, Abhinav, Matt, Jose, y Roychoudhury, 2012). El tipo de mantenimiento basado en el Pronóstico de fallas y Gestión de la Salud (PHM, por sus siglas en inglés) utiliza este término como indicador para el pronóstico de los equipos y así tomar decisiones inteligentes y eficaces. Para calcular el RUL se necesita de un sistema de monitoreo para adquirir los datos necesarios, los cuales serán preprocesados por medio de filtros computacionales. Posterior a esto, se deberá realizar una extracción de características y así llevar a cabo los pronósticos deseados.

En la Figura 10 se tiene un ejemplo de la estimación del RUL. Las tendencias color rosa y celeste son las aproximaciones que se obtuvieron con respecto a la gráfica del medio. Esto quiere decir que el sistema tiene un margen de error en sus predicciones y es probable que sea necesaria una intervención al equipo en ese rango de tiempo. Entre más datos históricos se tengan de los equipos, mejor será la predicción del sistema, sin embargo, el margen de error siempre va a existir ya que las condiciones de operación de cualquier máquina siempre van a variar, aunque no sea detectado por el ser humano.

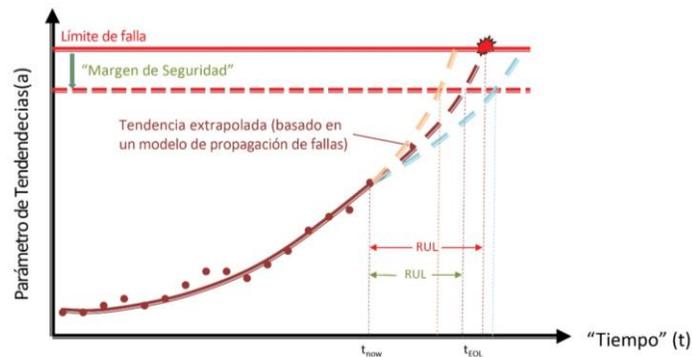


Figura 10. Estimación del RUL. Goebel et al. (2012)

4. Capítulo IV. Análisis de los sistemas de climatización

4.1. Análisis de criticidad

En la primera visita a los laboratorios del Centro de Investigación en Biotecnología, se realizó una inspección a los diferentes sistemas de climatización presentes en los recintos. Se detectaron equipos de aire acondicionado en su mayoría, algunos sistemas de inyección y extracción de aire y un cuarto frío. Se conversó con la ingeniera Ana Laura Agüero Hernández, una de las investigadoras del centro, quien establece que las investigaciones que más se pueden ver afectadas por las condiciones ambientales son las que se llevan a cabo en los laboratorios de Crecimiento Vegetal *in vitro*. Se dispone de dos cuartos para estos estudios, los cuales deben mantener su temperatura lo más estable posible todos los días de la semana, las 24 horas, ya que hay especies de clima frío y otras de caliente, 20 °C y 27 °C respectivamente.

Hay otros recintos que también deben tener su temperatura controlada y, en este caso, se debe a los equipos que disponen. Los laboratorios de Biología Molecular y de Biocontrol tienen ultracongeladores dentro de su equipamiento, por lo que estos cuartos deben estar a una temperatura de 21°C idealmente por 12 horas, de 7:00 a m a 7:00 p m. El otro cuarto dependiente de la temperatura es en el que se encuentran los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés), el cual debe mantenerse en un rango de 20 – 22 °C, según como menciona el proveedor.

Los demás recintos poseen el mismo sistema de aire acondicionado, splits de pared para oficinas y de ducto para los otros laboratorios. Generalmente, se utilizan para el confort de estudiantes y funcionarios.

En cuanto a los sistemas de ventilación, hay algunos laboratorios que poseen extractores, sin embargo, el de Crioconservación posee un sistema de emergencia de inyección – extracción. Esto se debe a que trabajan con nitrógeno líquido, lo cual puede comprometer la vida de los ocupantes en caso de fuga ya que este desplaza el oxígeno. Así, cuando el sensor de oxígeno detecta un porcentaje bajo activa el sistema de emergencia, extrayendo el aire contaminado e inyectando aire fresco al recinto.

El otro cuarto que debe tener condiciones controladas es el cuarto frío. Este se debe mantener a una temperatura de 4 °C para conservar los productos y equipos que se encuentran en su interior.

Analizando los diferentes sistemas de climatización existentes, se determina, preliminarmente, que los equipos críticos de A/C corresponden a los que están a disposición de los laboratorios de Crecimiento Vegetal *in vitro*, de Biología Molecular y de Biocontrol, así como el cuarto en el que se encuentran las UPS. Se consideran también como críticos el sistema de emergencia de ventilación y el sistema de refrigeración para el cuarto frío.

Se procede a realizar los análisis de criticidad a cada conjunto de equipos para así justificar con criterio ingenieril la decisión de implementar el sistema propuesto en este proyecto en estas áreas y equipos. Como se muestra en la Tabla 2, se aplica el respectivo análisis a los sistemas de aire acondicionado para los recintos mencionados en el párrafo anterior. Las tablas del sistema de emergencia y del cuarto frío se encuentran en el Apéndice A.

Según la metodología expuesta en el curso de Administración de Mantenimiento 1 por el ingeniero Carlos Piedra, para los tres sistemas, el método utilizado da puntuaciones mayores a 12, por lo que se consideran equipos CRÍTICOS. Así, se decide realizar el estudio

propuesto en este proyecto a los sistemas de aire acondicionado, de emergencia inyección-extracción y al de refrigeración.

Tabla 2.

Análisis de criticidad para sistemas de A/C

Equipo: Split System AC		Código:	
DATOS DEL EQUIPO		Foto del equipo	
Proveedor:			
Descripción del equipo: Acondicionar los laboratorios a una temperatura ideal para llevar a cabo las operaciones necesarias.			
Características principales : Alimentación 208/230 V			
Valores de referencia: 208/230 V, 17.8 A, 3 TON, R-410A			
Análisis de criticidad			
Criterios de evaluación		Definición	Calificación
A	Impacto en seguridad	Medida en que una falla provoca La exposición riesgos en salud e higiene ocupacional, tanto a los colaboradores como a la comunidad.	1
B	Impacto en el medio ambiente	Medida en que una falla produce emanaciones de gases, partículas en suspensión, derrames químicos, contaminación de todo tipo de aguas y a la tierra.	2
C	Impacto en la producción total	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total de la planta de producción.	2
D	Impacto en la producción de línea	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total a la línea específica de producción donde se encuentra este equipo o instalación.	3
E	Impacto en la integridad de otros equipos	Medida en que por su inadecuada operación repercuten daños a otros equipos.	2
F	Impacto en la calidad	Provoca una alteración directa en la calidad de los procesos productivos, no cumpliéndose los parámetros de calidad establecidos.	3
G	Valor económico	Precio de la máquina.	2
H	Dificultad de adquisición	Su disponibilidad de repuestos no es inmediata y la importación del equipo o instalación requiere de un tiempo prolongado.	1
Calificación del equipo			16
Tipo de equipo		CRÍTICO	
Rúbrica de calificación		Modelo de mantenimiento	
0	Nada importante	Correctivo	
1	Poco importante	Condicional	
2	Importante	Sistemático	
3	Muy importante	Alta disponibilidad	X

4.2. Análisis de modos de falla y efectos

Como establecen Serra et al. (2008) en su investigación, para realizar un sistema de monitoreo se necesita conocer a profundidad el funcionamiento de los equipos, se debe hacer una revisión de las fallas más comunes y de las estrategias de diagnóstico que se aplican actualmente. Por esta razón se procede a analizar cada sistema tomando en cuenta las fallas funcionales, los diferentes modos de falla para cada falla funcional, así como sus efectos y consecuencias.

Inicialmente, se comienza por analizar el sistema de aire acondicionado que se instaló para el cuarto de Crecimiento Vegetal *in vitro*, el cual debe permanecer a una temperatura de 20 °C. Conociendo la función principal del sistema, se toma en cuenta la opinión de la investigadora (A.L Agüero, comunicación personal, 8 de septiembre de 2020) que hace uso de las instalaciones para fines experimentales y académicos, y del ingeniero del DAM para definir las fallas funcionales de la unidad de aire acondicionado. Entre ellas, las principales son:

- 1) El sistema no llega a la temperatura deseada o no funciona del todo
- 2) El compresor presenta problemas para arrancar
- 3) El compresor posee ciclos muy cortos de funcionamiento
- 4) El compresor tiene ciclos extremadamente largos para su aplicación

Ahora bien, basándose en el manual de instalación de Nordyne y los datos de placa del equipo, se establecen los modos y efectos de fallas para cada falla funcional.

- 1.1) **Modo:** los niveles de presión en las tuberías son menores a 3.80 MPa para la zona de alta presión y a 1.72 MPa para la de baja presión, por lo que podría presentarse una fuga de refrigerante en el sistema.

Efecto: al existir la posibilidad de que se presenten fugas, el sistema puede contaminarse con humedad y así dañar componentes críticos como el compresor.

- 1.2) **Modo:** el termostato no funciona de manera adecuada.

Efecto: al existir problemas con el termostato, las señales enviadas son interrumpidas o erróneas, por lo que el nivel de temperatura se va a ver directamente afectado.

- 1.3) **Modo:** se presenta mucha acumulación de partículas en los filtros de aire, por lo que el diferencial de presión es mayor a 150 Pa.

Efecto: se crea una mayor resistencia al paso del aire y se compromete el confort del recinto. Además, el ventilador se verá más forzado, lo que causa una demanda eléctrica mayor y a largo plazo posibles daños mecánicos en el motor de este.

- 2.1) **Modo:** las presiones correspondientes a las zonas de baja y alta presión se encuentran más bajas que los niveles óptimos.

Efecto: como no existe la presión requerida, el compresor no arranca y los demás equipos no pueden cumplir sus funciones.

2.2) **Modo:** el equipo está desconectado de la red o recibe una tensión diferente a 208/230 V.

Efecto: no se encuentra disponible la potencia eléctrica necesaria para que el equipo desarrolle sus funciones.

2.3) **Modo:** la protección del compresor se encuentra abierta.

Efecto: el paso de corriente eléctrica se encuentra interrumpido, por lo que el compresor no puede arrancar y los demás equipos se ven imposibilitados de cumplir con sus funciones.

3.1) **Modo:** hay un exceso de refrigerante R-410A en las líneas del sistema mayor a 1.16 kg.

Efecto: puede presentarse un retorno indeseado de refrigerante líquido al compresor, lo que sería crítico para el sistema.

3.2) **Modo:** la señal emitida por el termostato es intermitente.

Efecto: el motor del compresor puede verse comprometido debido a que debe realizar una mayor cantidad de arranques en un corto periodo de tiempo.

4.1) **Modo:** hay una carga de refrigerante R-410A menor a 1.16 kg

Efecto: como no está presente la cantidad de refrigerante deseada, el compresor se ve obligado a realizar ciclos más largos, disminuyendo así la eficiencia del sistema.

4.2) **Modo:** el serpentín del evaporador está congelado.

Efecto: la temperatura del recinto se encuentra comprometida debido a que se restringe el paso del refrigerante y se puede llegar a un fallo total del sistema.

4.3) **Modo:** el filtro deshidratador de la línea de líquido se encuentra bloqueado.

Efecto: el paso del refrigerante se ve restringido, por lo que llega menor cantidad al evaporador, obligando al compresor a realizar ciclos más largos y el tiempo de climatización del recinto aumentaría.

Con base a la información anterior y la experiencia de los usuarios de los laboratorios, se definen las consecuencias y su respectiva clasificación para cada falla funcional, siendo de tipo Operacional para todos los casos.

- 1) No se cuenta con la temperatura deseada, por lo que los materiales *in vitro* dentro del laboratorio se ven comprometidos hasta una posible pérdida total de las investigaciones.
- 2) No se completa el ciclo de refrigeración, por lo que el sistema no cumple con sus funciones.
- 3) Aumenta la demanda eléctrica y baja la eficiencia del equipo.
- 4) El proceso de enfriamiento del recinto es más lento de lo deseado.

En la Tabla 3 se tiene un resumen del AMFE realizado para el sistema de aire acondicionado del cuarto de Crecimiento Vegetal *in vitro*. Cabe destacar que esta tabla se utilizó para el análisis de los otros cuatro sistemas de A/C, ya que disponen de los mismos equipos.

Tabla 3.

Modos de falla para sistema de a/c del cuarto de Crecimiento Vegetal in vitro

Sistema: A/C lab 20°C		Subsistema				
Función	Falla funcional	Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencias	
1 El equipo debe mantener el laboratorio en una temperatura constante de 20°C	1 El equipo enfría poco o no lo hace por completo	1	Fugas de refrigerante. Los niveles de presión en las tuberías son menores a los establecidos, 3.80 MPa en alta y 1.72 MPa en baja.	No llega suficiente refrigerante al evaporador. Se contamina el sistema con humedad y puede llegar a dañar el compresor y demás componentes.	Operacional: No se cuenta con la temperatura deseada, por lo que los materiales in vitro dentro del laboratorio se ven comprometidos hasta una posible pérdida total de las investigaciones.	
		2	El termostato no funciona de manera adecuada	El termostato brinda señales erróneas, por lo que los parámetros de temperatura no son los deseados.		
		3	Filtros de aire sucios. El diferencial de presión es mayor al recomendado (>150Pa).	Se crea una mayor resistencia al paso del aire frío. El ventilador podría verse más forzado, lo cual puede causar daños mecánicos.		
	2 El compresor no arranca	1	1	La presión de 1.72 MPa en la zona de baja y de 3.80 MPa en la de alta no están presentes.	Al no haber suficiente presión en el sistema, el compresor no arranca y los demás equipos no pueden realizar sus funciones.	Operacional: No se completa el ciclo de refrigeración, por lo que el sistema no funciona como se debe.
			2	Equipo desconectado de la red o recibe una tensión diferente a 208/230 V.	Al equipo no le llega la potencia eléctrica necesaria para desarrollar sus funciones.	
			3	El breaker del compresor se encuentra abierto.	No permite que llegue la energía eléctrica al equipo.	
	3 El compresor tiene ciclos muy cortos	1	1	Hay un exceso de refrigerante en las líneas del sistema, >1.16 kg de R-410A	Está la posibilidad de que haya retorno de refrigerante líquido al compresor.	Operacional: Aumenta la demanda eléctrica y baja la eficiencia del equipo.
			2	La señal del termostato es intermitente	Puede causar problemas en el motor del compresor debido a una mayor cantidad de arranques en un corto periodo de tiempo.	
	4 El compresor tiene ciclos extremadamente largos	1	1	El sistema tiene una carga de refrigerante menor a 1.16 kg de R-410A.	Causa que los ciclos sean muy largos porque no llega el refrigerante adecuado, lo que disminuye la eficiencia del sistema.	Operacional: El proceso de enfriamiento del recinto es más lento
			2	Serpentín del evaporador congelado.	El recinto no se refrigera de la mejor manera y se puede llegar hasta un fallo total del sistema.	
			3	Filtro deshidratador está bloqueado	Restringe el paso del refrigerante, lo que causa que le lleguen menos de este al evaporador y el compresor se vea obligado a realizar ciclos más largos de lo normal.	

Para el análisis del equipo de refrigeración se utilizó la guía del fabricante BOHN en su mayoría para el compresor y el condensador. Mientras que, para el evaporador, se fundamentó con la opinión del ingeniero y del trabajo de técnico de Concha y Oyarce (2017).

Tanto para el equipo de inyección como de extracción, se acudió al manual de instalación, operación y mantenimiento del fabricante Greenheck para analizar con mayor profundidad y criterio este sistema de emergencia instalado en el laboratorio de Crioconservación. Las tablas del sistema de refrigeración y de emergencia se pueden encontrar en el apéndice B.

4.3. Enfoque de sistemas de ingeniería

Los sistemas que involucren algún tipo de diseño ingenieril necesitan tener un enfoque específico para así cumplir con lo deseado. Como Brazier et al. (2018) mencionan en su investigación sobre sistemas complejos, se debe tener claro cuáles son los deseos y necesidades de las partes interesadas. En el caso de este proyecto, las partes interesadas son el DAM, el Laboratorio de Biotecnología y la Escuela de Ingeniería Electromecánica del ITCR.

Montero Jiménez y Vingerhoeds (2019) establecen que un enfoque de sistemas de ingeniería debe darle objetividad a la solución del problema, analizando y entendiendo el comportamiento deseado del sistema, así como las interacciones entre los componentes principales para lograr el objetivo deseado a lo largo del ciclo de vida del sistema. Es así como este enfoque se divide en cuatro principales requerimientos: funcionales, de comportamiento, estructurales y de experiencia con el usuario.

Tomando en cuenta lo anterior y las necesidades y deseos de las partes interesadas, se realiza el enfoque para el sistema de monitoreo y alerta de modos de fallas. Se tiene como requerimientos funcionales los objetivos principales del sistema de monitoreo, los cuales consisten en emitir alertas ante eventuales fallos del sistema, tener un mayor control de los mantenimientos y realizarlos basados en la condición de los equipos.

Los de comportamiento indican como va a actuar el sistema. Específicamente, facilitará los distintos parámetros de operación de los sistemas, como la temperatura del recinto, la humedad, presiones, e inclusive indica el momento oportuno para cambiar los filtros. Los diferentes comportamientos de estos parámetros se mostrarán de manera gráfica

para una mejor visualización de los datos. Además, al activarse una alarma, será enviada personalmente al correo electrónico de los interesados.

Mientras que los estructurales se basan en la programación interna y los enlaces entre los diferentes programas para asegurar un manejo adecuado de los datos y un funcionamiento óptimo del sistema. Tal es el caso de que posee una estructura capaz de tomar los datos de los diferentes sensores mediante la red wifi, mostrarlos en el sistema de manera gráfica y almacenarlos para su futuro análisis.

Por último, los de experiencia se refieren a la interacción directa con las partes interesadas, como la notificación personalizada de alarmas y una interfaz sencilla y manejable. Los requerimientos anteriores se pueden ver resumidos en la Tabla 4.

Tabla 4.

Enfoque de sistemas de ingeniería

Requerimientos de las partes interesadas	
Funcionales	Alertar a los operarios de una eventual falla en el sistema
	Tener mayor control sobre los mantenimientos
	Realizar mantenimientos con mayor fundamento técnico e ingenieril
Comportamiento	Alerta sobre paros inesperados o fallas inminentes
	Facilita los parámetros de operación (presiones, temperatura, humedad)
	Indica el momento adecuado para cambiar filtros (de aire o deshidratador)
	Se presentan los diferentes comportamientos en un programa para la visualización de datos
	El sistema, cuando emite una alarma, envía la notificación vía correo electrónico
Estructurales	Tiene una estructura capaz de tomar los datos de los sensores y guardarlos en una base de datos
	Conforme se obtienen los datos, se relaciona la hoja de datos con un software capaz de mostrar la información en una representación gráfica
Experiencia	Tiene una interfaz sencilla y amigable con el usuario
	En la presencia de una alerta, llega al correo de las partes interesadas

5. Capítulo V. Sistemas de monitoreo

Se decide utilizar el software LabVIEW para implementar los sistemas de monitoreo, ya que dispone de un entorno de programación gráfico, el cual facilita muchas de las operaciones necesarias. Además, permite tener una interfaz amigable para así ser utilizada por cualquier persona no experta en el programa. Tiene también la capacidad de enlazarse con diferentes programas, tanto para la obtención de datos como para almacenarlos.

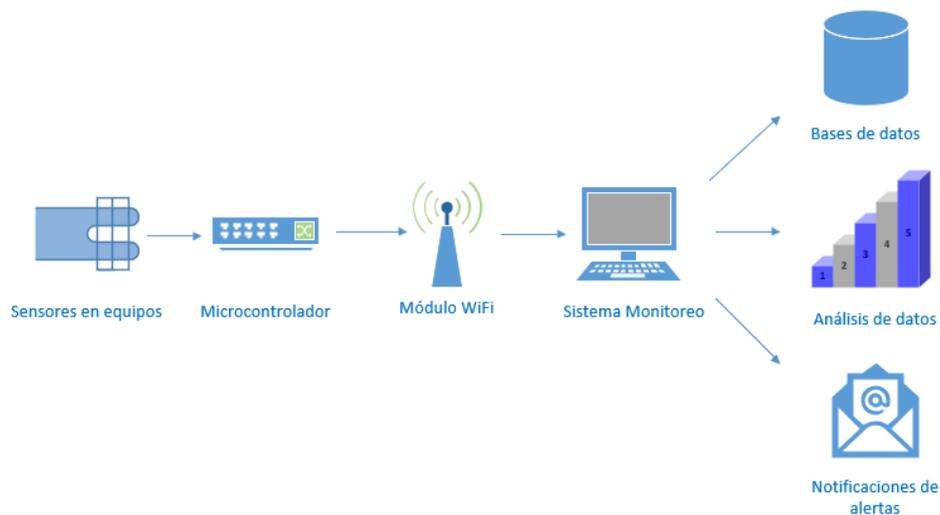


Figura 11. Estructura de Sistema de Monitoreo

En la Figura 11 se puede visualizar la estructura que se va a implementar en los diferentes sistemas de monitoreo por proponer. Primeramente, se debe disponer de los sensores e instalarlos de manera adecuada en los equipos y recintos para una toma de datos idónea y real. Estos se deben conectar a un módulo o microcontrolador para captar estas señales y así pasarlas a un ordenador para su posterior procesamiento.

Debido a que las distancias entre el Laboratorio de Biotecnología y las oficinas del DAM son considerables, es poco factible realizar una comunicación entre el microcontrolador y el ordenador de manera alámbrica, además de que se puede interferir la transferencia de datos. Es por lo anterior que, se opta por utilizar un módulo wifi que sea compatible tanto con el microcontrolador como con LabVIEW para que la transferencia de datos sea exitosa y segura.

Una vez que los datos llegan al ordenador, el sistema de monitoreo inicia sus funciones, las cuales consisten en que los operarios puedan ver los parámetros de operación seleccionados en tiempo real y el sistema alerte sobre anomalías en los equipos. Todos estos datos se estarán guardando de manera automática, lo que permite crear una base de datos sobre los comportamientos de los equipos de manera específica, indicando el momento exacto de muestreo. Además de almacenar información valiosa, el sistema se enlazará con otro programa que facilita la visualización de datos para obtener de manera gráfica los comportamientos históricos de los sistemas seleccionados. Así, la persona encargada de velar por los equipos de climatización podrá tomar decisiones basadas en la condición de los equipos.

Cabe destacar que, al momento de presentarse una alerta, se notificará de manera inmediata a la persona encargada vía correo electrónico. Esto significa que se tendrá un control más riguroso de los sistemas de acondicionamiento ambiental, lo que permite una respuesta pronta, rápida y efectiva por parte del DAM.

Además de hacer más efectivo el control de los sistemas, otro de los objetivos de los sistemas de monitoreo es crear una base sólida para una futura implementación de mantenimientos basados en PHM, y así aumentar la confiabilidad en los equipos y desarrollando procesos más ágiles y precisos.

5.1. Sistemas de aire acondicionado

Secciones atrás se estableció que son cinco los sistemas que se deben monitorear debido a la importancia que representan para el Laboratorio de Biotecnología y lo críticos que son para este laboratorio y el Departamento de Administración de Mantenimiento del ITCR. Después de la visita en campo y realizar los análisis de los equipos, se evidenció que estos recintos críticos utilizan los mismos sistemas de climatización, lo cual se puede apreciar en la Figura 12. Por lo que se decide crear el sistema de monitoreo para el cuarto de Crecimiento Vegetal *in vitro* (20 °C) únicamente, y se propone usarlo como base para implementarlo en los demás recintos.



Figura 12. Unidades condensadoras de cuartos en el Laboratorio de Biotecnología

Teniendo claro el recinto al cuál se le hará el sistema de monitoreo, se procede a analizar las diferentes variables que se deben tomar en cuenta para estar midiendo en tiempo real y que funcionen como parámetro para posteriores tomas de decisiones. Estudiando los diferentes modos de fallas y los requerimientos de las partes interesadas, se define que las variables por monitorear serán: temperatura y humedad del recinto, diferencial de presión que genera el filtro de aire, diferencial de presión que genera el filtro deshidratador en la línea

de líquido, las presiones en las zonas de alta y baja, y la corriente que demanda el compresor del sistema.

Para la temperatura y humedad se selecciona el sensor DHT22, ya que brinda datos de ambos. Estos parámetros son de mucha importancia para el laboratorio debido a que las operaciones que se llevan a cabo en él dependen directamente de ellos. Según la información recolectada en el Laboratorio de Biotecnología, la temperatura puede variar en un rango de 2 °C, tanto en aumento como en disminución. Mientras que, para la humedad no se obtuvo un dato específico, simplemente debía estar por debajo del 60%.

Con base a la información anterior, se procede a realizar la programación para definir las alarmas en ambas mediciones. En la Figura 13 se puede ver el diagrama de bloques utilizado para la recepción y control de datos. La casilla azul (TempHum) recibe los datos del sensor y este los distribuye para mostrarlos de manera gráfica en la interfaz del programa. Se añaden controles manuales para darle total control del sistema al operario y que defina los parámetros mínimos y máximos para cada medición. Además, el sistema tiene la facilidad, por medio de un contador, de que sea el mismo encargado el que establezca la cantidad de lecturas críticas que desea. Así, se activará una alerta ante la presencia de un comportamiento fuera de los rangos establecidos hasta que se llegue a la lectura crítica máxima indicada.

En el diagrama de bloques se pueden apreciar las diferentes alarmas para indicar cuando se tiene una temperatura alta, baja o cuando se superó el límite de humedad en el recinto y sus posibles modos de falla o recomendaciones para llevar los parámetros a los rangos antes establecidos. Cabe destacar que en la interfaz siempre habrá indicadores visuales que mostrarán el estado actual de temperatura y humedad, especificando si se encuentran dentro del rango normal, alto o bajo.

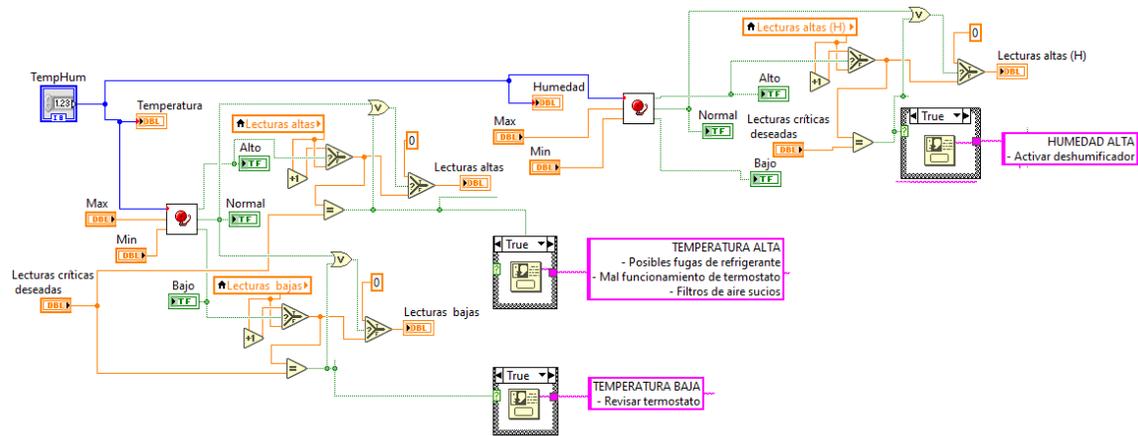


Figura 13. Diagrama de bloques para temperatura y humedad. LabVIEW

En este tipo de laboratorios se desarrollan investigaciones de tipo biológico, por lo que se puede considerar como un cuarto limpio. Castaño y Orozco (2008) indican en su investigación sobre el diseño de cuartos limpios que según la norma ISO 14644-1, estos recintos se definen como: “un cuarto en el cual la concentración de partículas en el aire es controlada, y la cual es elaborada y utilizada de manera que se minimice la introducción, generación y retención de partículas en el interior del cuarto”. Por esta razón se decide monitorear el filtro de aire, ya que es un elemento fundamental para el control de partículas del laboratorio y debe funcionar siempre en condiciones óptimas.

Al tener inconvenientes para conocer la marca del filtro instalado, se decide buscar uno con las mismas especificaciones en el catálogo de Premium Filters. Se selecciona un filtro lavable capaz de retener partículas de 1 μm o mayores. También se indica que es de clase G4 según la norma BS EN 779. Conociendo este dato, se consulta la normativa EN 13053, basada en ventilación de tratamiento de aire, e indica que la caída de presión final máxima recomendable para este tipo de filtros es de 150 Pa, tal y como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5.

Caída de presión final máxima para filtros

Clase de filtro	Caída de presión final
G1 - G4	150 Pa
M5 - F7	200 Pa
F8 - F9	300Pa

Nota: Recuperado de: venfilter.es/normativa/normativa-en-13053

Para monitorear este elemento crítico, se decide utilizar el sensor MPX5010DP, el cual mide datos de tipo diferencial de presión, lo que facilita a la hora de las mediciones, toma de información y la programación de este. En la Figura 14 se puede ver el diagrama de bloques utilizado para convertir la lectura analógica que realiza el sensor a las unidades de Pascales. También se muestra que, ante una lectura mayor a los 150 Pa como valor máximo de diferencial de presión permisible, se activa una alarma que indica sobre la necesidad de cambiar el filtro.

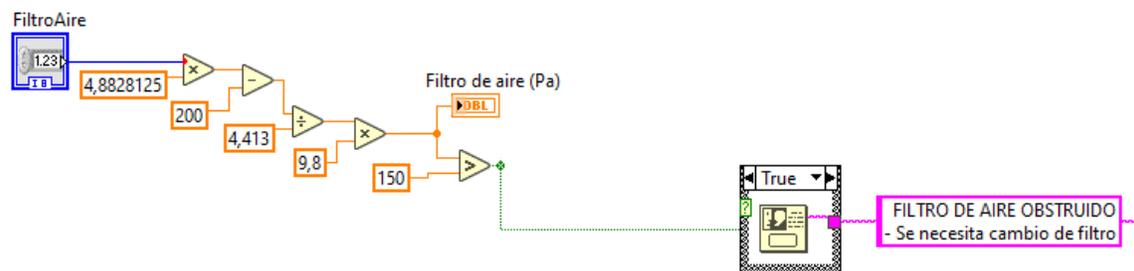


Figura 14. Diagrama de bloques para filtro de aire. LabVIEW

Los efectos de la humedad en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado son críticos. Como lo dice Emerson Climate Technologies (2016) en su manual para estos sistemas, la combinación de mucha humedad combinada con el refrigerante puede formar

hielo en la válvula de termo expansión, el tubo capilar o hasta el evaporador y restringir el paso del refrigerante. Este hielo puede dar lugar a oxidación y corrosión de los metales, daño químico al aislamiento del motor e inclusive la descomposición química del refrigerante y del aceite. La función del filtro deshidratador es evitar todos los efectos anteriores y más, absorbiendo la humedad presente en el sistema. También se menciona que, para sistemas que dispongan de compresores herméticos, no es recomendable utilizar filtros deshidratadores en la línea de succión ya que no es indispensable y no es factible en términos económicos. Debido a esto, se decide aplicar el monitoreo a este elemento del sistema de aire acondicionado en la línea de líquido, el cual vela por el bienestar de los demás componentes.

Una buena forma de controlar el estado de este filtro es midiendo el diferencial de presión que provoca en el sistema. Según el manual antes mencionado, para determinar este parámetro, se necesita, primeramente, la temperatura de condensación. Como establece Tecener SA. (2015) en el tutorial para el trabajo en campo en sistemas de aire acondicionado, para un condensador a aire la diferencia entre la temperatura de condensación y la ambiental no debe exceder de $15\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a plena carga debido a que se pueden presentar incrustaciones a nivel del condensador si se supera este rango.

Según la aplicación en línea de Weather Spark, se tiene que la temperatura promedio en la ciudad de Cartago es de aproximadamente $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con este dato, la temperatura de condensación sería de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y ahora se puede determinar la caída de presión máxima recomendada para el filtro deshidratador.

La Tabla 6 muestra diferentes caídas de presión a diferentes temperaturas y también dependen del tipo de instalación. Estos datos son basados en las normas AHRI 710 y 730 y ASHRAE 63 y 78, que también mencionan un mismo comportamiento para este caso en específico en los refrigerantes R-22, R-290, R-404A, R-407A, R-407C, R-410A, R-502 y

R-507A. Así, tomando la fila del R-22/R-502 y un tipo de instalación permanente y relacionándolos con una temperatura de condensación de 40 °C en la línea de líquido, se tiene una caída de presión máxima recomendable de 9.2 psi o 63.5 kPa en unidades del SI.

Tabla 6.

Caídas de presión máximas recomendadas para filtros deshidratadores

REFRIG.	TIPO DE INSTALACION	LINEA DE SUCCION						LINEA DE LIQUIDO					
		TEMPERATURA DE EVAPORACION (°C)						TEMPERATURA DE CONDENSACION (°C)					
		-40	-30	-20	-10	0	10	30	35	40	45	50	55
R-12	Temporal	---	2.5	3.5	5.2	7.3	10.7	12.2	12.7	13.4	14.5	15.8	18.0
	Permanente	---	0.8	1.2	2.0	3.0	4.2	5.0	5.3	5.6	6.1	6.7	7.6
R-22 / R-502	Temporal	2.5	4.0	6.2	8.6	12.0	20.0	18.4	20.3	22.5	24.7	27.7	32.0
	Permanente	0.8	1.5	2.5	3.5	5.0	7.0	7.8	8.4	9.2	10.2	11.3	12.7
R-134a	Temporal	---	3.5	5.0	7.5	10.0	17.0	16.0	18.0	19.0	20.0	24.0	28.0
	Permanente	---	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0	7.0	7.5	8.0	8.5	10.0	10.5

NOTA: Los valores están en lb/pulg² (psi), para convertirlos a kg/cm² o a kPa, multiplicar por 0.07 ó 6.9 respectivamente.

Nota: Recuperado de Emerson Climate Technologies

Para medir de manera óptima el diferencial de presión causado por el filtro, se selecciona el sensor YCQB05H01, el cual es apto para instalaciones de aire acondicionado y sistemas de refrigeración. Se debe instalar uno antes del elemento filtrante y otro después, así en el programa obtiene el delta deseado, tal y como se muestra en la Figura 15. También se puede apreciar en el diagrama de bloques que en el momento en que este parámetro se exceda de los 63.5 kPa, el sistema enviará una alerta indicando que se necesita reemplazar el filtro.

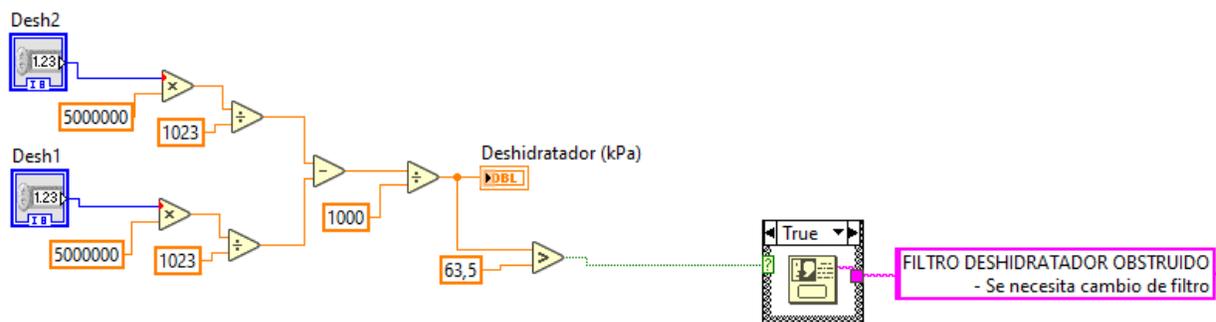


Figura 15. Diagrama de bloques para filtro deshidratador. LabVIEW

Según los requerimientos e intereses del DAM, otros parámetros que son importantes controlar son las presiones en la zona de baja y alta presión. La opinión de los expertos sugiere que estos parámetros pueden oscilar en un rango de ± 13 psi de su valor nominal (el que indica el fabricante), lo cual equivale a 89.63kPa. Como se presenta en la Figura 16, la programación es la misma para ambos parámetros, con la diferencia de que los datos para la zona de alta presión pueden variar de 3.71 – 3.89 MPa, mientras que para la zona de baja presión pueden estar en un rango de 1.63 – 1.81 MPa sin que se activen las debidas alertas.

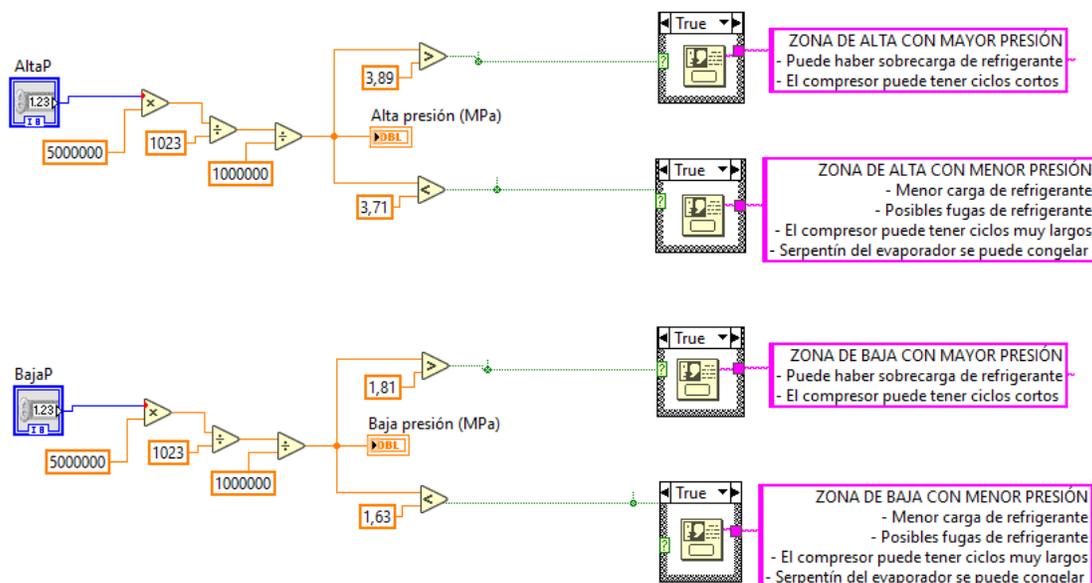


Figura 16. Diagrama de bloques para zonas de alta y baja presión. LabVIEW

El fabricante NORDYNE especifica dos tipos de corrientes para el compresor de la unidad de aire acondicionado. El Running Load Amperage (RLA) o el amperaje de operación y el Locked Rotor Amperage (LRA) o amperaje de rotor bloqueado, mejor descrito como la corriente de arranque. Para estos se dan valores de 16.6 A y 79 A respectivamente. Estos parámetros se toman como base para programar el sistema de monitoreo.

Primeramente, se propuso establecer alarmas tanto para la condición de arranque como para plena carga, por lo que se necesita conocer los rangos de tiempo de operación para cada caso. Como no se dispone de un instrumento de medición preciso para determinar este parámetro y las restricciones para programar visitas al recinto son bastante limitadas debido a la situación sanitaria por la cual pasa el país, se decide basarse en la investigación realizada por Ginart et al. (2016), en la cual simulan y comparan diferentes condiciones en unidades de aire acondicionado, entre ellas la corriente y tiempo de arranque.

Analizando los resultados de esta investigación, se tiene que el arranque para un equipo de 3-TON, tal y como el que se dispone en el laboratorio, es de 0.33 segundos aproximadamente. Para realizar mediciones de ese tipo se necesitan instrumentos de medición muy precisos que aumentarían el costo del proyecto. Además, los ciclos de las mediciones tendrían que ser de al menos 10 ms para tener un amplio rango de datos y analizar de manera correcta las variables deseadas; sin embargo, esto significa que los demás parámetros como temperatura, humedad, presiones también tendrían los mismos ciclos, lo que generaría información redundante en la base de datos.

Para establecer el sistema de alarmas, se propone basarlo en la corriente a plena carga ya que está dentro del alcance del proyecto. Se considera utilizar el sensor de la denominación SCT-013. El usuario debe establecer la cantidad de lecturas críticas que desea para que se active una eventual alarma ante el aumento de 16.6 A, tal y como se aprecia en la Figura 17. El recuadro muestra el comportamiento de la corriente con respecto al tiempo de manera gráfica, mientras que en la parte inferior se encuentra el comando para establecer los ciclos deseados y la cuenta de los ciclos críticos que lleve el sistema en un momento determinado.

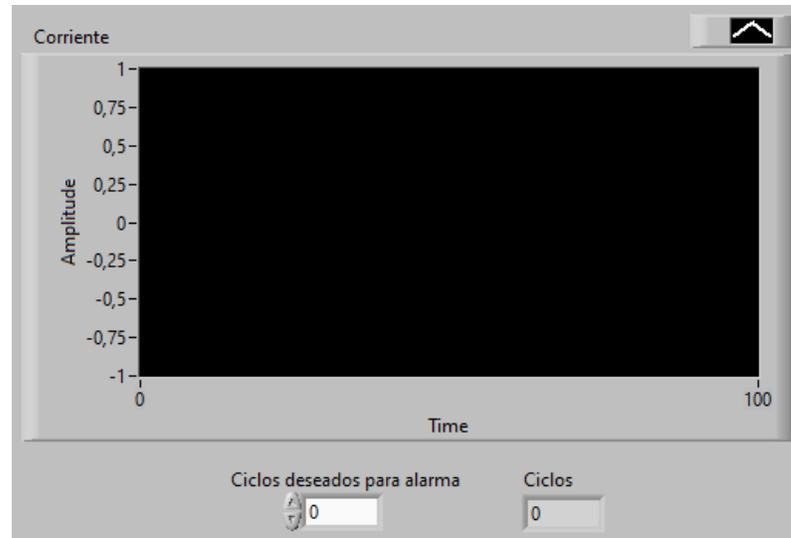


Figura 17. Monitoreo de corriente de compresor. LabVIEW

En la Figura 18 se indica la programación realizada en el diagrama de bloques para el monitoreo de la corriente del compresor. Se puede apreciar que el sistema posee un contador para activar la alarma, pero si después de una lectura crítica el sistema se estabiliza sin antes llegar a los ciclos deseados, el contador se reinicia, haciéndolo más eficiente. Para establecer las posibles causas de una alta corriente se tomó en cuenta el manual del fabricante y el criterio de técnicos expertos en el área, teniendo las posibilidades de un alto tiempo de arranque, la presión en el condensador es mayor que la que debería ser, que el sistema en general posea una sobrecarga de refrigerante o que el compresor se encuentre bloqueado.

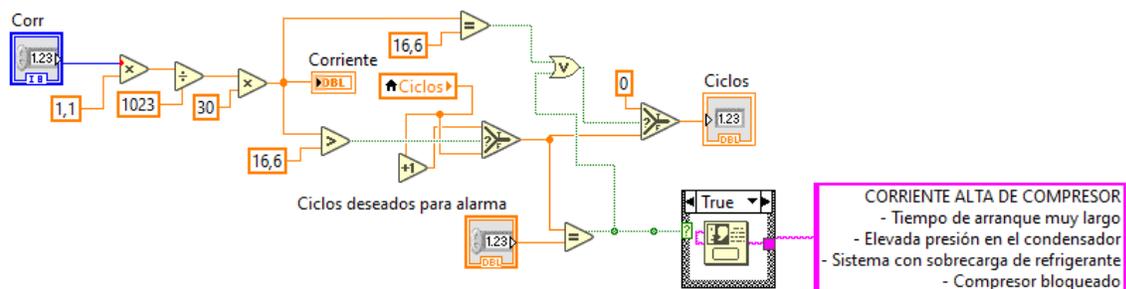


Figura 18. Diagrama de bloques para monitoreo de corriente. LabVIEW

Para que el sistema sea aún más práctico y amigable con los usuarios, en el momento en que se activa una alerta, de manera automática se envía un correo electrónico a las personas encargadas especificando dicha notificación. Este mecanismo se implementa considerando los casos en los cuales no haya algún operario frente al ordenador supervisando el sistema de monitoreo, como las horas fuera de la jornada laboral, horas de almuerzo o simplemente que estén realizando otras funciones. Así se tendrá una mayor atención a los equipos, una respuesta bastante rápida y posibles mantenimientos correctivos más eficientes. En la Figura 19 se puede ver parte de la programación realizada para el envío de notificaciones. Cabe destacar que, el sistema tiene la flexibilidad de que se pueden adjuntar las direcciones de correo electrónico que se quieran desde la interfaz, sin necesidad de estar ingresando al diagrama de bloques.

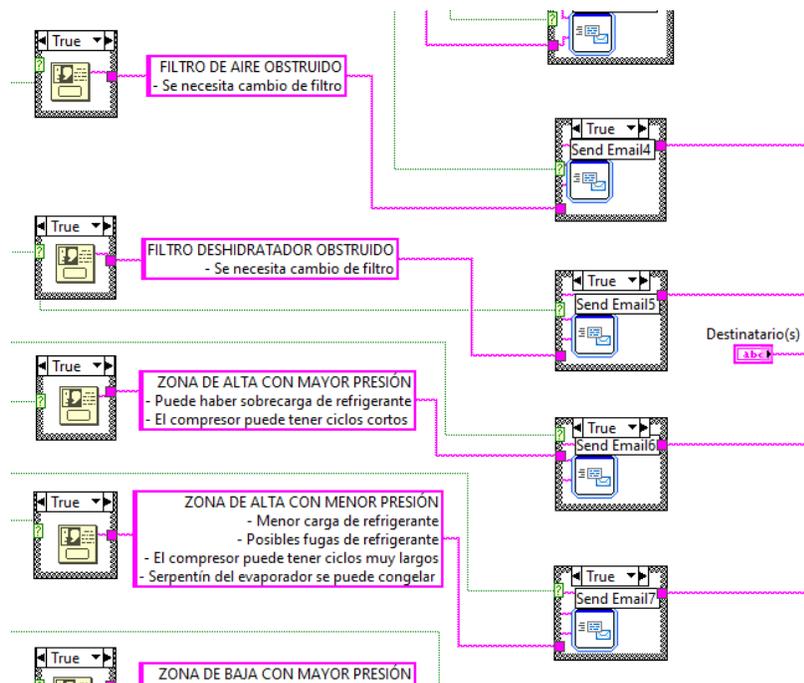


Figura 19. Diagrama de bloques para notificaciones vía correo electrónico. LabVIEW

En la Figura 20 se encuentra la interfaz creada para el sistema de monitoreo. Se realizó una simulación del programa para una mejor visualización y se pueden notar los indicadores visuales para los parámetros de temperatura y humedad, los cuales indican niveles alto y normal respectivamente. Se estableció que fueran tres las lecturas críticas que se necesitarán para que se active la alarma, por lo que, al simular estas condiciones, el sistema activó exitosamente una alerta de temperatura alta e indicando las posibles razones de dicha anomalía. Una vez que se atiende la alarma, el sistema seguirá tomando datos sin ningún inconveniente.

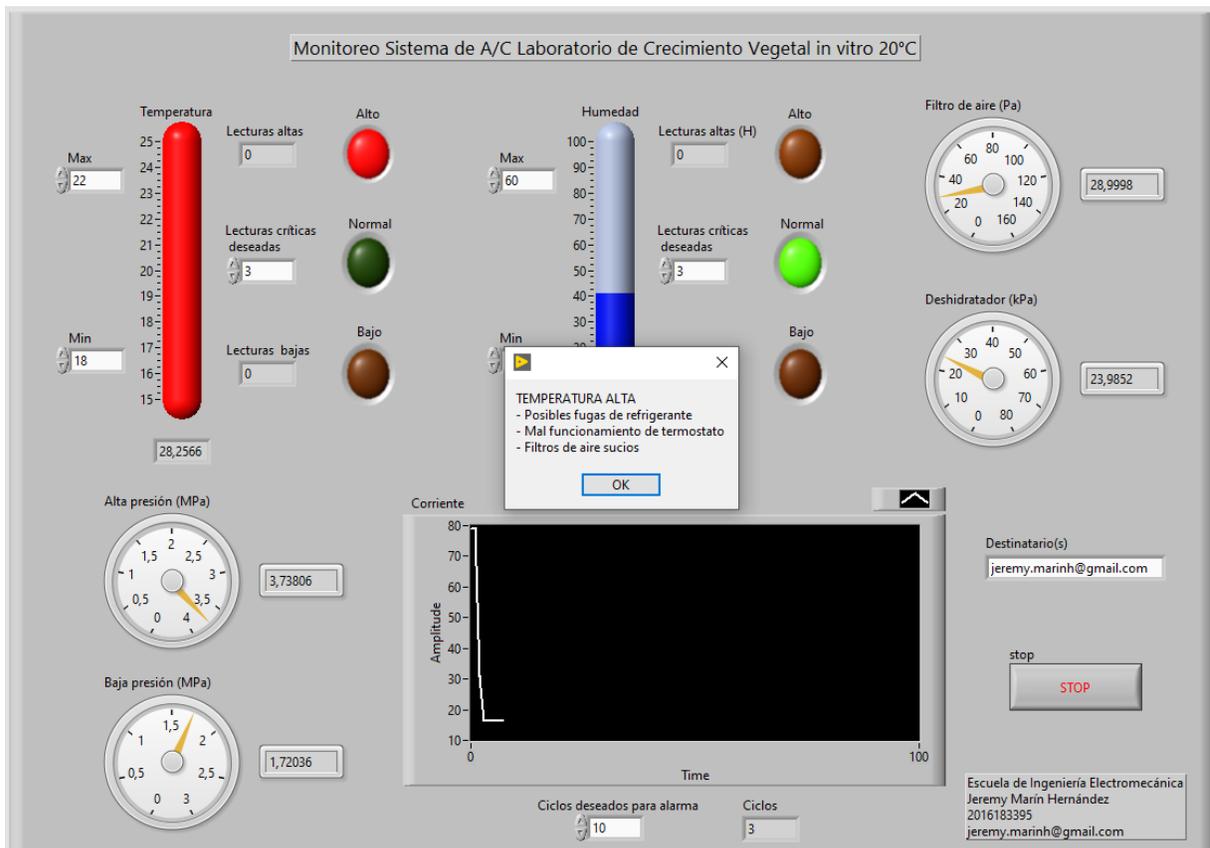


Figura 20. Interfaz del Sistema de Monitoreo de A/C. LabVIEW

Se pueden notar los manómetros para las diferentes presiones, una gráfica que muestra el comportamiento de la corriente con respecto al tiempo y una casilla en la cual se pueden ingresar los correos electrónicos que se deseen, además del botón para detener el sistema. La interfaz es apta para cualquier persona y no se necesita de conocimiento en el sistema para poder manipularla. Como parte del sistema de monitoreo y sus alarmas, en el momento en que se desplegó la notificación sobre temperatura alta, el programa envió un correo electrónico con la respectiva alarma a los destinatarios correspondientes, tal y como se puede ver en la Figura 21.

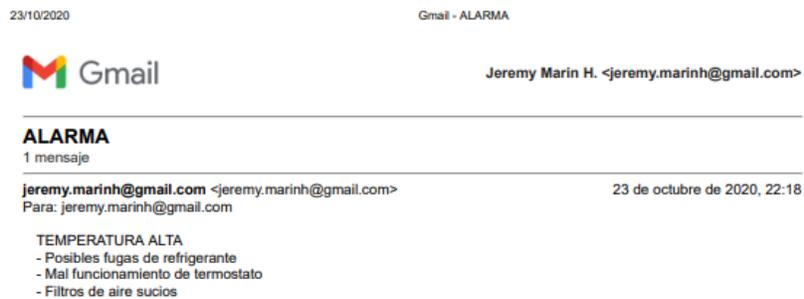


Figura 21. Alarma en correo electrónico. Gmail

Como parte fundamental del sistema de monitoreo, los datos obtenidos se deben almacenar. En la Figura 22 se puede ver la programación realizada para guardar al instante la información que se va recabando.

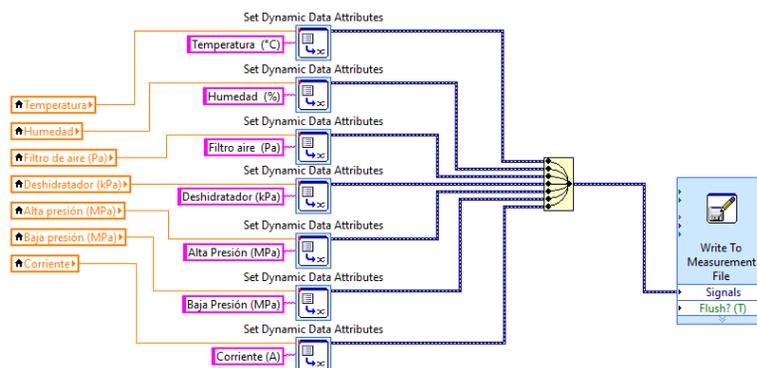
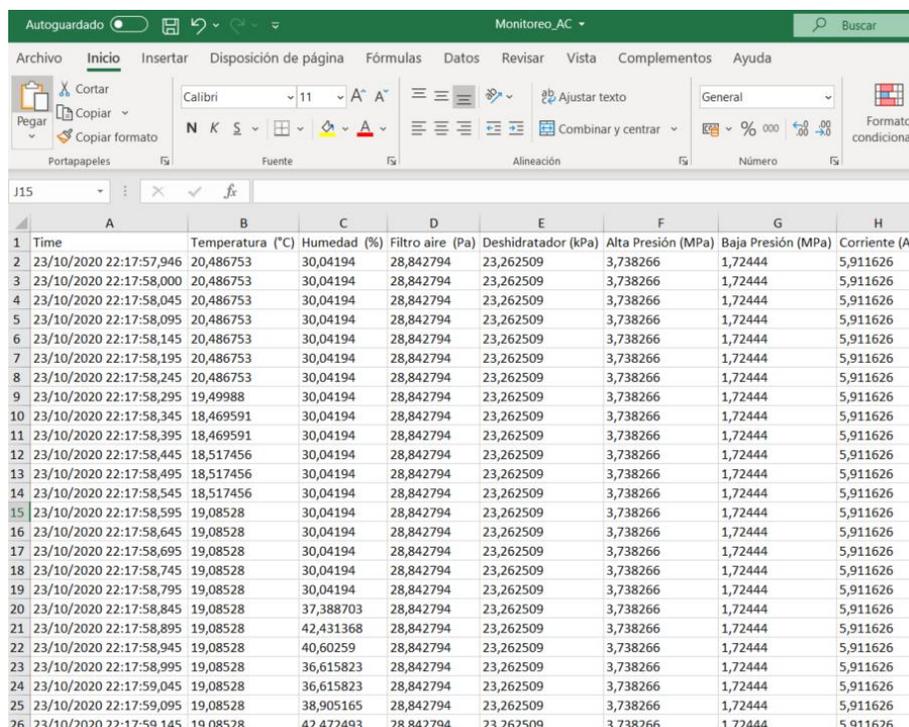


Figura 22. Diagrama de bloques para almacenamiento de datos. LabVIEW

Como parte de la simulación realizada y la programación para almacenar los datos en un archivo de formato Excel, la Figura 23 muestra con detalle la información obtenida. Cada columna tiene el nombre del parámetro medido y lo que es de suma importancia, especifica el momento exacto en que se realizó la toma de los datos, dando fecha y hora en la primera columna.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Time	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Filtro aire (Pa)	Deshidratador (kPa)	Alta Presión (MPa)	Baja Presión (MPa)	Corriente (A)
2	23/10/2020 22:17:57,946	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
3	23/10/2020 22:17:58,000	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
4	23/10/2020 22:17:58,045	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
5	23/10/2020 22:17:58,095	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
6	23/10/2020 22:17:58,145	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
7	23/10/2020 22:17:58,195	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
8	23/10/2020 22:17:58,245	20,486753	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
9	23/10/2020 22:17:58,295	19,49988	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
10	23/10/2020 22:17:58,345	18,469591	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
11	23/10/2020 22:17:58,395	18,469591	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
12	23/10/2020 22:17:58,445	18,517456	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
13	23/10/2020 22:17:58,495	18,517456	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
14	23/10/2020 22:17:58,545	18,517456	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
15	23/10/2020 22:17:58,595	19,08528	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
16	23/10/2020 22:17:58,645	19,08528	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
17	23/10/2020 22:17:58,695	19,08528	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
18	23/10/2020 22:17:58,745	19,08528	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
19	23/10/2020 22:17:58,795	19,08528	30,04194	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
20	23/10/2020 22:17:58,845	19,08528	37,388703	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
21	23/10/2020 22:17:58,895	19,08528	42,431368	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
22	23/10/2020 22:17:58,945	19,08528	40,60259	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
23	23/10/2020 22:17:58,995	19,08528	36,615823	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
24	23/10/2020 22:17:59,045	19,08528	36,615823	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
25	23/10/2020 22:17:59,095	19,08528	38,905165	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626
26	23/10/2020 22:17:59,145	19,08528	42,472493	28,842794	23,262509	3,738266	1,72444	5,911626

Figura 23. Datos almacenados en un documento Excel. Microsoft Excel

Como último punto en la estructura de un sistema de monitoreo, es importante interpretar los datos para un correcto diagnóstico y mantenimiento de los equipos. Sin embargo, el analizar los datos como se muestran en la Figura 23 es complejo y existe una alta probabilidad de errores de lectura. Por esta razón, se decide utilizar la herramienta de Microsoft, Power Bi, la cual permite visualizar datos de manera sencilla, atractiva y dinámica. Tiene la función de enlazar la información obtenida en el sistema de monitoreo y mostrarla como se ve en la Figura 24. Se puede ver detalladamente la saturación de los dos

filtros con respecto al tiempo, la temperatura del recinto de acuerdo con la humedad presente, el comportamiento de la corriente y las presiones en el sistema de aire acondicionado. Estos datos son producto de una simulación, no son reales.

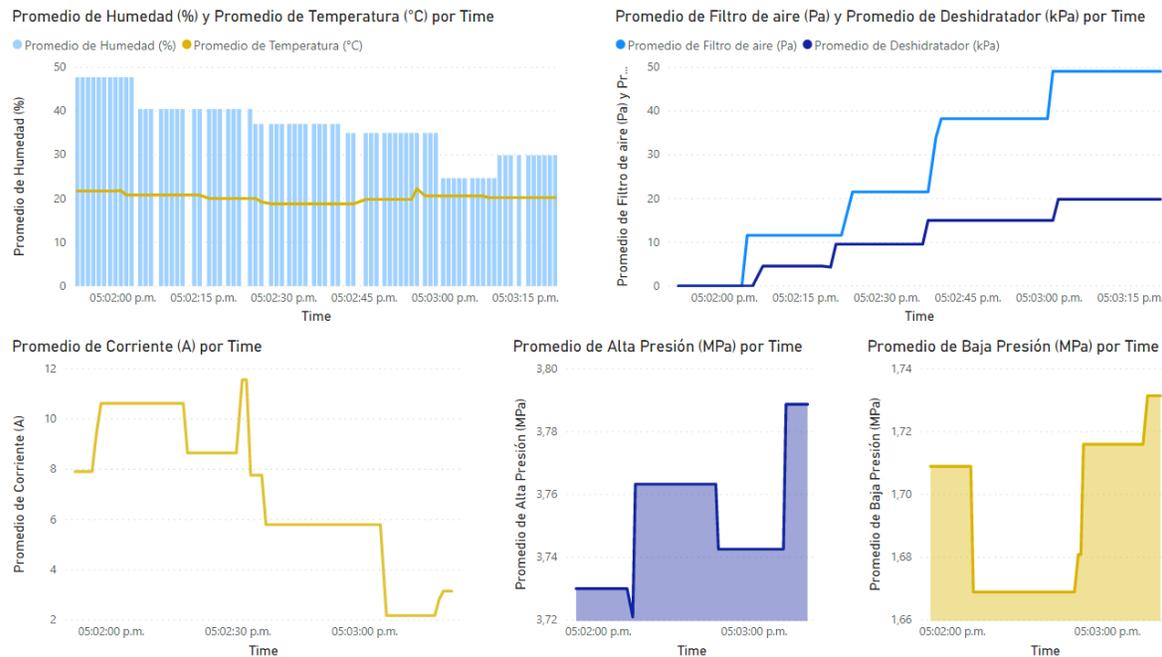


Figura 24. Visualización gráfica de datos obtenidos. Microsoft Power Bi

Esta herramienta también tiene la facilidad de poder ver estos informes de manera móvil. Cada vez que se actualizan los datos en el Excel, el informe en Power Bi se debe refrescar y de esta manera los encargados podrán analizar los parámetros de forma remota, desde un dispositivo móvil como se muestra en la Figura 25 y hasta en otro ordenador fuera de la oficina.

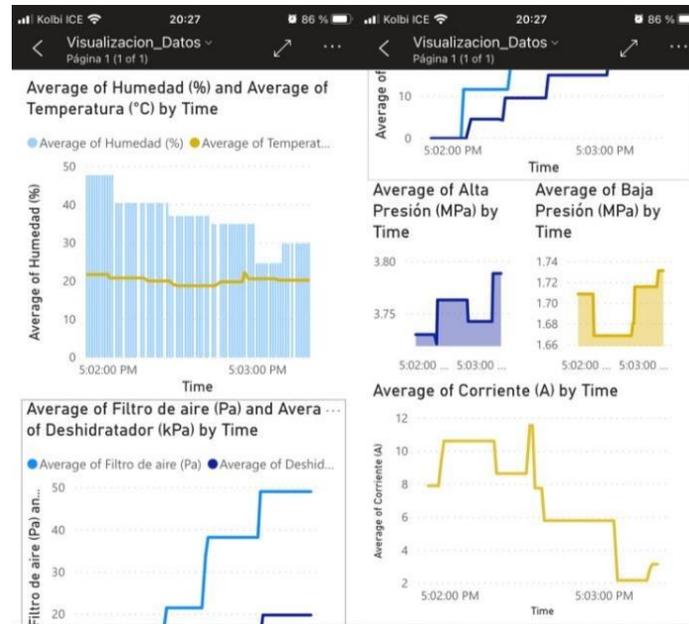


Figura 25. Visualización móvil de los datos. Microsoft Power Bi

5.2. Sistema de refrigeración

Según los sistemas críticos analizados en secciones anteriores, el sistema de refrigeración es uno de gran importancia para el Laboratorio de Biotecnología ya que almacenan gran cantidad de costosos reactivos y materiales indispensables para sus investigaciones de índole científica, educativa y comercial. Se requiere que este cuarto permanezca a una temperatura de 4 °C con un desvío de 1 °C. En la Figura 26 se puede ver el equipo instalado en el cuarto, con una unidad evaporadora de cuatro ventiladores.



Figura 26. Cuarto frío

Fuera del edificio, se encuentra la unidad condensadora mostrada en la Figura 27. Esta consiste en dos ventiladores, el acumulador de líquido, filtro deshidratador, compresor de tipo scroll, centro de control y demás componentes.



Figura 27. Unidad Condensadora

Teniendo en cuenta el AMFE realizado en secciones anteriores y lo que está al alcance del proyecto, se decide monitorear los parámetros de temperatura y humedad del cuarto, presiones de alta y baja, diferenciales de presión en los filtros secador y deshidratador y la corriente demandada por la unidad evaporadora, condensadora y el compresor. La metodología es la misma que para los sistemas de aire acondicionado, es decir, se cuenta con los diferentes sensores, se conectan al microcontrolador que está enlazado con un módulo wifi y este último envía los datos al ordenador para el sistema de monitoreo.

Una vez que los datos son recibidos por el sistema, se muestran en la interfaz creada con LabVIEW y así alertar ante posibles fallos o anomalías. Los mismos se almacenan en archivos Excel para su posterior análisis con ayuda del software Power Bi, el cual facilita la visualización de datos e inclusive tiene aplicación móvil, para así agilizar el proceso de tomas de decisiones y futuros planes de mantenimientos basados en PHM.

En lo que respecta a la programación del sistema de monitoreo, se aplican los mismos pasos que en los sistemas de A/C, ya que son aplicaciones muy similares. Para analizar la temperatura y humedad, se utiliza el sensor DHT22 y para definir las alarmas se toma en cuenta la opinión de la investigadora a cargo, la cual indica que el cuarto frío no debe pasar de un rango de 3 °C - 5 °C y no se puede permitir una humedad mayor al 60%. De igual manera, el sistema tiene la flexibilidad de que el operario pueda ingresar estos datos manualmente y manejarlos como mejor le convenga a las partes interesadas.

Ahora, para tener control de las zonas de baja y alta presión, se considera el criterio utilizado para las unidades de aire acondicionado. Según el técnico experto, un rango aceptable para estos parámetros es que varíen en ± 89.63 kPa, por lo que el sistema se programa para que active las debidas alarmas cuando la zona de baja presión se salga del rango de 2.01 – 2.189 MPa y para la zona de alta presión en 2.79 – 2.969 MPa.

Por ser un sistema de cuarto frío, este posee filtros deshidratadores tanto para la línea de succión como para la de líquido. Como se menciona en secciones anteriores, este tipo de filtros son de gran importancia para el rendimiento y seguridad de todo el sistema, ya que mantiene libre de humedad el refrigerante que circula por las tuberías y diferentes equipos como el compresor, evaporador, condensador. Debido a esto, se decide realizar un monitoreo para ambos elementos filtrantes.

Al llegar a un valor de saturación límite por los filtros, los mismos se deben limpiar o reemplazar para no comprometer otros elementos. Se recurre a la Tabla 6, la cual, basada en las normas AHRI 710 y 730 y ASHRAE 63 y 78, establece los diferenciales de presión a la temperatura de condensación para el filtro ubicado en la línea de líquido y a la temperatura de evaporación para el de la línea de succión.

Basándose en estos datos, se define que la alerta para el filtro deshidratador ubicado en la línea de líquido se active cuando se sobrepasen 63.5 kPa. Mientras que, para el de la línea de succión se programa para cuando se exceda el límite de 34.5 kPa. El sistema al emitir el aviso indicará que es necesario un cambio o limpieza de estos elementos.

Otro parámetro por considerar es la corriente de los equipos. Según el AMFE, el condensador, la unidad evaporadora y el compresor son equipos críticos para el sistema, por lo que se decide monitorear su amperaje. Para la unidad condensadora y evaporadora, controlar la corriente está directamente relacionado con el funcionamiento de los ventiladores. Si la corriente a plena carga se ve aumentada en un período de tiempo, entonces se traduce en que los ventiladores están siendo forzados a trabajar de más. Las alarmas respectivas se establecen según los valores que indiquen los datos de placa.

Para el compresor de tipo scroll, se decide monitorearlo de manera semejante a como se aplicó para los sistemas de A/C. Como indica el fabricante Emerson, este equipo tiene un RLA o corriente de plena carga de 10 A, por lo que, ante una variación de este parámetro, el sistema de monitoreo enviará una alerta indicando las posibles causas de esta anomalía. El operador tiene el poder de indicar la cantidad de lecturas críticas que desea para que la alerta sea activada y así realizar las gestiones necesarias.

Una vez que se programa la recepción y visualización de los datos en tiempo real junto con las debidas alarmas antes mencionadas para cada parámetro de operación, se realiza la interfaz gráfica del sistema de monitoreo. En la Figura 28 se muestra el diseño desarrollado con el software LabVIEW. Se aprecia la medida de temperatura y humedad junto con sus controles e indicadores visuales, mostrando si los niveles son óptimos o se encuentran por encima o debajo de lo establecido.

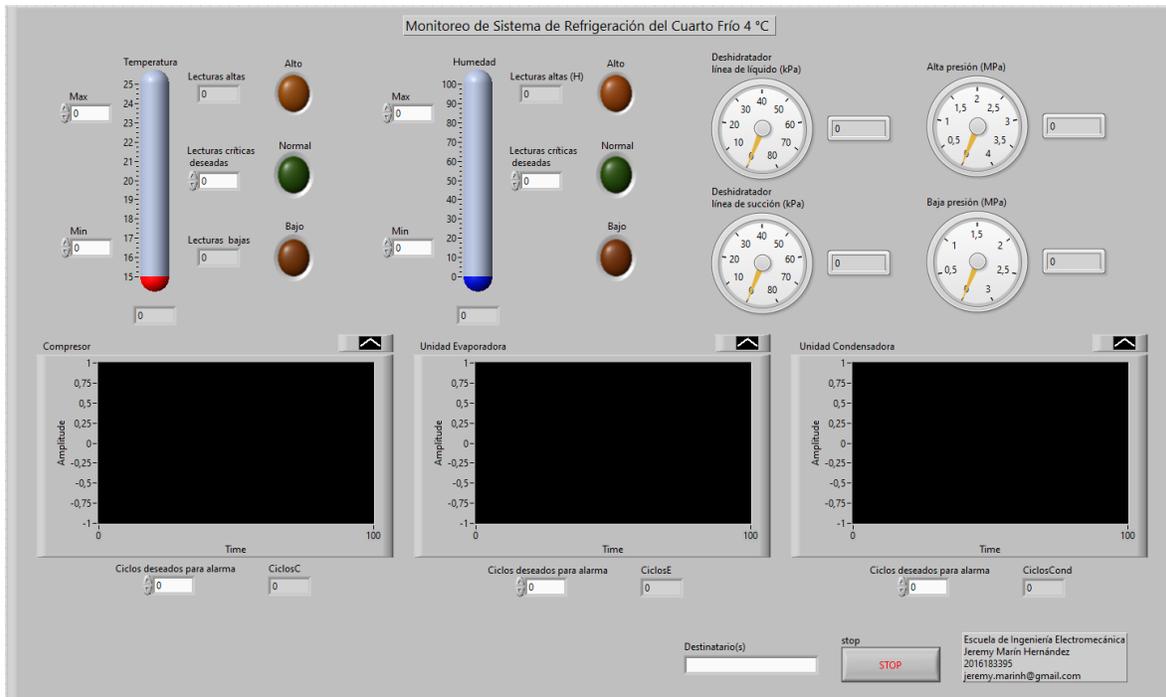


Figura 28. Interfaz del Sistema de Monitoreo para Cuarto Frío. LabVIEW

También en la Figura 28 se pueden apreciar los diferentes manómetros ubicados para visualizar los parámetros de presiones y diferenciales de presión para indicar la saturación de los filtros deshidratadores. En la parte central se encuentran los tres gráficos para representar la corriente demandada en tiempo real por el compresor y las unidades evaporadora y condensadora. Por último, en la zona inferior derecha se muestra el espacio en el cual se puede digitar el correo electrónico de las personas encargadas que necesiten estar atentos de cualquier alerta que emita el sistema, así como el botón para detener el programa.

5.3. Sistema de inyección – extracción

Del análisis de criticidad antes realizado, se considera que este sistema está dentro de los que se deben tener mayor control, ya que está directamente relacionado con la salud y seguridad de los usuarios de este recinto. Como en los demás sistemas de monitoreo, se inicia analizando el AMFE para determinar los parámetros que se deben controlar. De este proceso se define monitorear el diferencial de presión de aire en los filtros de aire, la corriente demandada por los equipos y vibraciones en el motor y rodamientos de los ventiladores.

Durante el desarrollo del proyecto se presentaron imprevistos que afectaron directamente en el diseño de este sistema de monitoreo. No se tuvo acceso a los datos de placa de los equipos ya que se encuentran en una zona poco accesible y las visitas al lugar se vieron muy restringidas debido a la situación sanitaria por la cual está pasando el país. Se conoce que los ventiladores son: CUBE para la extracción y RSFP para la inyección, esto según el fabricante GREENHECK y como se muestran respectivamente en la Figura 29. Pero se desconoce el modelo específico de cada uno, por lo que no se cuenta con los parámetros generales de los equipos.



Figura 29. Sistema de inyección-extracción de aire

Otro punto por considerar es que, uno de los parámetros operacionales que más indican sobre el estado del equipo son las vibraciones. Para realizar un completo análisis de esta variable se requiere de cierta complejidad matemática y computacional. Como Martín (2010) expone en su tesis doctoral, se requiere hacer análisis de señales, verificando si son en el dominio del tiempo o de la frecuencia y dependiendo de esta clasificación, se aplican distintas funciones matemáticas como la función de respuesta al impulso, la transformada de Laplace, transformada de Fourier y luego aplicar los modelos que mejor se ajusten a la aplicación.

Tomando en cuenta los aspectos anteriormente expuestos, diseñar este sistema se sale del alcance del proyecto, tanto en términos de tiempo como de limitaciones para acceder a cierta información esencial. Sin embargo, se propone que este informe se tome como base para una futura implementación, ya que se cuenta con el análisis de criticidad que demuestra su importancia para el laboratorio y el AMFE, que es primordial para conocer los modos de falla de estos equipos. Además, al inicio de esta subsección se proponen las variables por monitorear, lo cual también se puede tomar en cuenta.

5.4. Equipos y sensores

En el apéndice C se encuentran las tablas de resumen de los materiales necesarios para implementar los sistemas de monitoreo. Para los laboratorios con aire acondicionado se tiene un sensor que mide temperatura y humedad, otros que funcionan para medir la presión del refrigerante en el sistema y también para determinar el diferencial de presión en el filtro deshidratador. De igual manera se tiene un sensor que brinda los datos de caída de presión para el filtro de aire. Adicionalmente, se muestra el sensor correspondiente para monitorear la corriente demandada por el sistema.

El microcontrolador propuesto es el Arduino – Mega 2560 R3 debido a su capacidad de recepción de múltiples señales. También, se tiene tabulado el módulo wifi de tipo ESP8266, capaz de enviar los datos recolectados en el Arduino vía internet hasta el ordenador predestinado. Un cable eléctrico no puede faltar en la lista ya que permite la comunicación entre los equipos y sensores.

Para el sistema de refrigeración se propone utilizar los mismos sensores, lo que cambia es en la cantidad de estos. Debido a que el sistema dispone de dos filtros deshidratadores, se decide colocar uno antes y otro después del elemento filtrante, con el fin de determinar el diferencial de presión y así la debida saturación. Como se explica en secciones anteriores, se desea controlar la corriente de la unidad evaporadora y condensadora y el compresor, por lo que se decide tabular tres sensores medidores de amperaje.

El microcontrolador, módulo wifi y el cable de tipo Ribbon son los mismos seleccionados que para los sistemas de A/C. Se puede apreciar que las tablas contienen tanto los precios unitarios como los totales, los cuales se retomarán para el análisis financiero del proyecto.

6. Capítulo VI. Simulación del RUL: Filtro de aire

Los filtros de aire están diseñados para acumular una cantidad de partículas definida por las dimensiones del elemento y el tamaño de los poros que disponga, teniendo una mayor eficiencia con respecto al orificio que va siendo más pequeño, ya que tendría la capacidad de retener partículas de menor tamaño, tal y como lo exponen Pinzón y Pérez (2019). Además, la norma ISO 14644-1 (citado por Castaño y Orozco, 2008) menciona que los cuartos limpios deben tener una concentración de partículas bastante controlada, ya que estas pueden afectar directamente en los resultados de las investigaciones realizadas y hasta en la seguridad de los ocupantes.

El tener un parámetro de predicción como la vida útil remanente va relacionado en directo con la I 4.0 y la tendencia de los mantenimientos basados en el pronóstico y la salud (PHM). Como Zhang, Yang y Wang (2019) mencionan en su investigación sobre equipos industriales para el PdM, el conocer la predicción de la vida de una máquina o instrumento, puede no solo disminuir significativamente los tiempos repentinos de parada y altos costos de reparaciones, sino que también puede aumentar la seguridad de la operación y optimizar los diferentes planes de mantenimiento. Es por lo que, contar con el RUL de algunos equipos puede traerle muchos beneficios al DAM como departamento encargado de velar por el buen funcionamiento de estos, y también al Laboratorio de Biotecnología al disponer de sistemas altamente monitoreados.

No solo al DAM y al laboratorio les beneficiaría esta simulación, sino que también a la Escuela Electromecánica ya que se relaciona con las nuevas tecnologías y tendencias a nivel industrial e investigativo que se están aplicando hoy en día en muchas latitudes. Inclusive, se pretende expandir el conocimiento en cuanto a la relación que existe entre la

tecnología y las múltiples aplicaciones industriales como la confiabilidad en diversos sistemas y las nuevas técnicas en cuanto a los mantenimientos y operación de los equipos.

6.1. Simulación de datos

Para tener una estimación de la vida útil remanente se necesita de un histórico de datos bastante amplio, inclusive hasta de años para tener una buena predicción. Esto con el fin de tener registrado una gran cantidad de comportamientos a través del tiempo y que el sistema inteligente sea capaz de comparar estos casos con datos en tiempo real y realizar una estimación de cuántos ciclos de trabajo restantes podrá operar el sistema o equipo sin ningún inconveniente hasta llegar al fin de su vida útil o hasta un eventual mantenimiento correctivo. Sin embargo, en el caso actual, además de que aún no se ha implementado el sistema de monitoreo, no se cuenta con ningún tipo de bases de datos, por lo que plantear este cálculo resulta complejo.

Por consiguiente, se recurre a la hoja técnica planteada por S&P (s. f.) llamada “Depuración del aire. Filtros I”, en donde establecen la relevancia que tiene el polvo y partículas en suspensión en la vida cotidiana y aplicaciones más específicas. También, exponen los diferentes materiales y sus características como elementos filtrantes ante parámetros específicos como velocidad del aire, pérdida de carga y rendimiento. Además, muestran los comportamientos de un filtro seco, el cual es del mismo tipo que el que utilizan las unidades de aire acondicionado para suplir aire, tal y como se muestra en la Figura 30.

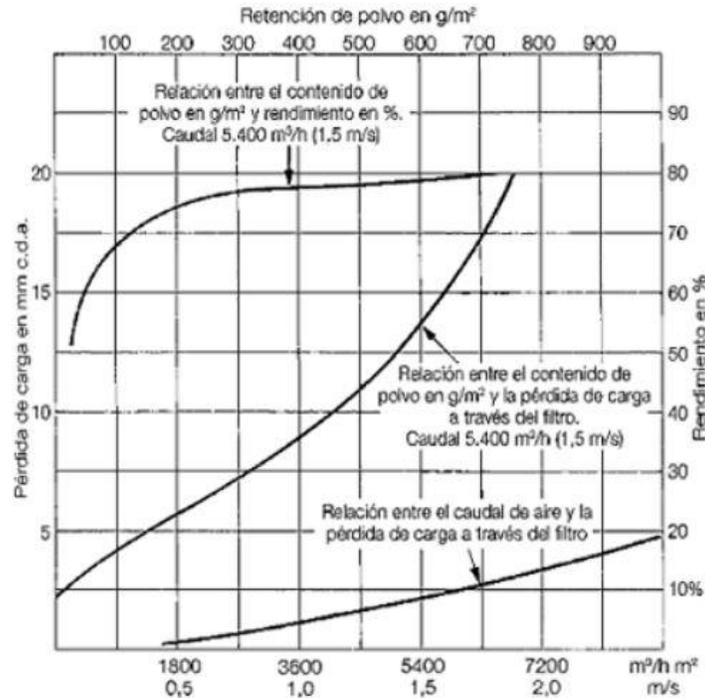


Figura 30. Características de un filtro seco. Soler&Palau

La curva de interés sería la que relaciona la retención de polvo con la pérdida de carga, ya que se pretende simular la saturación del filtro con respecto al tiempo. Conociendo el comportamiento ideal que tendría un filtro seco desde su instalación hasta llegar al punto de saturación máximo permisible, se procede a estimar la ecuación de la curva. Para obtener la ecuación se necesita de la mayor cantidad de puntos posibles identificados en la curva, por lo que, con la herramienta computacional AutoCAD, se trazan alrededor de 57 puntos para obtener el par ordenado de cada uno y así tabularlos.

Se puede observar que alrededor de una retención de partículas de 250 g/m^2 , la gráfica cambia ligeramente de concavidad, por lo que se dividen los datos para obtener dos ecuaciones y así ser más preciso en el comportamiento de la curva. En la Figura 31 se tienen las dos gráficas y ecuaciones que se obtuvieron producto del análisis antes mencionado.

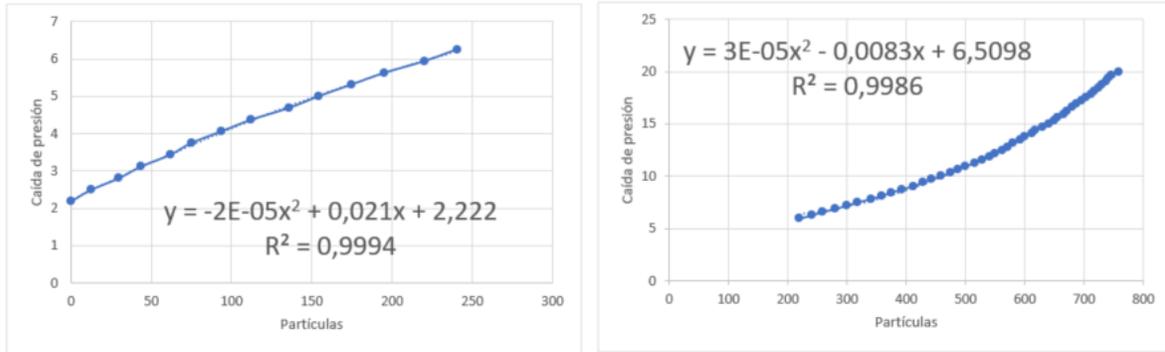


Figura 31. Tendencia de saturación de un filtro seco

Para tener una simulación más exacta se necesita una mayor cantidad de datos, por lo que, con ayuda de LabVIEW, las ecuaciones se ingresan en un simulador de señales, siendo cada ciclo de lectura una partícula de polvo y el resultado será la caída de presión correspondiente a la cantidad total de ciclos que se vaya obteniendo. Con la Figura 32 se puede comprender de mejor manera lo anterior, siendo «X1» cada iteración, lo cual corresponde a las partículas de polvo en este caso y el resultado de la fórmula sería la caída de presión. Además, se observa la programación realizada para obtener alrededor de 800 datos.

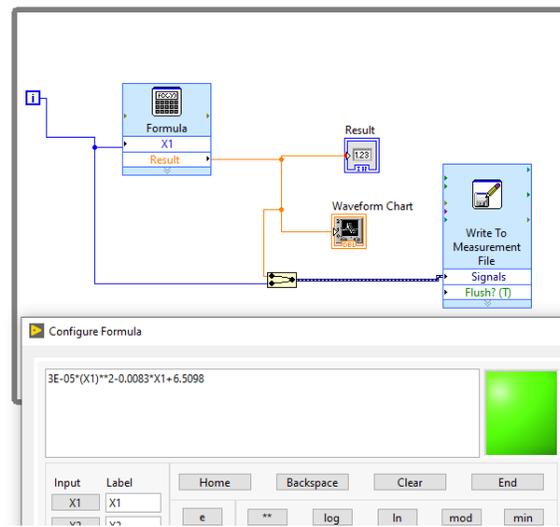


Figura 32. Programación para simular comportamiento del filtro

Una vez que se realiza la simulación con las dos ecuaciones antes descritas, se unen para formar una sola tendencia. La línea azul en la Figura 33 muestra el comportamiento simulado de un filtro de aire con una mayor cantidad de datos que la tendencia en color naranja, la cual es la obtenida con los 57 puntos iniciales. Por lo que, entre más sean los datos para describir la tendencia, más se asemejan al caso propuesto por el fabricante S&P.

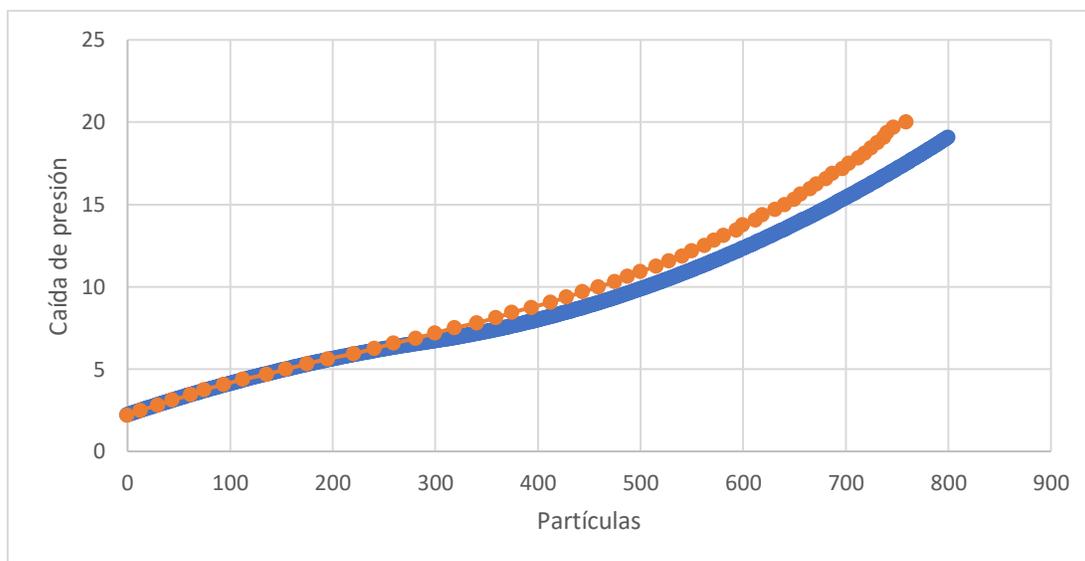


Figura 33. Gráfica con datos simulados

Ahora que se tienen las ecuaciones que describen la tendencia de acumulación de partículas en un filtro seco, estas se deben aplicar a las condiciones actuales. El fabricante Premium Filters establece que la caída de presión inicial de un filtro lavable es de 45 Pa, o 4.6 mmca para simplicidad de los cálculos. Por lo que, se adecúa la ecuación para que en el primer ciclo de medida comience donde indica el fabricante para que las simulaciones sean lo más reales posibles. Según la normativa EN 13053, la caída de presión máxima permisible es de 150 Pa o 15.30 mmca, por lo que también se toma en cuenta a la hora de analizar los datos obtenidos.

Tabla 7.

Saturación simulada de filtro de aire

Caída Presión	Partículas g/m ²	Aumento	Caída	Día
4,6	0	0,0305	4,6305	1
4,60602	1			
4,61208	2			
4,61818	3			
4,62432	4			
4,6305	5			
4,63672	6	0,03792	4,66842	2
4,64298	7			
4,64928	8			
4,65562	9			
4,662	10			
4,66842	11			
4,67488	12	0,03936	4,70778	3
4,68138	13			
4,68792	14			
4,6945	15			
4,70112	16			
4,70778	17			

Al obtener alrededor de 600 datos de la simulación obtenida aplicando las características del filtro real, se tiene la Tabla 7. La empresa encargada de realizar los mantenimientos a las unidades de aire acondicionado recomienda programar estos cada tres o cuatro meses, por lo que se decide simular el peor caso, suponiendo una saturación máxima permisible a los 90 días de funcionamiento. Es así como se dividen los datos de partículas y caídas de presión en grupos de 6 para aproximar de la mejor manera este caso crítico. Cada grupo de estos representa un día de funcionamiento, al cual se le atribuye una caída de presión que va en aumento.

En la Figura 34 se representan de manera gráfica los datos anteriormente mencionados. Se nota un claro aumento en la caída de presión con respecto pasan los días,

llegando a su valor máximo el día 100 de funcionamiento, quedando en el rango de 90-120 días que la empresa establece para una posible saturación máxima de los filtros.

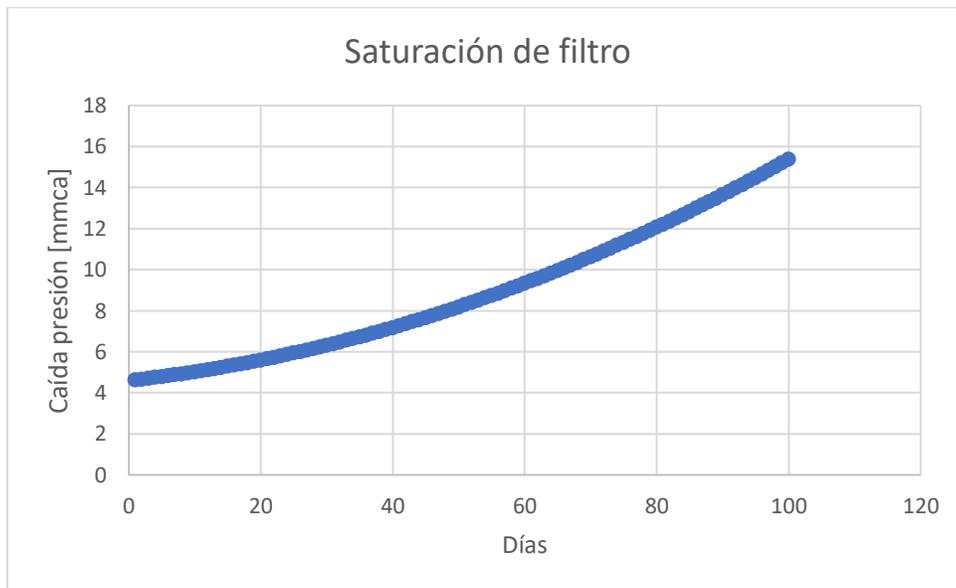


Figura 34. Gráfico de saturación con datos simulados

Como se mencionó anteriormente, para lograr buenas estimaciones de la vida útil remanente se necesitan muchos casos diferentes y una base de datos de hasta años de información obtenida. La Figura 34 muestra solamente un caso ideal basado en pruebas experimentales, con una tendencia uniforme, sin ruidos y muy lejano a la realidad, por lo que, se realiza una investigación para aproximar aún más la simulación a las aplicaciones reales.

La metodología sobre el diseño de cuartos limpios, expuesta por Castaño y Hincapié (2008), establece que: “un operador de cuarto limpio típicamente vestido generará, aproximadamente 10.000 partículas de 0.5 micras o mayores por hora por pie cúbico.” Con esta información se pretende estimar la cantidad de operarios, sean investigadores, docentes y/o estudiantes, que ingresan diariamente al laboratorio.

La investigadora A.L. Agüero (comunicación personal, 15 de octubre de 2020) menciona que este es un parámetro muy complicado de estimar debido a que no se tiene un control estricto sobre las personas que ingresan y salen y el tiempo de permanencia de cada uno en el recinto. Al no contar con estadísticas reales, se pueden plantear casos en los que el ingreso de personal varíe a diferentes tazas. Sin embargo, el estudio sobre cuartos limpios menciona la infiltración de partículas en términos de cantidad y tamaño, pero las características de saturación expuestas por el fabricante del filtro y por Soler&Palau se encuentran en términos de gramos por metro cuadrado.

Esto quiere decir que, además de conocer la cantidad de partículas que se infiltran en el laboratorio cada vez que un operario ingresa, se necesita la masa [mg] o concentración [mg/m^3] de estos contaminantes. Como S&P (s. f.) lo menciona en la hoja técnica sobre Depuración del Aire, el polvo está compuesto de muchos contaminantes y varía según el ambiente, sea rural, ciudad, zona industrial y hasta de las habitaciones de cada recinto, por lo que, definir este parámetro se sale del alcance de este proyecto y no es un dato que se pueda estimar al azar.

Para tener varios comportamientos del filtro de aire se propone realizar aumentos y disminuciones porcentuales con base a la última simulación expuesta. Así, se tendrán casos en los cuales el filtro se saturó en menos de 90 días y otros que, por el contrario, llegaron hasta a 200 días de funcionamiento sin haber llegado al diferencial de presión máximo permisible. En el apéndice D se tienen las tablas parciales de estos casos, en las cuales se puede ver que con base al caso 0 se simuló cinco más aumentando desde un 15% hasta un 75% la acumulación de partículas suspendidas, llegando este último a tan solo 71 días de operación. Mientras que se simuló otros cinco casos iniciando con una disminución del 20% hasta una del 70% con una vida útil de 200 días. Estos porcentajes fueron definidos al

azar, con el fin de aproximarse a diferentes casos aleatorios que suceden en una aplicación real.

Teniendo estos datos debidamente tabulados, se identifica la presión máxima permisible de 15.30 mmca en cada comportamiento simulado. La Figura 35 muestra una mejor visualización de estos casos, comenzando siempre en la caída de presión inicial del filtro (4.6 mmca) y terminando cerca del diferencial máximo.

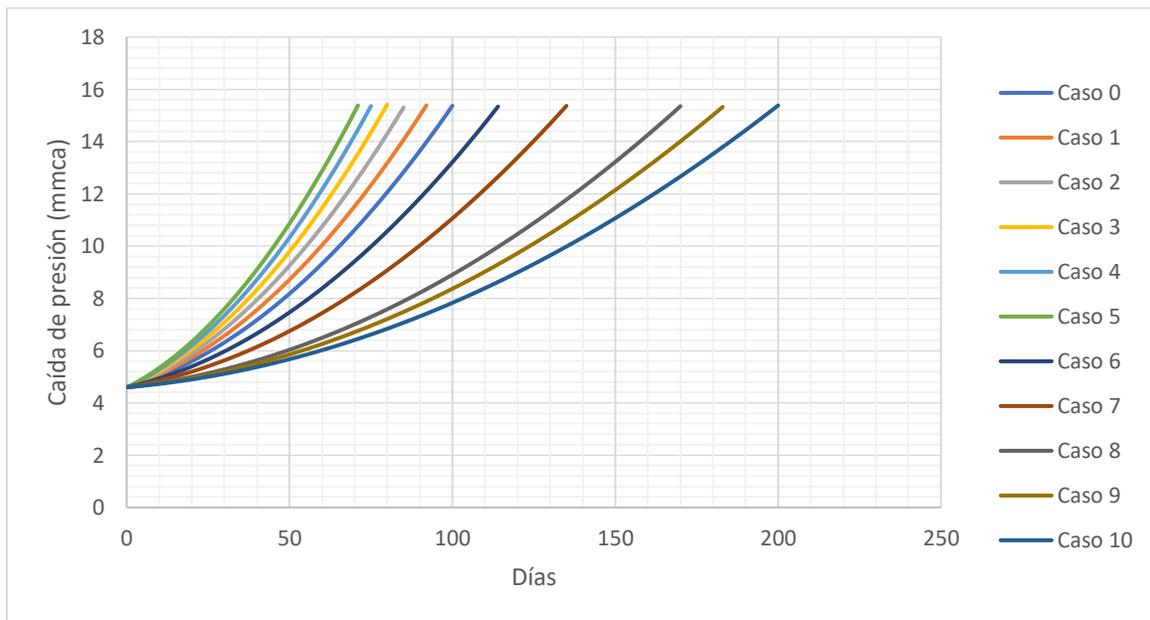


Figura 35. Casos de saturación de filtro

Cabe destacar que, todos estos comportamientos representan diferentes casos de saturación del filtro hasta que su limpieza o cambio sea necesario. Sin embargo, son muestras ideales con una tendencia constante. Realmente deberían existir distorsiones, picos en cada gráfica que representen una gran afluencia de personas en el laboratorio que permitieron el ingreso de más cantidad de partículas que la prevista, por ejemplo, y hasta zonas constantes, donde el filtro mantuvo su diferencial de presión porque no hubo infiltración de polvo, como podría ser el caso de los fines de semana en donde generalmente el laboratorio permanece cerrado.

6.2. Modelo propuesto

Para realizar cualquier tipo de análisis de datos, la información se debe ordenar de manera que favorezca los cálculos posteriores y a conveniencia del usuario. Se propone el arreglo que muestra la Figura 36. Este consiste en que, ante una serie de datos (X1-X5), se tiene una estimación del tiempo que le resta al filtro antes de que llegue al diferencial de presión máximo permisible. Cada dato corresponde a la caída de presión registrada al final de cada día, X1 para el día 1, X2 para el día 2 y así sucesivamente.

X1	X2	X3	X4	X5	RUL.X5
X2	X3	X4	X5	X6	RUL.X6
X3	X4	X5	X6	X7	RUL.X7
X4	X5	X6	X7	X8	RUL.X8
.
.
.
Xn-4	Xn-3	Xn-2	Xn-1	Xn	RUL.Xn

Figura 36. Grupos de muestreo

El grupo de muestreo se define según conveniencia y en este caso se definió utilizar cinco datos. Entre más pequeño sea el grupo, se tendrán más estimaciones del RUL por lo que podría ayudar a la predicción de este parámetro. El RUL, en este caso, se estima como los días máximos de operación menos el último día que se está analizando. Cabe destacar que la cantidad de datos que tenga cada grupo de muestreo serán las entradas (inputs) del programa o algoritmo que se seleccione posteriormente.

Tabla 8.

Arreglo de datos

X1	X2	X3	X4	X5	Y
4,6	4,6305	4,66842	4,70778	4,74858	96
4,6305	4,66842	4,70778	4,74858	4,79082	95
4,66842	4,70778	4,74858	4,79082	4,8345	94
4,70778	4,74858	4,79082	4,8345	4,87962	93
4,74858	4,79082	4,8345	4,87962	4,92618	92
4,79082	4,8345	4,87962	4,92618	4,97418	91
4,8345	4,87962	4,92618	4,97418	5,02362	90
4,87962	4,92618	4,97418	5,02362	5,0745	89
4,92618	4,97418	5,02362	5,0745	5,12682	88

En la Tabla 8 se muestra una parte del arreglo de datos realizado, donde se tienen todos los casos anteriormente propuestos, los cuales describen diferentes circunstancias ideales a las que se puede enfrentar el filtro. Como antes se menciona, cada X corresponde a la caída de presión al final de cada día, mientras que los datos Y son el RUL para el último comportamiento. Por ejemplo, los datos en la Tabla 8 corresponden al caso 0, el cual supone una vida útil de 100 días, siendo X5 al dato del día cuatro (comienza con X1 siendo el día cero), por lo que el RUL para esa fila sería de $100 - 4 = 96$, demostrando una vida útil remanente de 96 días para el primer rango de datos. Luego se debe continuar con las tendencias de los siguientes días para que el programa o algoritmo pueda identificar un comportamiento específico y asociarlo a la vida útil restante. Una vez que se tabulan los datos asociados al caso 0, se debe continuar con los demás para tener una amplia base de datos que disponga de las posibles variantes.

Los grupos de variables pueden ser más extensos si así se desea, solo que puede afectar en la precisión al momento de predecir resultados. Se define con prueba y error, según sea más conveniente y dependiendo de los requerimientos del sistema o algoritmo que se pretende utilizar.

Al utilizar un modelo computacional para la predicción de datos, se deben identificar los datos que se tienen y relacionarlos con la necesidad que se busca suplir. En este caso se decide utilizar redes neuronales artificiales, ya que tienen diferentes tipos de aprendizajes en los cuales se puede entrenar el programa para obtener mejores predicciones y tienen múltiples aplicaciones tanto a nivel académico e investigativo, como industrial. Debido a que se dispone de los datos de entrada y se conoce el resultado deseado, el aprendizaje supervisado es el método óptimo para el caso de estudio actual. Como Engelbrecht (2007) establece, el fin del entrenamiento supervisado es que, como se conocen los valores finales, la red se puede ajustar variando los pesos para que el error entre el valor real y el output se vea minimizado.

Entre los métodos que aplican el aprendizaje supervisado, se encuentra la red neuronal Perceptron Multicapa (MLP, por sus siglas en inglés), la cual consiste en múltiples capas de neuronas, en donde todas las capas están todas conectadas entre sí. Además, tiene sus conexiones hacia delante o también llamado *feedforward*, en el que las neuronas de una capa se conectan con las de la siguiente capa pero sin hacer ningún tipo de ciclo o regresión, como establece Rivas Asanza y Mazón Olivo (2018).

Dentro de sus aplicaciones, en los últimos años se ha utilizado para la predicción de datos, específicamente en el área del Mantenimiento Predictivo (PdM, por sus siglas en inglés). El artículo de Orrù et al. (2020) expone el uso de este algoritmo para la predicción de fallas de una bomba centrífuga en la industria del aceite y el gas. Las fallas potenciales fueron satisfactoriamente reconocidas por el programa; inclusive, el algoritmo le permite a los usuarios detectar las tendencias de las variaciones cuando se encuentran fuera del rango normal de operación y genera predicciones de fallas como apoyo para las decisiones del mantenimiento de los equipos.

Dadas las ventajas, las aplicaciones y las recomendaciones de expertos como el ingeniero Juan José Montero, investigador en el área de sistemas para el mantenimiento predictivo, se decide utilizar este algoritmo para estimar la vida útil remanente del filtro de aire basándose en los casos anteriormente simulados.

Primeramente, se debe conocer la estructura de la red neuronal para ingresar los datos de entrada de manera correcta o configurarlos como se necesite. Las primeras dos capas de la red, la de entrada y la oculta, tendrán la función de activación sigmoide, por lo que los datos de entrada deben estar en un rango de 0-1. Para optimizar la red, la capa de salida tendrá una función de activación tipo ReLU.

Tomando en cuenta lo anterior, los datos de la Tabla 8 se ingresan en la programación, tomando como los inputs todas las columnas menos la última, mientras que la columna Y vendría siendo el output. Luego, estos datos deben escalarse en un rango de 0-1 para que la red pueda interpretarlos correctamente. De la totalidad de los datos, debe haber un porcentaje reservado para la etapa de entrenamiento y otro para el de validación. En este caso, se opta por utilizar un 10% de los datos para validar la red neuronal.

Al ser un método para estimar valores futuros, los resultados siempre van a tener cierta variación con respecto a los reales. En este caso, se estimará este margen de exactitud con el error cuadrático medio (MSE), el cual indica que tan cerca está la aproximación calculada con respecto a los valores deseados, elevando al cuadrado esta distancia. En la Figura 37 se muestran las curvas de error, tanto de la fase de entrenamiento como de validación. Como es de esperar, el comportamiento del entrenamiento tiene un menor MSE que el de test, ya que se pone a prueba la red neuronal con datos que nunca ha procesado, los cuales corresponden al 10% que se mencionaron anteriormente.

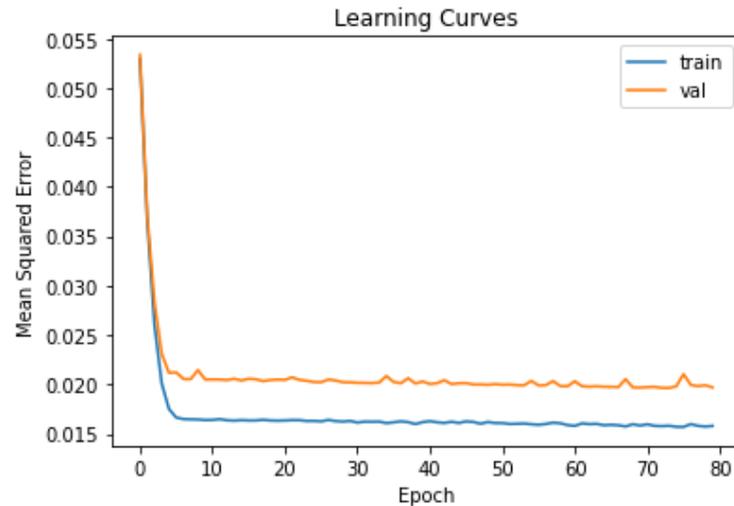


Figura 37. Curvas de aprendizaje

Sin embargo, se puede apreciar que ambas gráficas son casi planas después de pocas épocas de la red neuronal, lo que se traduce en un comportamiento asintótico, es decir, los resultados que predice el algoritmo posiblemente sean la mejor aproximación a la cual pueda llegar bajo las características ya programadas.

Una vez que se tiene la desviación que pueda tener la red al momento de predecir resultados, se procede a realizar cálculos de prueba. En la Figura 38 se muestra la programación para estimar la vida útil para un comportamiento específico. Primero, se deben ingresar los datos de entrada y salida en una escala de 0-1 debido a las funciones de activación programadas en la red. Luego, se debe acomodar estos datos de forma que la red pueda procesarlos de manera adecuada.

Con el comando «`model.predict()`» se prueba la programación y, como se muestra, de un dato esperado de 0.48469388, el modelo dio un resultado de 0.6359954, lo cual se debe escalar nuevamente para una correcta interpretación. Después de pasar los datos al rango original, se aprecia que, de 95 días de vida útil remanente, la red neuronal de tipo MLP predijo un valor aproximado de 125 días.

```

[ ] # Permite obtener la predicción ante un conjunto de x datos
# Se crea un array con las entradas que el usuario desee evaluar
#x1 = np.array([[5.207515,5.253235,5.300035,5.347615,5.396875]])
A=np.array([0.00293304, 0.00565272, 0.00825496, 0.01091045, 0.01357081])
B=np.array([0.48469388])

Ar = A.reshape(1,-1) #Single sample
Br = B.reshape(-1,1) #Horizontal to Vertical array, single feature

#print (xr.shape)
#print (model.predict(xr)) #muestra la predicción

[ ] z= model.predict(Ar)

for i,j in zip (Br,z):
    print('{} => {}'.format(i,j))

[0.48469388] => [0.6359954]

[ ] # Un-scale outputs

Yu = s2.inverse_transform(z)
Ym = s2.inverse_transform(Br)
for i,j in zip (Ym,Yu):
    print('{} => {}'.format(i,j))

[95.00000048] => [124.6551]

```

Figura 38. Predicción del RUL

De los resultados obtenidos, se aprecia una evidente desviación entre los valores deseados con los calculados. Las razones por las cuales no se pudo tener una mejor aproximación son muy variadas, como la experiencia del autor del proyecto en métodos computacionales para la predicción de datos. Los parámetros establecidos para la red neuronal o hasta la programación interna pudo afectar directamente en los resultados, así como falta de entrenamiento para una mejor predicción. Se debe tener en cuenta que existen muchos métodos para la estimación de datos, por lo que hay unos que llegan a tener mejores aproximaciones que otros.

Para conocer sobre las demás opciones en cuanto a métodos computacionales para el análisis de datos, se utiliza el software RapidMiner. Este es un programa capaz del análisis y minería de datos, el cual utiliza la inteligencia artificial para todo el ciclo de la ciencia en datos, desde la preparación hasta el *Machine Learning* y el despliegue de modelos predictivos.

Primeramente, se utilizan los mismos datos de la Tabla 8. Una vez ingresados, el sistema pide que se seleccione la tarea por implementar, sea predecir valores, identificar grupos o buscar valores atípicos dentro del conjunto de datos. Después de seleccionar qué valores se desea predecir, se especifica la columna en la cual se estimarán estos parámetros, en este caso corresponde a los datos de la columna Y, como se muestra en la Figura 39.

X1 Number	X2 Number	X3 Number	X4 Number	X5 Number	Y Number
4.600	4.630	4.668	4.708	4.749	96
4.630	4.668	4.708	4.749	4.791	95
4.668	4.708	4.749	4.791	4.835	94
4.708	4.749	4.791	4.835	4.880	93
4.749	4.791	4.835	4.880	4.926	92
4.791	4.835	4.880	4.926	4.974	91
4.835	4.880	4.926	4.974	5.024	90
4.880	4.926	4.974	5.024	5.074	89
4.926	4.974	5.024	5.074	5.127	88
4.974	5.024	5.074	5.127	5.181	87
5.024	5.074	5.127	5.181	5.236	86

1,272 rows - 6 columns (6 numerical)

Figura 39. Selección de tarea. RapidMiner

Posterior, el programa prepara los datos objetivos y se seleccionan los inputs, siendo X1, X2, X3, X4 y X5. Cargados los requerimientos anteriores, RapidMiner le da la opción al usuario de escoger los modelos que desee analizar, como se muestra en la Figura 40. Es una herramienta tan poderosa que contiene modelos basados en el Aprendizaje Profundo,

Modelos Lineales Generalizados, Árbol de Decisiones y hasta Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés), los cuales tienen múltiples aplicaciones, tanto en el área de la ingeniería como en la economía y la salud.

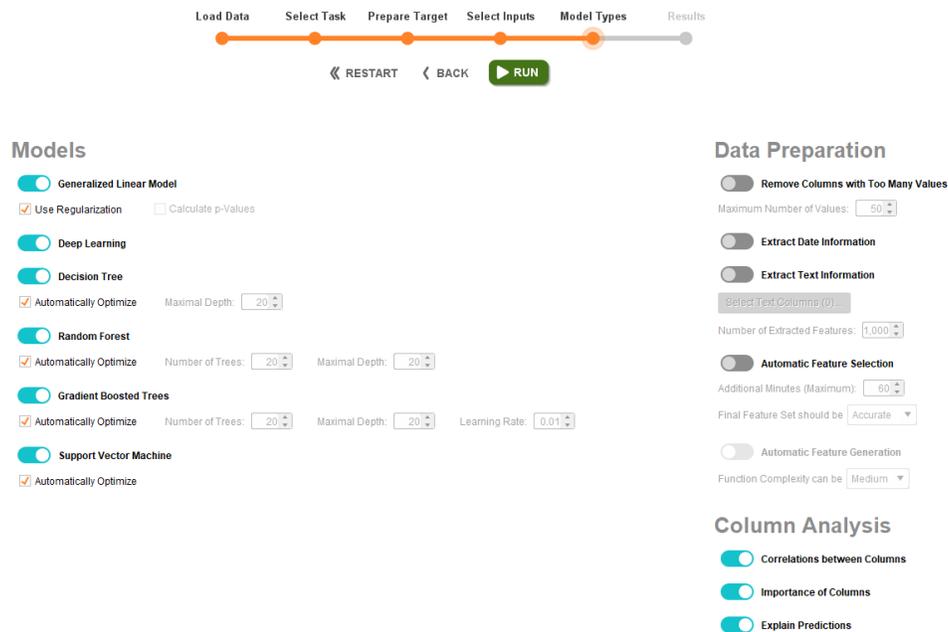


Figura 40. Selección de modelos deseados. RapidMiner

Una vez que se corre el programa, el mismo compara los resultados obtenidos por todos los modelos, tal y como se expone en la Figura 41. Se tienen gráficas correspondientes al error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) asociado a cada modelo y el tiempo de ejecución. Analizando la tabla de resumen, el modelo de Árbol de Decisiones tuvo el tiempo de ejecución más rápido y un error intermedio. Mientras que, el SVM fue el que tuvo la mejor aproximación para predecir datos, pero fue el que registró una mayor duración al ejecutarse.

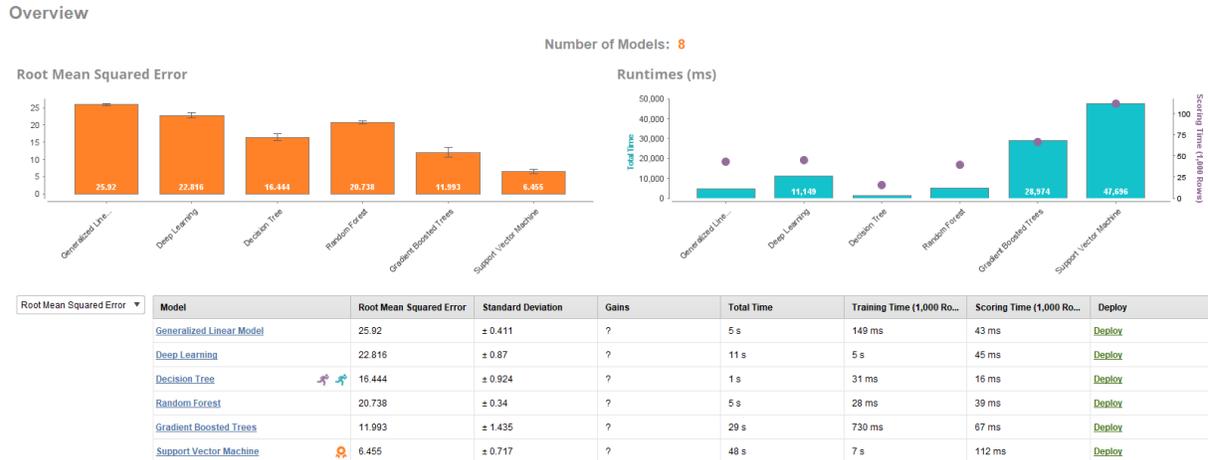


Figura 41. Comparación de modelos. RapidMiner

Al analizar con más detalle los resultados obtenidos, que el modelo SVM sea el de mejor precisión es congruente con otras investigaciones. Orrù et al. (2020), además de utilizar el modelo MLP que se expuso anteriormente, también realizaron predicciones con el algoritmo SVM para el diagnóstico de fallas en máquinas rotativas. Entonces, concluyeron que este segundo modelo muestra la mayor precisión en comparación con el anterior, por lo que es evidente por qué este modelo es muy utilizado ante la predicción de datos en el área del mantenimiento predictivo, así que la confiabilidad en el software es más que aceptable.

RapidMiner tiene la opción de no solo comparar todos los modelos entre ellos, sino que también se puede analizar cada modelo por separado. Tomando el mejor algoritmo propuesto, se genera la Tabla 9 que describe explícitamente las predicciones realizadas junto con los valores reales. Se puede evidenciar la tendencia que entre menor sea el valor real, mejor es la predicción, como cuando se tiene un RUL real de 96 días y el programa predice 121 días, mientras que, con un valor de 30 días el programa da un valor de 29.8 días, siendo un resultado deseable para la aplicación.

Tabla 9.

*Predicciones del modelo SVM***Support Vector Machine - Predictions**

Row No.	Y	prediction(Y)	X1	X2	X3	X4	X5
1	96	121.247	4.600	4.630	4.668	4.708	4.749
2	93	110.830	4.708	4.749	4.791	4.835	4.880
3	88	98.652	4.926	4.974	5.024	5.074	5.127
4	85	93.619	5.074	5.127	5.181	5.236	5.292
5	80	90.746	5.350	5.410	5.471	5.533	5.597
6	68	77.802	6.160	6.237	6.315	6.394	6.476
7	67	76.698	6.237	6.315	6.394	6.476	6.558
8	63	69.465	6.558	6.642	6.728	6.814	6.903
9	61	65.089	6.728	6.814	6.903	6.993	7.084
10	59	61.437	6.903	6.993	7.084	7.176	7.270
11	58	60.563	6.993	7.084	7.176	7.270	7.366
12	55	60.457	7.270	7.366	7.463	7.561	7.661
13	53	57.297	7.463	7.561	7.661	7.762	7.865
14	52	54.712	7.561	7.661	7.762	7.865	7.969
15	48	51.103	7.969	8.075	8.182	8.290	8.400
16	47	50.606	8.075	8.182	8.290	8.400	8.512
17	45	47.218	8.290	8.400	8.512	8.625	8.739
18	41	42.084	8.739	8.854	8.972	9.090	9.210
19	37	37.491	9.210	9.332	9.454	9.579	9.705
20	35	35.596	9.454	9.579	9.705	9.832	9.960
21	30	29.800	10.090	10.222	10.355	10.489	10.625

Este comportamiento se hace aún más notorio en la Figura 42, donde muestra la línea de valores reales comparados con las aproximaciones realizadas por el algoritmo.

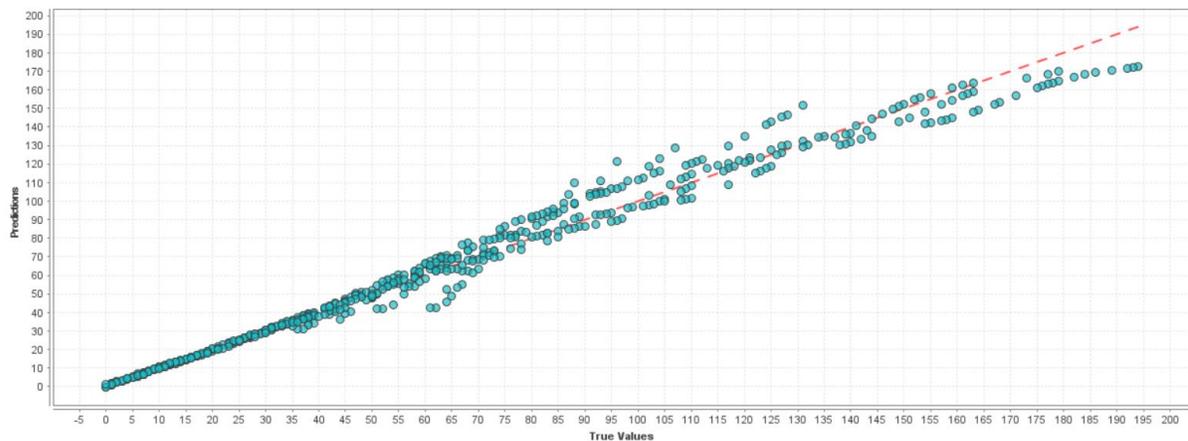
Support Vector Machine - Predictions Chart

Figura 42. Gráfico de predicciones SVM. RapidMiner

Esta herramienta puede funcionar como punto de partida para seleccionar el modelo que mejor se acople a las necesidades actuales como exactitud en los resultados, rapidez de ejecución, predicción o selección de grupos de datos específicos; para así, posteriormente desarrollarlo con mayor profundidad, ya que los algoritmos que muestra RapidMiner son generales para cualquier caso. Mientras que, para una aplicación en específico se debe trabajar con la programación interna del algoritmo y adecuarlo al caso actual de trabajo.

7. Capítulo VII. Análisis Financiero

7.1. Mantenimientos correctivos

Para determinar el valor agregado con la implementación de los sistemas de monitoreo y sus beneficios económicos, se necesita conocer el impacto que estos tendrán con respecto a los mantenimientos correctivos que se hayan realizado en años anteriores. Consultando con el Departamento de Administración de Mantenimiento, se tienen registros de las unidades de aire acondicionado del 2019 y del presente año (consultar anexos 1 y 2, respectivamente); sin embargo, se decide realizar el análisis con los del 2019 debido a que el reporte se encuentra desglosado en las reparaciones específicas y su costo correspondiente, dato que servirá para el posterior análisis de factibilidad del proyecto.

Uno de los principales objetivos de los sistemas de monitoreo es evitar fallos y reparaciones repentinas. La idea es que con los datos que se van obteniendo con el tiempo, se puedan realizar los mantenimientos programados adecuados y evitar paros de operación, por lo que, se procede a dividir en dos categorías los mantenimientos correctivos identificados en los reportes como:

- Reemplazables: son aquellos que, al implementar el sistema de monitoreo, se pueden prever y cambiarán de ser parte de los mantenimientos correctivos a los preventivos.
- No reemplazables: son los que el sistema de monitoreo no puede evitar y están fuera de su alcance de predicción.

Según lo establecido anteriormente, se clasifican los mantenimientos correctivos realizados según el informe mostrado en el Anexo 1. Reparaciones como el control de temperatura, cambio de filtro o cambio del kit de arranque y contactor se clasifican como los mantenimientos reemplazables, mientras que los demás no pueden ser previstos por el sistema de monitoreo. En la Tabla 10 se muestra un resumen de estos con el costo incluido, haciendo evidente que es más lo que se podría evitar, pues siempre podría afectar a estos sistemas de climatización.

Tabla 10.

Tipos de mantenimientos correctivos en unidades de A/C

Unidades de a/c					
Mantenimientos correctivos reemplazables					
	Filtros de aire	Filtros de aire	Arranque y contactor	Control temperatura	Control temperatura
Costo	₡ 89.100,00	₡ 89.100,00	₡ 76.700,00	₡ 65.000,00	₡ 65.000,00
Total	₡ 384.900,00				
Mantenimientos correctivos no reemplazables					
	Control pared	Control pared	Tarjeta electrónica	Tarjeta electrónica	
Costo	₡ 73.450,00	₡ 73.450,00	₡ 90.400,00	₡ 90.400,00	
Total	₡ 327.700,00				

Como estas reparaciones y cambios se realizan fuera del tiempo establecido para mantenimientos, se debe hacer un paro no programado, lo cual afecta en gran manera a las investigaciones y productos ubicados en los cuartos climatizados. Como en toda organización, un paro no programado se traduce en pérdidas tanto monetarias como del producto. Para poder estimar la pérdida en cada laboratorio se consultó a la investigadora A.L Agüero (comunicación personal, 16 de noviembre de 2020), la cual indicó que efectivamente se han perdido muchas investigaciones debido a malos funcionamientos o a mantenimientos repentinos en las unidades de aire acondicionado, sin embargo, no se cuenta con un dato exacto de las pérdidas económicas que esto representaría. En el Anexo 3 de este documento se muestra la respuesta de la investigadora, indicando que, tanto en el cuarto frío

como en los laboratorios, un paro no programado puede representar miles de dólares al ITCR.

Con el fin de tener una representación de lo que significarían estos mantenimientos correctivos y tomando en cuenta lo indicado por la investigadora, para los cuartos con unidades de aire acondicionado se toma una pérdida de \$1 000 por cada paro no programado. En la Tabla 11 se clasifican los paros según el tipo de mantenimiento correctivo, suponiendo un paro por mantenimiento, y teniendo una representación de la pérdida total por parte de los paros reemplazables y los no reemplazables.

Tabla 11.

Cuantificación de paros en unidades de a/c

Paros en unidades de a/c				
	Pérdida unitaria	Cantidad de paros	Pérdida total	
Paros no programados reemplazables	\$ 1 000	5	\$ 5 000	₡ 3 025 000,00
Paros no programados no reemplazables		4	\$ 4 000	₡ 2 420 000,00

En cuanto al cuarto frío, no se tienen registros de los mantenimientos correctivos, sin embargo, siempre se debe tener en consideración que puede ocurrir un desperfecto en cualquier momento. Observando la tendencia de los aires acondicionados, la cual muestra una mayor cantidad de paros que se pueden prevenir a comparación de los que no, se proyecta así la Tabla 12. Según lo dicho por la investigadora Agüero, el cuarto frío almacena reactivos e investigaciones bastante costosas y al no dar un monto específico, se representa la pérdida con el doble de lo que sería con las unidades de A/C, siendo de \$2 000 por cada paro no programado.

Tabla 12.

Cuantificación de paros en sistema de refrigeración

Paros en unidades de refrigeración				
	Pérdida unitaria	Cantidad de paros	Pérdida total	
Paros no programados reemplazables	\$ 2 000	2	\$ 4 000	₡ 2 420 000,00
Paros no programados no reemplazables		1	\$ 2 000	₡ 1 210 000,00

7.2. Sistemas de Monitoreo

Para estimar el costo de la inversión inicial, primeramente, se debe conocer el precio de los equipos necesarios para implementar el sistema de monitoreo. En el apéndice C están las tablas que muestran los costos por sensor, el microcontrolador por sistema, el módulo wifi y el cable necesario para realizar la instalación en cada cuarto, tanto de los que disponen de aires acondicionados como para el cuarto frío. Luego, se debe tener en cuenta la persona que realizará la instalación del sistema, por lo que se recurre a la lista de salarios establecida por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social y se toma el dato de un técnico en aire acondicionado. La tabla 13 muestra la tasa de ganancia en una jornada diurna, así como por hora.

Tabla 13.

Salario de técnico en A/C

Técnico en aire acondicionado	
Diario	₡ 11 761,76
Por hora	₡ 1 470,22

Nota: Recuperado del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social

Tomando en cuenta los precios de los equipos necesarios y de la persona encargada de hacer la instalación, se realiza la Tabla 14, en la cual se puede apreciar tanto el costo por sistema de monitoreo como por la totalidad de los que se necesitan. Para los sistemas por

instalar en los aires acondicionados, se toma en cuenta que son 5 las unidades en las cuales se pretende realizar el monitoreo y, además, se estima una duración de 5 días para que todos los equipos cuenten con el mecanismo de monitoreo incorporado. También se muestran los costos por parte del monitoreo para el sistema de refrigeración, el cual corresponde a una sola unidad, por lo que se estima un día para su instalación.

Tabla 14.

Costos de los sistemas de monitoreo

Sistema de monitoreo A/C	
Equipo por unidad	₡ 111 102,20
Unidades	5
Subtotal	₡ 555 511,00
Mano de obra (5 días)	₡ 58 808,80
Total	₡ 614 319,80
Sistema de monitoreo refrigeración	
Equipo por unidad	₡ 144 927,75
Unidades	1
Subtotal	₡ 144 927,75
Mano de obra (1 día)	₡ 11 761,76
Total	₡ 156 689,51

Cabe destacar que, en términos de los softwares utilizados, no se debe desembolsar ningún monto para su uso. Para LabVIEW, se tienen diversos paquetes para los cuales se tiene un monto establecido, sin embargo, para el caso del proyecto se utilizó la Community Edition que es de uso gratuito y solo se deben descargar los módulos de Real-Time y Control Design and Simulation, también gratuitos. En el caso de Microsoft Power Bi, la versión Desktop tampoco necesita de algún tipo de inversión. Para el análisis y minería de datos, RapidMiner dispone de una licencia educativa para aplicaciones investigativas, la cual también es gratuita y es la utilizada para los propósitos de este proyecto.

Una vez que se tiene la inversión inicial necesaria por sistema de monitoreo, se debe tener en cuenta que en el transcurso de su funcionamiento pueden existir fallas en los componentes electrónicos, específicamente los sensores que están más expuestos, por lo que, se decide establecer un monto anual para contemplar estos inconvenientes a futuro. En las Tablas 15 y 16 se encuentran los montos totales por año proyectados, estimando que se deba cambiar un sensor de cada tipo por sistema. La reparación se tardará una hora aproximadamente, esto para los monitoreos de los sistemas de A/C y el de refrigeración.

Tabla 15.

Costo mantenimiento de monitoreo A/C

Mantenimiento anual monitoreo A/C	
Sustitución sensores	₡ 36 808,20
Mano de obra (1 hora por sensor)	₡ 5 880,88
Subtotal	₡ 42 689,08
Unidades	5
Total	₡ 213 445,40

Tabla 16.

Costo mantenimiento de monitoreo refrigeración

Mantenimiento anual monitoreo refrigeración	
Sustitución sensores	₡ 27 134,25
Mano de obra (1 hora por sensor)	₡ 4 410,66
Total	₡ 31 544,91

7.3. Factibilidad del proyecto

Para determinar la viabilidad o factibilidad de un proyecto, generalmente se utilizan indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), sin embargo, se necesita de un flujo de efectivo e ingresos para determinarlos. En este caso, el proyecto no genera ganancias de manera directa, pero si puede representar ahorros en términos de mantenimientos y paros no programados. Es por lo que, se decide analizar la viabilidad de los sistemas de monitoreo mediante el indicador financiero del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) o también conocido como el Valor Anual (VA).

Como Blank y Tarquin (2012, pp. 150–164) establecen, “ el VA es el valor anual uniforme equivalente de todos los ingresos y desembolsos estimados durante el ciclo de vida del proyecto”. Es decir, se puede utilizar para comparar varios escenarios mediante los costos relacionados a cada proyecto y determinar los ahorros y ganancias que se pueden generar.

Para evaluar los sistemas de monitoreo, se necesita determinar un horizonte de evaluación. El mismo se define basándose en la vida útil de los sistemas que se verán beneficiados. Para ello, se recurre al Ministerio de Hacienda, el cual establece estos valores para diferentes tipos de equipos, fábricas, sistemas y demás. Según las tablas mostradas en el Anexo 6, para los equipos de aire acondicionado, se establece una vida útil de 10 años, mientras que, para equipos de refrigeración o frigoríficos, se determina un periodo útil de 15 años.

Cada día el costo de los bienes materiales y servicios aumentan de precio, por ello, para tener una proyección aún más aproximada, se toma en cuenta el porcentaje de inflación más reciente del país. Al mes de octubre del 2020, el Banco Central de Costa Rica establece una tasa de inflación del 0.36 %. También, para realizar el análisis financiero se necesita de

una tasa de descuento, por lo que se consulta al Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica en la Unidad de Inversiones Públicas, y como se muestra en el Anexo 7, establece una Tasa Social de Descuento del 8.31 %.

Una vez que se conoce la inversión inicial y los mantenimientos para cada sistema de monitoreo, el costo de cada mantenimiento correctivo y de los dos tipos de paros no programados, la tasa de descuento y la inflación que va a afectar a partir del primer año, se procede a realizar el análisis financiero en el horizonte de evaluación antes mencionado. En el Apéndice E se muestran los flujos para los sistemas de aire acondicionado y de refrigeración. Para ambos casos, se puede apreciar que en el momento en el cual se analizan los flujos tomando en cuenta los monitoreos, tanto los mantenimientos correctivos reemplazables como los paros reemplazables, se vuelven cero, y es donde el proyecto adquiere su valor agregado.

Se debe tener en cuenta que el sistema de monitoreo, para ambos casos, se deprecia en su totalidad al finalizar la vida útil del equipo. Al tener los costos totales, se determina el Valor Actual de Costos (VAC) con la fórmula de la Figura 43, el cual se determina similar a lo que es el VAN pero aplicado solamente a los costos del proyecto.

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

donde:

I_0 : inversión inicial

C_t : costos incurridos durante el periodo t

n : horizonte de evaluación

r : tasa social de descuento

Figura 43. Fórmula para calcular Valor Actual de Costos

Cuando se determina el VAC, se procede a calcular el indicador que definirá el valor real del proyecto. El CAUE se calcula con la fórmula mostrada en la Figura 44, la cual, en lugar del VAN, se utiliza el VAC antes calculado.

$$\text{CAUE o BAUE} = \text{VAN} * \frac{(1 + i)^n * i}{(1 + i)^n - 1}$$

Figura 44. Fórmula para el Costo Actual Uniforme Equivalente

Una vez que se determina el CAUE para cada caso, se realiza la Tabla 17 como resumen. En el caso de los A/C, el escenario 1, representa el estado actual, presenta gastos de ¢6 288 313,88, mientras que, implementado el sistema de monitoreo estos se reducen hasta ¢3 116 840,73. Finalmente, realizando la instalación en las cinco unidades de aire acondicionado y, siempre tomando en cuenta los mantenimientos correctivos y los paros no programados correspondientes, se puede llegar a tener un ahorro en gastos de hasta más de ¢3 000 000 anuales. De manera similar para el sistema de refrigeración, suponiendo los paros de operación antes mencionados, se puede llegar a tener casi ¢2 500 000 en ahorros por año.

Tabla 17.

Comparación del CAUE

Costo Anual Uniforme Equivalente			
Sistema	Escenario 1	Escenario 2	Ahorro
Aire acondicionado	¢ 6 288 313,88	¢ 3 116 840,73	¢ 3 171 473,15
Refrigeración	¢ 3 729 867,73	¢ 1 294 355,94	¢ 2 435 511,80

Los escenarios planteados son estimaciones producto de casos reales, como los mantenimientos correctivos en los aires acondicionados y los costos de inversiones iniciales, y también de casos representativos, pero siempre fundamentados, como la estimación de pérdidas por paros no programados. Sin embargo, queda en evidencia que el ITCR puede llegar a beneficiarse económicamente de igual manera.

8. Conclusiones

- Con el Análisis de Criticidad se logró determinar los sistemas críticos del Laboratorio de Biotecnología: cinco unidades de aire acondicionado, el único cuarto frío del lugar y un sistema de emergencia de inyección - extracción. Además, con el Análisis de Modos de Falla y Efectos se identificaron las diversas causas de las posibles fallas en los sistemas antes mencionados y también se determinaron los parámetros que se deben tomar en cuenta para los sistemas de monitoreo.
- El desarrollo de los sistemas de monitoreo para las unidades de aire acondicionado y para el cuarto frío satisfacen las necesidades planteadas en capítulos anteriores, como alertar al usuario sobre las posibles fallas en los equipos, enviar notificaciones de las alertas detectadas, contar con una interfaz amigable con el usuario, almacenar la información obtenida en tiempo real y una visualización eficaz del historial de datos. Esto representaría una gran ventaja para el Departamento de Administración en Mantenimiento que debe velar por el buen funcionamiento de los sistemas. En lo que respecta al sistema de emergencia, se dejaron planteadas las variables por monitorear; sin embargo, el desarrollo del sistema y su interfaz se vieron afectadas por diversas limitaciones ocurridas en el transcurso del proyecto.

- La simulación realizada para determinar la Vida Útil Remanente de un filtro de aire dio como resultado un porcentaje de error mayor que el deseado; sin embargo, se pone en evidencia el alcance al que puede llegar un sistema de monitoreo. También, con herramientas computacionales para la minería y análisis de datos se muestra la variedad de métodos existentes para la predicción de resultados, como parte de una oportunidad para explorar el campo de la ciencia de la información y aplicarla al mantenimiento predictivo que plantea la Industria 4.0.
- Mediante el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), se evidencian las múltiples ventajas que conlleva instalar sistemas de monitoreo, tales como una gran disminución en los mantenimientos correctivos y, por ende, en los paros no programados, beneficiando así a los investigadores y estudiantes que hacen uso de las instalaciones. Además, los ahorros económicos son notorios, estimando una diferencia en gastos anuales de hasta más de ₡ 3 000 000 para los sistemas de aire acondicionado y de aproximadamente ₡ 2 500 000 para el sistema de refrigeración, con el Instituto Tecnológico de Costa Rica como el más beneficiado.

9. Oportunidades de mejora

- El sistema de monitoreo puede actualizarse para realizar análisis de consumos energéticos de los sistemas de climatización del laboratorio.
- Otros equipos electrónicos pueden ser utilizados para la implementación del sistema propuesto en el proyecto, lo cual elevaría el costo total pero la precisión y la calidad de los datos serían mejorados.
- Se propone realizar el monitoreo del sistema de emergencia de ventilación, ya que en el proyecto se tienen las bases planteadas para llevarlo a cabo.
- Se puede mejorar el error obtenido en las redes neuronales, para así tener mayor precisión al momento de predecir resultados.
- Otros algoritmos pueden ser utilizados para estimar el RUL de los equipos.
- Se recomienda que el Laboratorio de Biotecnología tenga a disposición un registro de sus activos como productos, reactivos y la materia prima necesaria para realizar las investigaciones, ya que así se puede estimar con mayor exactitud el valor de cada trabajo realizado tanto por estudiantes como por investigadores.

Referencias

- Alcántara, V. (2019, marzo). ¿Cuál es el impacto económico del mantenimiento?
Vanguardia Industrial. Recuperado de <https://www.vanguardia-industrial.net/cual-es-el-impacto-economico-del-mantenimiento/#:~:text=Las empresas que ya han,de seguridad%2C salud y medio>
- Badaró, S., Ibañez, L. J., y Agüero, M. J. (2013). Sistemas expertos: fundamentos, metodologías y aplicaciones. *Ciencia y tecnología*, (13), 349–364.
- Belhadj, C. A., Hamanah, W. M., y Kassas, M. (2017). LabVIEW based real time Monitoring of HVAC System for Residential Load. *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 66–71.
- Blank, L., y Tarquin, A. (2012). *Ingeniería Económica* (Séptima). México: McGraw-Hill.
 Recuperado de https://www.academia.edu/34135131/Ingeniería_Económica_7ma_Edición_Leland_Blank_and_Anthony_Tarquin
- Brazier, F., Langen, P. van, Lukosch, S., y Vingerhoeds, R. A. (2018). *Design, Engineering and Governance of Complex Systems*.
- Castaño, J. C., y Orozco, C. A. (2008). Metodología para el diseño de cuartos limpios. *Scientia et technica*, 1(38).
- Coble, J., y Hines, J. W. (2011). Applying the general path model to estimation of remaining useful life. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 2(1), 71–82.

- Colocho, N., Daza, P., Guzmán, M., y Brito, E. (2011). *Manual básico de sistemas de aire acondicionado y extracción mecánica de uso común en arquitectura*. Universidad Dr. José Matías Delgado, Antiguo Cuscatlan. Obtenido de [https~....](https://www.usac.edu.gt/revista/revista-usac-2011-2012/revista-usac-2011-2012-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-33-34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-54-55-56-57-58-59-60-61-62-63-64-65-66-67-68-69-70-71-72-73-74-75-76-77-78-79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114-115-116-117-118-119-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135-136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156-157-158-159-160-161-162-163-164-165-166-167-168-169-170-171-172-173-174-175-176-177-178-179-180-181-182-183-184-185-186-187-188-189-190-191-192-193-194-195-196-197-198-199-200-201-202-203-204-205-206-207-208-209-210-211-212-213-214-215-216-217-218-219-220-221-222-223-224-225-226-227-228-229-230-231-232-233-234-235-236-237-238-239-240-241-242-243-244-245-246-247-248-249-250-251-252-253-254-255-256-257-258-259-260-261-262-263-264-265-266-267-268-269-270-271-272-273-274-275-276-277-278-279-280-281-282-283-284-285-286-287-288-289-290-291-292-293-294-295-296-297-298-299-300-301-302-303-304-305-306-307-308-309-310-311-312-313-314-315-316-317-318-319-320-321-322-323-324-325-326-327-328-329-330-331-332-333-334-335-336-337-338-339-340-341-342-343-344-345-346-347-348-349-350-351-352-353-354-355-356-357-358-359-360-361-362-363-364-365-366-367-368-369-370-371-372-373-374-375-376-377-378-379-380-381-382-383-384-385-386-387-388-389-390-391-392-393-394-395-396-397-398-399-400-401-402-403-404-405-406-407-408-409-410-411-412-413-414-415-416-417-418-419-420-421-422-423-424-425-426-427-428-429-430-431-432-433-434-435-436-437-438-439-440-441-442-443-444-445-446-447-448-449-450-451-452-453-454-455-456-457-458-459-460-461-462-463-464-465-466-467-468-469-470-471-472-473-474-475-476-477-478-479-480-481-482-483-484-485-486-487-488-489-490-491-492-493-494-495-496-497-498-499-500-501-502-503-504-505-506-507-508-509-510-511-512-513-514-515-516-517-518-519-520-521-522-523-524-525-526-527-528-529-530-531-532-533-534-535-536-537-538-539-540-541-542-543-544-545-546-547-548-549-550-551-552-553-554-555-556-557-558-559-560-561-562-563-564-565-566-567-568-569-570-571-572-573-574-575-576-577-578-579-580-581-582-583-584-585-586-587-588-589-590-591-592-593-594-595-596-597-598-599-600-601-602-603-604-605-606-607-608-609-610-611-612-613-614-615-616-617-618-619-620-621-622-623-624-625-626-627-628-629-630-631-632-633-634-635-636-637-638-639-640-641-642-643-644-645-646-647-648-649-650-651-652-653-654-655-656-657-658-659-660-661-662-663-664-665-666-667-668-669-670-671-672-673-674-675-676-677-678-679-680-681-682-683-684-685-686-687-688-689-690-691-692-693-694-695-696-697-698-699-700-701-702-703-704-705-706-707-708-709-710-711-712-713-714-715-716-717-718-719-720-721-722-723-724-725-726-727-728-729-730-731-732-733-734-735-736-737-738-739-740-741-742-743-744-745-746-747-748-749-750-751-752-753-754-755-756-757-758-759-760-761-762-763-764-765-766-767-768-769-770-771-772-773-774-775-776-777-778-779-780-781-782-783-784-785-786-787-788-789-790-791-792-793-794-795-796-797-798-799-800-801-802-803-804-805-806-807-808-809-810-811-812-813-814-815-816-817-818-819-820-821-822-823-824-825-826-827-828-829-830-831-832-833-834-835-836-837-838-839-840-841-842-843-844-845-846-847-848-849-850-851-852-853-854-855-856-857-858-859-860-861-862-863-864-865-866-867-868-869-870-871-872-873-874-875-876-877-878-879-880-881-882-883-884-885-886-887-888-889-890-891-892-893-894-895-896-897-898-899-900-901-902-903-904-905-906-907-908-909-910-911-912-913-914-915-916-917-918-919-920-921-922-923-924-925-926-927-928-929-930-931-932-933-934-935-936-937-938-939-940-941-942-943-944-945-946-947-948-949-950-951-952-953-954-955-956-957-958-959-960-961-962-963-964-965-966-967-968-969-970-971-972-973-974-975-976-977-978-979-980-981-982-983-984-985-986-987-988-989-990-991-992-993-994-995-996-997-998-999-1000)
- CONCHA VEGA, A. A., y OYARCE QUIROGA, P. I. (2017). *ELABORACIÓN DE PLAN DE MANTENIMIENTO FRIGORÍFICO FIORDOSUR*.
- del Val Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. *Proceedings of the Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII, Valencia, Spain*, 10.
- Emerson Climate Technologies. (2016). Manual Técnico de refrigeración y Aire Acondicionado. Recuperado de <http://corpfer.com.pe/wp-content/uploads/2016/12/Manual-Técnico-de-Refrigeración-y-Aire-Acondicionado.pdf>
- Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Ginart, A., Salazar, A., Patel, D., Roach, J., Restrepo, C., y Schweizer, H. (2016). Air Conditioning (A/C) Startup Simulator for Evaluating Nanogrid Operation. *2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 124–129.
- González Romero, M. M. (2016). *Medidor de eficiencia energética para aires acondicionados de expansión con monitoreo remoto SCADA*. Universidad de El Salvador.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2020a). Departamento de Administración de Mantenimiento. Recuperado de <https://www.tec.ac.cr/departamentos/departamento-administracion-mantenimiento>

- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2020b). Qué es el TEC. Recuperado de <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>
- International Standardization Organization. (2017). *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. ISO/IEC 17025. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:en>
- Kai, I. G., Abhinav, S., Matt, D., Jose, C., y Roychoudhury. (2012). *Introduction to Prognostics*. NASA Ames Research Center, Prognostics Center of Excellence.
- Lauriac, N. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo*. Suiza: Terre des hommes.
- Martín, C. M. (2010). *Análisis de señales de medidas mecánicas para el mantenimiento predictivo avanzado*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- MICITT. (2015). *Plan Nacional Ciencia, Tecnología e Innovación 2015-2021*. San José, Costa Rica: Unidad de Planificación Institucional.
- Montero Jiménez, J. J., y Vingerhoeds, R. (2019). A System Engineering Approach to Predictive Maintenance Systems: from needs and desires to logical architecture. *2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 1–8.
- Mosquera, G., la Victoria, M., y Armas, R. (2001). Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo. *Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Caracas*.
- Najafi, M., Auslander, D. M., Bartlett, P. L., Haves, P., y Sohn, M. D. (2012). Application of machine learning in the fault diagnostics of air handling units. *Applied Energy*, *96*, 347–358.
- National Instruments. (2020). Qué es LabVIEW. Recuperado de <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>

- Orrù, P. F., Zoccheddu, A., Sassu, L., Mattia, C., Cozza, R., y Arena, S. (2020). Machine Learning Approach Using MLP and SVM Algorithms for the Fault Prediction of a Centrifugal Pump in the Oil and Gas Industry. *Sustainability*, 12(11), 4776.
- Pinzón Sánchez, J. F., y Pérez Pérez, P. P. (2019). *Módulo de aire acondicionado enfocado a la filtración del aire*.
- Rivas Asanza, W., y Mazón Olivo, B. (2018). *Redes neuronales artificiales aplicadas al reconocimiento de patrones*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Serra, F. M., Catuogno, G., De Angelo, C. H., y Bossio, G. R. (2008). Sistemas de monitoreo de condición en turbinas eólicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12.
- Soler&Palau. (s. f.). Depuración del aire. Filtros I. Recuperado de <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-depuracion-del-aire-filtros/>
- Sreedharan, P. (2001). *Evaluation of chiller modeling approaches and their usability for fault detection*.
- Subils, M. B. (1991). *NTP 289: Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Tecener SA. (2015). *Sistemas de Aire Acondicionado - Tutorial para el trabajo de campo* (GIZ, Ed.). El Comité Nacional de Productividad e Innovación Tecnológica.
- Trojanova, J., Vass, J., Macek, K., Rojiček, J., y Stluka, P. (2009). Fault diagnosis of air handling units. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(8), 366–371. Recuperado de moz-extension://343f8ae9-9ba8-4334-af67-59ecd2a64c93/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS1876610217347136%2Fpdf%3FisDTMRedir%3Dtrue

Wang, Z., Wang, Z., He, S., Gu, X., y Yan, Z. F. (2017). Fault detection and diagnosis of chillers using Bayesian network merged distance rejection and multi-source non-sensor information. *Applied energy*, 188, 200–214.

Zhang, W., Yang, D., y Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 2213–2227.

Apéndices

A. Análisis de criticidad para sistemas de climatización

Equipo: Cuarto frío		Código:	
DATOS DEL EQUIPO		Foto del equipo	
Proveedor:			
Descripción del equipo: Mantener los productos y equipos a una temperatura de 4°C			
Características principales : Alimentación 208/230 V			
Valores de referencia: 208/230 V, 2,88 MPa alta y 2,10 MPa baja, 1,7 TON			
Análisis de criticidad			
Criterios de evaluación		Definición	Calificación
A	Impacto en seguridad	Medida en que una falla provoca La exposición riesgos en salud e higiene ocupacional, tanto a los colaboradores como a la comunidad.	2
B	Impacto en el medio ambiente	Medida en que una falla produce emanaciones de gases, partículas en suspensión, derrames químicos, contaminación de todo tipo de aguas y a la tierra.	2
C	Impacto en la producción total	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total de la planta de producción.	3
D	Impacto en la producción de línea	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total a la línea específica de producción donde se encuentra este equipo o instalación.	3
E	Impacto en la integridad de otros equipos	Medida en que por su inadecuada operación repercuten daños a otros equipos.	1
F	Impacto en la calidad	Provoca una alteración directa en la calidad de los procesos productivos, no cumpliéndose los parámetros de calidad establecidos.	3
G	Valor económico	Precio de la máquina.	2
H	Dificultad de adquisición	Su disponibilidad de repuestos no es inmediata y la importación del equipo o instalación requiere de un tiempo prolongado.	1
Calificación del equipo			17
Tipo de equipo		CRÍTICO	
Rúbrica de calificación		Modelo de mantenimiento	
0	Nada importante	Correctivo	
1	Poco importante	Condicional	
2	Importante	Sistemático	
3	Muy importante	Alta disponibilidad	X

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

Equipo: Inyección-Extracción		Código:	
DATOS DEL EQUIPO		Foto del equipo	
Proveedor:			
Descripción del equipo: Activarse ante una emergencia que requiera extracción de aire del recinto e inyección de aire fresco.			
Características principales : Alimentación 115/230 V			
Valores de referencia: 115/230 V			
Análisis de criticidad			
Criterios de evaluación		Definición	Calificación
A	Impacto en seguridad	Medida en que una falla provoca La exposición riesgos en salud e higiene ocupacional, tanto a los colaboradores como a la comunidad.	3
B	Impacto en el medio ambiente	Medida en que una falla produce emanaciones de gases, partículas en suspensión, derrames químicos, contaminación de todo tipo de aguas y a la tierra.	0
C	Impacto en la producción total	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total de la planta de producción.	1
D	Impacto en la producción de línea	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total a la línea específica de producción donde se encuentra este equipo o instalación.	1
E	Impacto en la integridad de otros equipos	Medida en que por su inadecuada operación repercuten daños a otros equipos.	2
F	Impacto en la calidad	Provoca una alteración directa en la calidad de los procesos productivos, no cumpliéndose los parámetros de calidad establecidos.	2
G	Valor económico	Precio de la máquina.	2
H	Dificultad de adquisición	Su disponibilidad de repuestos no es inmediata y la importación del equipo o instalación requiere de un tiempo prolongado.	1
Calificación del equipo			12
Tipo de equipo		CRÍTICO	
Rúbrica de calificación		Modelo de mantenimiento	
0	Nada importante	Correctivo	
1	Poco importante	Condicional	
2	Importante	Sistemático	
3	Muy importante	Alta disponibilidad	X

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

B. Modos de falla para sistema de refrigeración con sus respectivos equipos y sistema de emergencia de inyección – extracción de aire.

Sistema: Sistema de refrigeración		Subsistema: Compresor		Función		Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla	Consecuencias
Comprimir el refrigerante en estado gaseoso para aumentar la presión a 2,88 MPa.	1	El compresor no arranca	1	La presión de 2,10 MPa en la zona de baja y de 2,88 MPa en la de alta no están presentes.	Al no haber suficiente presión en el sistema, el compresor no arranca y los demás equipos no pueden realizar sus funciones.	Operacional: No se completa el ciclo de refrigeración, por lo que el sistema no funciona como se debe.			
			2	Equipo desconectado de la red o recibe una tensión diferente a 208/230 V.	Al equipo no le llega la potencia eléctrica necesaria para desarrollar sus funciones.				
			3	El breaker del compresor se encuentra abierto.	No permite que llegue la energía eléctrica al equipo.				
	2	El compresor tiene ciclos muy cortos	1	Hay un exceso de refrigerante en las líneas del sistema, >1.7 TR de R-404A	Está la posibilidad de que haya retorno de refrigerante líquido al compresor. / Congelamiento del serpentín del evaporador.	No operacional: Aumenta la demanda eléctrica y baja la eficiencia del equipo.			
			2	Válvula de servicio de descarga está parcialmente cerrada.	Hay una alta presión en la zona de descarga.				
			3	La señal del termostato es intermitente.	Puede causar problemas en el motor del compresor debido a una mayor cantidad de arranques en un corto periodo de tiempo.				
	3	El compresor tiene ciclos extremadamente largos	1	El sistema tiene una carga de refrigerante menor a 1.7 TR de R-404A	Causa que los ciclos sean muy largos porque no llega el refrigerante adecuado, lo que disminuye la eficiencia del sistema.	Operacional: El proceso de enfriamiento del recinto es más lento			
			2	Serpentín del evaporador congelado.	El recinto no se refrigera de la mejor manera y se puede llegar hasta un fallo total del sistema.				
			3	Regulación incorrecta de la temperatura del condensador.	La presión de descarga es baja.				
			4	Filtro deshidratador o secador está bloqueado	Restringe el paso del refrigerante, lo que causa que le llegue menos de este al compresor y su ciclo sea más largo de lo normal.				

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

Sistema: Sistema de refrigeración		Subsistema: Evaporador		Función		Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla	Consecuencias
Realizar el intercambio térmico entre el aire y el refrigerante ubicado en los serpentines con la ayuda de los ventiladores para acondicionar el recinto a 4°C.	1	Ventiladores no funcionan	1	Reloj o termostato de deshielo defectuoso.	No le llega la señal a los ventiladores para que se activen.	Operacional: El recinto no se va a climatizar, comprometiendo así la integridad de los productos en su interior.			
			2	El motor de los ventiladores está defectuoso.	Los ventiladores no tienen la potencia motriz necesaria para cumplir su función.				
			3	El serpentín no se enfría lo suficiente para reestablecer el termostato.	Al no reestablecer el termostato, el ciclo de refrigeración no se puede completar.				
	2	La temperatura del laboratorio es mayor a 4°C	1	El sistema tiene una carga de refrigerante menor a 1.7 TR de R-404A	Se evapora todo el refrigerante del serpentín del evaporador sin llegar a los 4°C que necesita el recinto.	Operacional: los productos e investigaciones en ese cuarto pueden sufrir alteraciones considerables.			
			2	Serpentín bloqueado o escarchado	La transferencia de calor es parcial.				
			3	Calibración del termostato es alta con respecto a lo que demanda el cuarto.	El ciclo se va a dar correctamente, pero el recinto siempre tendrá una temperatura mayor a la aceptable.				
	3	Acumulación de hielo en el techo, alrededor del evaporador, en hojas del ventilador	1	La duración del deshielo es muy larga.	Se puede bloquear el flujo de aire.	No operacional: la eficiencia del sistema se ve disminuida y está propensa a fallos críticos.			
			2	El retardador del ventilador no retarda los ventiladores después del período de deshielo.	El evaporador no drena todo el agua descongelada en el deshielo, por lo que se pueden bloquear los ductos de drenaje.				

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

Sistema: Sistema de refrigeración							
Subsistema: Condensador							
Función		Falla funcional		Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencias
1	Realizar el intercambio térmico necesario para que el refrigerante pase de estado gaseoso a líquido.	1	No realiza el intercambio de calor.	1	Los ventiladores no funcionan.	Oscurecimiento de la carcasa, indicando que están quemados.	Operacional: Va a haber un fallo en el sistema y no va a ser capaz de realizar el ciclo de refrigeración en el cuarto.
				2	El serpentín presenta una rotura.	No se logra el cambio total de estado en el refrigerante.	
				3	La válvula está bloqueada.	Hay un aumento de temperatura en el condensador y en la presión.	
		2	Realiza el intercambio de calor parcialmente.	1	Hay una fuga en el serpentín.	Se da pérdida de refrigerante.	Operacional: el sistema resulta ineficiente, pueden haber fallos mecánicos y el cuarto no va a ser debidamente refrigerado.
				2	El condensador está sucio.	Aumento de temperatura y presión en el condensador.	
				3	Hay gas no condensable en el sistema.	El refrigerante no cambia de estado en el condensador.	

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

Sistema: Sistema de inyección-extracción de aire							
Subsistema:							
Función		Falla funcional		Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencias
1	Extraer el aire contaminado por nitrógeno líquido e inyectar aire fresco al laboratorio de Criopreservación.	1	Exceso de ruido en el sistema	1	Los niveles de vibraciones superan los 10,6 mm/s rms, valor basado en la norma ISO 14694	Rodamientos defectuosos, problemas de lubricación.	No operacional: el confort de las instalaciones es perjudicado.
				2	Las fajas están muy ajustadas o muy holgadas	Motor más forzado o la transmisión de potencia al ventilador se ve disminuida.	
				3	Base del ventilador mal ajustada	Causa daños estructurales	
		2	Ventilador no opera	1	Equipo desconectado de la red o recibe una tensión diferente a 115/230V.	Al no haber suficiente presión en el sistema, el compresor no arranca y los demás equipos no pueden realizar sus funciones.	Operacional: La salud de los ocupantes se ve altamente comprometida, no se puede extraer el nitrógeno ni tampoco se inyecta aire fresco al recinto.
				2	Fajas defectuosas	La transmisión de potencia es inexistente entre el motor y el ventilador	
				3	Motor sobredimensionado o defecto de diseño eléctrico	La protección de sobrecarga se dispara e interrumpe el flujo eléctrico.	
		3	Sobrecarga o sobre calentamiento del motor	1	Problemas de lubricación	Rodamientos están expuestos a fallos mecánicos.	No operacional: se da un aumento en la demanda eléctrica.
				2	Motor infradimensionado	El motor está forzado a superar su capacidad máxima, está expuesto a fallos mecánicos.	
				3	Deslizamiento de fajas	Disminución de la transmisión de potencia y ruidos en el sistema.	
		4	El flujo de aire es reducido	1	Resistencia del sistema es muy alta	El motor se sobrecarga y/o sobrecalienta.	Operacional: el ciclo de inyección-extracción no es eficiente y la salud de los ocupantes se puede ver afectada.
				2	Suciedad en ductos, dampers y/o filtros	La suciedad puede llegar a los componentes eléctricos, haciéndolos propensos a fallos o mayor deterioro.	
				3	Problemas en las fajas	Transmisión de potencia no es la deseada.	
				4	Dampers cerrados	El motor se ve más forzado.	

Fuente: elaboración propia. Microsoft Excel

C. Equipos y sensores necesarios para implementar los sistemas de monitoreo para los aires acondicionados y el sistema de refrigeración.

Aire Acondicionado (para un recinto)								
Parámetro	Equipo	Aplicación	Cantidad	Fotografía	Precio unitario		Precio total	
Temperatura/Humedad	DHT22	Medir en el recinto	1		\$ 8,9	₡ 5.384,50	\$ 8,9	₡ 5.384,50
Presión líquido y gas	YCQB05H01	Para dif de presión en deshidratador y datos en alta presión	4		\$ 18,0	₡ 10.890,00	\$ 72,0	₡ 43.560,00
Dif presión aire	MPX5010DP	Para dif presión en filtro de aire	1		\$ 16,0	₡ 9.673,95	\$ 16,0	₡ 9.673,95
Corriente	SCT-013	Medir corriente del sistema	1		\$ 18,0	₡ 10.859,75	\$ 18,0	₡ 10.859,75
Microcontrolador	Arduino - Mega 2560 R3	Punto de conexión para sensores y enviar datos al ordenador	1		\$ 48,0	₡ 29.009,75	\$ 48,0	₡ 29.009,75
Módulo WiFi	ESP8266	Enviar datos del recinto al punto de análisis	1		\$ 9,0	₡ 5.414,75	\$ 9,0	₡ 5.414,75
Cable eléctrico	Ribbon Cable - 6 wire [CAB-10646]	Permitir las conexiones eléctricas entre componenetes	2		\$ 6,0	₡ 3.599,75	\$ 11,9	₡ 7.199,50
Totales			11				\$ 183,6	₡ 111.102,20

Sistema de Refrigeración								
Parámetro	Sensor	Aplicación	Cantidad	Fotografía	Precio unitario		Precio total	
Temperatura/Humedad	DHT22	Medir en el recinto	1		\$ 8,9	₡ 5.384,50	\$ 9,0	₡ 5.384,50
Presión líquido y gas	YQ805H01	Para dif de presión en deshidratador y datos en alta presión	6		\$ 18,0	₡ 10.890,00	\$ 108,9	₡ 65.340,00
Corriente	SCT-013	Demanda de la unidad condensadora, evaporadora y compresor	3		\$ 18,0	₡ 10.859,75	\$ 54,3	₡ 32.579,25
Microcontrolador	Arduino - Mega 2560 R3	Punto de conexión para sensores y enviar datos al ordenador	1		\$ 48,0	₡ 29.009,75	\$ 48,3	₡ 29.009,75
Módulo WiFi	ESP8266	Enviar datos del recinto al punto de análisis	1		\$ 9,0	₡ 5.414,75	\$ 9,0	₡ 5.414,75
Cable eléctrico	Ribbon Cable - 6 wire [CAB-10646]	Permitir las conexiones eléctricas entre componenetes	2		\$ 6,0	₡ 3.599,75	\$ 12,0	₡ 7.199,50
Totales			14				\$ 241,5	₡ 144.927,75

D. Casos simulados sobre saturación de un filtro de aire

Día	Caso 0		Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5	
	Aumento 0%	Caída de presión	Aumento 15%	Caída de presión	Aumento 30%	Caída de presión	Aumento 45%	Caída de presión	Aumento 60%	Caída de presión	Aumento 75%	Caída de presión
0	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6
1	0,0305	4,6305	0,035075	4,635075	0,03965	4,63965	0,044225	4,644225	0,0488	4,6488	0,053375	4,653375
2	0,03792	4,66842	0,043608	4,678683	0,049296	4,688946	0,054984	4,699209	0,060672	4,709472	0,06636	4,719735
3	0,03936	4,70778	0,045264	4,723947	0,051168	4,740114	0,057072	4,756281	0,062976	4,772448	0,06888	4,788615
4	0,0408	4,74858	0,04692	4,770867	0,05304	4,793154	0,05916	4,815441	0,06528	4,837728	0,0714	4,860015
5	0,04224	4,79082	0,048576	4,819443	0,054912	4,848066	0,061248	4,876689	0,067584	4,905312	0,07392	4,933935
6	0,04368	4,8345	0,050232	4,869675	0,056784	4,90485	0,063336	4,940025	0,069888	4,9752	0,07644	5,010375
7	0,04512	4,87962	0,051888	4,921563	0,058656	4,963506	0,065424	5,005449	0,072192	5,047392	0,07896	5,089335
8	0,04656	4,92618	0,053544	4,975107	0,060528	5,024034	0,067512	5,072961	0,074496	5,121888	0,08148	5,170815
9	0,048	4,97418	0,0552	5,030307	0,0624	5,086434	0,0696	5,142561	0,0768	5,198688	0,084	5,254815
10	0,04944	5,02362	0,056856	5,087163	0,064272	5,150706	0,071688	5,214249	0,079104	5,277792	0,08652	5,341335
11	0,05088	5,0745	0,058512	5,145675	0,066144	5,21685	0,073776	5,288025	0,081408	5,3592	0,08904	5,430375
12	0,05232	5,12682	0,060168	5,205843	0,068016	5,284866	0,075864	5,363889	0,083712	5,442912	0,09156	5,521935
13	0,05376	5,18058	0,061824	5,267667	0,069888	5,354754	0,077952	5,441841	0,086016	5,528928	0,09408	5,616015
14	0,0552	5,23578	0,06348	5,331147	0,07176	5,426514	0,08004	5,521881	0,08832	5,617248	0,0966	5,712615
15	0,05664	5,29242	0,065136	5,396283	0,073632	5,500146	0,082128	5,604009	0,090624	5,707872	0,09912	5,811735
16	0,05808	5,3505	0,066792	5,463075	0,075504	5,57565	0,084216	5,688225	0,092928	5,8008	0,10164	5,913375
17	0,05952	5,41002	0,068448	5,531523	0,077376	5,653026	0,086304	5,774529	0,095232	5,896032	0,10416	6,027535
18	0,06096	5,47098	0,070104	5,601627	0,079248	5,732274	0,088392	5,862921	0,097536	5,993568	0,10668	6,124215
64	0,1272	9,83178	0,14628	10,616547	0,16536	11,401314	0,18444	12,186081	0,20352	12,970848	0,2226	13,755615
65	0,12864	9,96042	0,147936	10,764483	0,167232	11,568546	0,186528	12,372609	0,205824	13,176672	0,22512	13,980735
66	0,13008	10,0905	0,149592	10,914075	0,169104	11,73765	0,188616	12,561225	0,208128	13,3848	0,22764	14,208375
67	0,13152	10,2202	0,151248	11,065323	0,170976	11,908626	0,190704	12,751929	0,210432	13,595232	0,23016	14,438535
68	0,13296	10,35498	0,152904	11,218227	0,172848	12,081474	0,192792	12,944721	0,212736	13,807968	0,23268	14,671215
69	0,1344	10,48938	0,15456	11,372787	0,17472	12,256194	0,19488	13,139601	0,21504	14,023008	0,2352	14,906415
70	0,13584	10,62522	0,156216	11,529003	0,176592	12,432786	0,196968	13,336569	0,217344	14,240352	0,23772	15,144135
71	0,13728	10,7625	0,157872	11,686875	0,178464	12,61125	0,199056	13,535625	0,219648	14,46	0,24024	15,384375
72	0,13872	10,90122	0,159528	11,846403	0,180336	12,791586	0,201144	13,736769	0,221952	14,681952	0,24276	15,627135
73	0,14016	11,04138	0,161184	12,007587	0,182208	12,973794	0,203232	13,940001	0,224256	14,906208	0,24528	15,872415
74	0,1416	11,18298	0,16284	12,170427	0,18408	13,157874	0,20532	14,145321	0,22656	15,132768	0,2478	16,120215
75	0,14304	11,32602	0,164496	12,334923	0,185952	13,343826	0,207408	14,352729	0,228864	15,361632	0,25032	16,370535
76	0,14448	11,4705	0,166152	12,501075	0,187824	13,53165	0,209496	14,562225	0,231168	15,5928	0,25284	16,623375
77	0,14592	11,61642	0,167808	12,668883	0,189696	13,721346	0,211584	14,773809	0,233472	15,826272	0,25536	16,878735
78	0,14736	11,76378	0,169464	12,838347	0,191568	13,912914	0,213672	14,987481	0,235776	16,062048	0,25788	17,136615
79	0,1488	11,91258	0,17112	13,009467	0,19344	14,106354	0,21576	15,203241	0,23808	16,300128	0,2604	17,397015
80	0,15024	12,06282	0,172776	13,182243	0,195312	14,301666	0,217848	15,421089	0,240384	16,540512	0,26292	17,659935
81	0,15168	12,2145	0,174432	13,356675	0,197184	14,49885	0,219936	15,641025	0,242688	16,7832	0,26544	17,925375
82	0,15312	12,36762	0,176088	13,532763	0,199056	14,697906	0,222024	15,863049	0,244992	17,028192	0,26796	18,193335
83	0,15456	12,52218	0,177744	13,710507	0,200928	14,898834	0,224112	16,087161	0,247296	17,275488	0,27048	18,463815
84	0,156	12,67818	0,1794	13,889907	0,2028	15,101634	0,2262	16,313361	0,2496	17,525088	0,273	18,736815
85	0,15744	12,83562	0,181056	14,070963	0,204672	15,306306	0,228288	16,541649	0,251904	17,776992	0,27552	19,012335
86	0,15888	12,9945	0,182712	14,253675	0,206544	15,51285	0,230376	16,772025	0,254208	18,0312	0,27804	19,290375
87	0,16032	13,15482	0,184368	14,438043	0,208416	15,721266	0,232464	17,004489	0,256512	18,287712	0,28056	19,570935
88	0,16176	13,31658	0,186024	14,624067	0,210288	15,931554	0,234552	17,239041	0,258816	18,546528	0,28308	19,854015
89	0,1632	13,47978	0,18768	14,811747	0,21216	16,143714	0,23664	17,475681	0,26112	18,807648	0,2856	20,139615
90	0,16464	13,64442	0,189336	15,001083	0,214032	16,357746	0,238728	17,714409	0,263424	19,071072	0,28812	20,427735
91	0,16608	13,8105	0,190992	15,192075	0,215904	16,57365	0,240816	17,955225	0,265728	19,3368	0,29064	20,718375
92	0,16752	13,97802	0,192648	15,384723	0,217776	16,791426	0,242904	18,198129	0,268032	19,604832	0,29316	21,011535
93	0,16896	14,14698	0,194304	15,579027	0,219648	17,011074	0,244992	18,443121	0,270336	19,875168	0,29568	21,307215
94	0,1704	14,31738	0,19596	15,774987	0,22152	17,232594	0,24708	18,690201	0,27264	20,147808	0,2982	21,605415
95	0,17184	14,48922	0,197616	15,972603	0,223392	17,455986	0,249168	18,939369	0,274944	20,422752	0,30072	21,906135
96	0,17328	14,6625	0,199272	16,171875	0,225264	17,68125	0,251256	19,190625	0,277248	20,7	0,30324	22,209375
97	0,17472	14,83722	0,200928	16,372803	0,227136	17,908386	0,253344	19,443969	0,279552	20,979552	0,30576	22,515135
98	0,17616	15,01338	0,202584	16,575387	0,229008	18,137394	0,255432	19,699401	0,281856	21,261408	0,30828	22,823415
99	0,1776	15,19098	0,20424	16,779627	0,23088	18,368274	0,25752	19,956921	0,28416	21,545568	0,3108	23,134215
100	0,17904	15,37002	0,205896	16,985523	0,232752	18,601026	0,259608	20,216529	0,286464	21,832032	0,31332	23,447535

Día	Caso 6		Caso 7		Caso 8		Caso 9		Caso 10	
	Disminución -20%	Caída de presión	Disminución -40%	Caída de presión	Disminución -60%	Caída de presión	Disminución -65%	Caída de presión	Disminución -70%	Caída de presión
0	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6	0	4,6
1	0,0244	4,6244	0,0183	4,6183	0,0122	4,6122	0,010675	4,610675	0,00915	4,60915
2	0,030336	4,654736	0,022752	4,641052	0,015168	4,627368	0,013272	4,623947	0,011376	4,620526
3	0,031488	4,686224	0,023616	4,664668	0,015744	4,643112	0,013776	4,637723	0,011808	4,632334
4	0,03264	4,718864	0,02448	4,689148	0,01632	4,659432	0,01428	4,652003	0,01224	4,644574
5	0,033792	4,752656	0,025344	4,714492	0,016896	4,676328	0,014784	4,666787	0,012672	4,657246
112	0,157056	15,024656	0,117792	12,418492	0,078528	9,812328	0,068712	9,160787	0,058896	8,509246
113	0,158208	15,182864	0,118656	12,537148	0,079104	9,891432	0,069216	9,230003	0,059328	8,568574
114	0,15936	15,342224	0,11952	12,656668	0,07968	9,971112	0,06972	9,299723	0,05976	8,628334
115	0,160512	15,502736	0,120384	12,777052	0,080256	10,051368	0,070224	9,369947	0,060192	8,688526
116	0,161664	15,664	0,121248	12,8983	0,080832	10,1322	0,070728	9,440675	0,060624	8,74915
117	0,162816	15,827216	0,122112	13,020412	0,081408	10,213608	0,071232	9,511907	0,061056	8,810206
118	0,163968	15,991184	0,122976	13,143388	0,081984	10,295592	0,071736	9,583643	0,061488	8,871694
119	0,16512	16,156304	0,12384	13,267228	0,08256	10,378152	0,07224	9,655883	0,06192	8,933614
120	0,166272	16,322576	0,124704	13,391932	0,083136	10,461288	0,072744	9,728627	0,062352	8,995966
121	0,167424	16,49	0,125568	13,5175	0,083712	10,545	0,073248	9,801875	0,062784	9,05875
122	0,168576	16,658576	0,126432	13,643932	0,084288	10,629288	0,073752	9,875627	0,063216	9,121966
123	0,169728	16,828304	0,127296	13,771228	0,084864	10,714152	0,074256	9,949883	0,063648	9,185614
124	0,17088	16,999184	0,12816	13,899388	0,08544	10,799592	0,07476	10,024643	0,06408	9,249694
125	0,172032	17,171216	0,129024	14,028412	0,086016	10,885608	0,075264	10,099907	0,064512	9,314206
126	0,173184	17,3444	0,129888	14,1583	0,086592	10,9722	0,075768	10,175675	0,064944	9,37915
127	0,174336	17,518736	0,130752	14,289052	0,087168	11,059368	0,076272	10,251947	0,065376	9,444526
128	0,175488	17,694224	0,131616	14,420668	0,087744	11,147112	0,076776	10,328723	0,065808	9,510334
129	0,17664	17,870864	0,13248	14,553148	0,08832	11,235432	0,07728	10,406003	0,06624	9,576574
130	0,177792	18,048656	0,133344	14,686492	0,088896	11,324328	0,077784	10,483787	0,066672	9,643246
131	0,178944	18,2276	0,134208	14,8207	0,089472	11,4138	0,078288	10,562075	0,067104	9,71035
132	0,180096	18,407696	0,135072	14,955772	0,090048	11,503848	0,078792	10,640867	0,067536	9,777886
133	0,181248	18,588944	0,135936	15,091708	0,090624	11,594472	0,079296	10,720163	0,067968	9,845854
134	0,1824	18,771344	0,1368	15,228508	0,0912	11,685672	0,0798	10,799963	0,0684	9,914254
135	0,183552	18,954896	0,137664	15,366172	0,091776	11,777448	0,080304	10,880267	0,068832	9,983086
168	0,221568	25,658384	0,166176	20,393788	0,110784	15,129192	0,096936	13,813043	0,083088	12,496894
169	0,22272	25,881104	0,16704	20,560828	0,11136	15,240552	0,09744	13,910483	0,08352	12,580414
170	0,223872	26,104976	0,167904	20,728732	0,111936	15,352488	0,097944	14,008427	0,083952	12,664366
171	0,225024	26,33	0,168768	20,8975	0,112512	15,465	0,098448	14,106875	0,084384	12,74875
172	0,226176	26,556176	0,169632	21,067132	0,113088	15,578088	0,098952	14,205827	0,084816	12,833566
173	0,227328	26,783504	0,170496	21,237628	0,113664	15,691752	0,099456	14,305283	0,085248	12,918814
174	0,22848	27,011984	0,17136	21,408988	0,11424	15,805992	0,09996	14,405243	0,08568	13,004494
175	0,229632	27,241616	0,172224	21,581212	0,114816	15,920808	0,100464	14,505707	0,086112	13,090606
176	0,230784	27,4724	0,173088	21,7543	0,115392	16,0362	0,100968	14,606675	0,086544	13,17715
177	0,231936	27,704336	0,173952	21,928252	0,115968	16,152168	0,101472	14,708147	0,086976	13,264126
178	0,233088	27,937424	0,174816	22,103068	0,116544	16,268712	0,101976	14,810123	0,087408	13,351534
179	0,23424	28,171664	0,17568	22,278748	0,11712	16,385832	0,10248	14,912603	0,08784	13,439374
180	0,235392	28,407056	0,176544	22,455292	0,117696	16,503528	0,102984	15,015587	0,088272	13,527646
181	0,236544	28,6436	0,177408	22,6327	0,118272	16,6218	0,103488	15,119075	0,088704	13,61635
182	0,237696	28,881296	0,178272	22,810972	0,118848	16,740648	0,103992	15,223067	0,089136	13,705486
183	0,238848	29,120144	0,179136	22,990108	0,119424	16,860072	0,104496	15,327563	0,089568	13,795054
184	0,24	29,360144	0,18	23,170108	0,12	16,980072	0,105	15,432563	0,09	13,885054
185	0,241152	29,601296	0,180864	23,350972	0,120576	17,100648	0,105504	15,538067	0,090432	13,975486
186	0,242304	29,8436	0,181728	23,5327	0,121152	17,2218	0,106008	15,644075	0,090864	14,06635
187	0,243456	30,087056	0,182592	23,715292	0,121728	17,343528	0,106512	15,750587	0,091296	14,157646
188	0,244608	30,331664	0,183456	23,898748	0,122304	17,465832	0,107016	15,857603	0,091728	14,249374
189	0,24576	30,577424	0,18432	24,083068	0,12288	17,588712	0,10752	15,965123	0,09216	14,341534
190	0,246912	30,824336	0,185184	24,268252	0,123456	17,712168	0,108024	16,073147	0,092592	14,434126
191	0,248064	31,0724	0,186048	24,4543	0,124032	17,8362	0,108528	16,181675	0,093024	14,52715
192	0,249216	31,321616	0,186912	24,641212	0,124608	17,960808	0,109032	16,290707	0,093456	14,620606
193	0,250368	31,571984	0,187776	24,828988	0,125184	18,085992	0,109536	16,400243	0,093888	14,714494
194	0,25152	31,823504	0,18864	25,017628	0,12576	18,211752	0,11004	16,510283	0,09432	14,808814
195	0,252672	32,076176	0,189504	25,207132	0,126336	18,338088	0,110544	16,620827	0,094752	14,903566
196	0,253824	32,33	0,190368	25,3975	0,126912	18,465	0,111048	16,731875	0,095184	14,99875
197	0,254976	32,584976	0,191232	25,588732	0,127488	18,592488	0,111552	16,843427	0,095616	15,094366
198	0,256128	32,841104	0,192096	25,780828	0,128064	18,720552	0,112056	16,955483	0,096048	15,190414
199	0,25728	33,098384	0,19296	25,973788	0,12864	18,849192	0,11256	17,068043	0,09648	15,286894
200	0,258432	33,356816	0,193824	26,167612	0,129216	18,978408	0,113064	17,181107	0,096912	15,383806

Anexos

1. Mantenimientos correctivos 2019 a los sistemas de aire acondicionado para el edificio G19 – Laboratorio de Biotecnología

Ubicación: 158 G19 BIOENERGIA A G19 25
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- CONTROL DE PARED

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Mano de obra y materiales		
		Total	€73.450

Ubicación: 160 G19 LAB BIOLOGIA SINTETICA G19 21
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- CONTROL DE PARED

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Mano de obra y materiales		
		Total	€73.450

Ubicación: 165 G19 CUBICULO A G19 26
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- REPARACION DE TARJETA INVERTER

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Mano de obra y materiales		
		Total	€90.400

Ubicación: 166 G19 CUBICULO B G19 20
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- Reparación de tarjeta ELECTRONICA

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Materiales y mano de obra		
		Total	€90.400

Ubicación: 172 G19 CTO CREC VEGE INVITRO G19 09
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- FILTRO DE AIRE PELO DE CHANCHO

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Materiales mano de obra		
		Total	€89.100

Ubicación: 174 G19 CTO CREC VEGE INVITRO G19 05
Asunto: REPARACION DE AIRE ACONDICIONADO

En este documento exponemos detalles de procedimiento Posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- FILTRO DE AIRE PELO DE CHANCHO

Costos generales:

Cant	Descripción	Unidad	Valor
1	Materiales y mano de obra		
		Total	€89.100

Ubicación:G19 SALA DE CONFERENCIA 18

Asunto: KIT DE ARRANQUE Y CONTACTOR

En este documento exponemos detalles de procedimiento posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- CAMBIO DE KIT DE ARRANQUE (2 CAPACITORE)
- CAMBIO DE CONTACTOR DEL COMPRESOR
-

Costos generales: (YA SE REALIZO)

Cant	Descripción	Unidad	Valor
	Mano de obra y materiales		
		Total	₡ 76.700

Ubicación:G19 LAB. BIOLOGIA SINTETICA 21

Asunto: CONTROL DE TEMPERATURA

En este documento exponemos detalles de procedimiento posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- CAMBIO CONTROL DE TEMPERATURA DE PARED

PROGRAMABLE Costos generales: (YA SE REALIZO)

Cant	Descripción	Unidad	Valor
	Mano de obra y materiales		
		Total	₡ 65000

Ubicación:G19 LAB.TRANSFORMACION VEG 07

Asunto: CONTROL DE TEMPERATURA

En este documento exponemos detalles de procedimiento posterior a mantenimiento se identifica los siguientes puntos

- CAMBIO DECONTROL TEMPERATURA DE PARED PROGRAMABLE

Costos generales: (YA SE REALIZO)

Cant	Descripción	Unidad	Valor
	Mano de obra y materiales		
		Total	₡ 65.000

2. Reportes de mantenimientos correctivos realizados en el 2020



Nº 37929

REPORTE DE MANTENIMIENTO

Fecha:	25/9/2020	Refrigerante:	R134A
Cliente:	TIC Cartago	Fases:	1 FASE
Contacto:	Carlos Pérez	Amperaje:	12.4 A
Ubicación de equipo:	C170 Servidores	Voltaje:	220V
Tipo de equipo:	Central	Presión alta:	140 PSI
Capacidad:	10.000 BTU	Presión baja:	110 PSI
Código:		Temperatura suministro:	
MARCA:	Whisper House	Temperatura retorno:	
TÉCNICOS:	José Miguel	Tiempo preventivo:	1 hora
	Gabriel Pérez	Tiempo correctivo:	
	Pablo Rivera	O.T.	

Modelo condensador:	YCS170S4152A	Serie:	12259
Modelo evaporador:	AAC10014871B	Serie:	771583
Limpieza general del equipo:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación funcionamiento compresores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de difusores y rejillas:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado ventiladores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Detección y corrección de ruidos anormales	<input type="checkbox"/>	Verificación cables eléctricos y terminales:	<input type="checkbox"/>
Reparación fugas en ductos:	<input type="checkbox"/>	Verificación operación contactores y relés:	<input type="checkbox"/>
Revisión de anclajes:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación presostatos:	<input type="checkbox"/>
Verificación operación evaporador:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación filtro secador:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación operación termostato:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación resistencia carter:	<input type="checkbox"/>
Verificación temperaturas succión y descarga:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación térmico compresor:	<input type="checkbox"/>
Verificación nivel de refrigerante:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado tubería de refrigeración:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación funcionamiento motores:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación nivel de aceite:	<input type="checkbox"/>

OBSERVACIONES:	Mantenimiento Preventivo
	Operar con precaución
	* Se recomienda una instalación de una brida auxiliar y la instalación de un soporte
	también brida
	59" X 26" X 1"
	una "T"
	dos codos 90
	tres metros de tubo
	1 Adaptor Macho
	1 Adaptor Hembra
	Tubo en 1/4"

RECIBIDO:

13563 37851-08500

TIC
NOMBRE

FIRMA



Nº 37918

REPORTE DE MANTENIMIENTO

Fecha:	24/9/2020	Refrigerante:	R410A
Cliete:	TEC Cartago	Fases:	2 PH
Contacto:	Carlos Perez	Amperaje:	12
Ubicación de equipo:	617-20	Voltaje:	220/110 V
Tipo de equipo:	Central	Presión alta:	32.0 psi
Capacidad:	40.000 BTU	Presión baja:	11.2 psi
Código:		Temperatura suministro:	56
MARCA:	Whisper House	Temperatura retorno:	73
TÉCNICOS:	Gabriel Brenes	Tiempo preventivo:	1 hora
	José Pliguel	Tiempo correctivo:	
	Pablo Rivera	O.T.	

Modelo condensador:	11-V	Serie:	11-V
Modelo evaporador:	B6BMM1048K-B	Serie:	202329
Limpieza general del equipo:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación funcionamiento compresores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de difusores y rejillas:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado ventiladores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Detección y corrección de ruidos anormales	<input type="checkbox"/>	Verificación cables eléctricos y terminales:	<input checked="" type="checkbox"/>
Reparación fugas en ductos:	<input type="checkbox"/>	Verificación operación contactores y reles:	<input type="checkbox"/>
Revisión de anclajes:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación presostatos:	<input type="checkbox"/>
Verificación operación evaporador:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación filtro secador:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación operación termostato:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación resistencia carter:	<input type="checkbox"/>
Verificación temperaturas succión y descarga:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación térmico compresor:	<input type="checkbox"/>
Verificación nivel de refrigerante:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado tubería de refrigeración:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación funcionamiento motores:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación nivel de aceite:	<input type="checkbox"/>

OBSERVACIONES: Mantenimiento Preventivo
 Opera con Normalidad
 * Termostato Dañado programable 1 Etapa
 Marca Lux pro

RECIBIDO:

CPS
 NOMBRE

FIRMA

13/503 37851-38500



Nº 37911

REPORTE DE MANTENIMIENTO

Fecha:	24/9/2020	Refrigerante:	R410A
Cliete:	TEC. Cartago	Fases:	1P/1
Contacto:	Cuevas Peres	Amperaje:	10.5
Ubicación de equipo:	619-21	Voltaje:	203/600V
Tipo de equipo:	Central	Presión alta:	322 psi
Capacidad:	24.000 BTU	Presión baja:	110 psi
Código:		Temperatura suministro:	18°C
MARCA:	Whisper Home	Temperatura retorno:	27°C
TÉCNICOS:	José Miguel	Tiempo preventivo:	1 hora
	Pablo Ruzin	Tiempo correctivo:	
	Gabriel Brenes	O.T.	

Modelo condensador:	D5411D-024K11	Serie:	201180
Modelo evaporador:	GR5BM1-X24K-13	Serie:	801802
Limpieza general del equipo:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación funcionamiento compresores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de difusores y rejillas:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado ventiladores:	<input checked="" type="checkbox"/>
Detección y corrección de ruidos anormales:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación cables eléctricos y terminales:	<input checked="" type="checkbox"/>
Reparación fugas en ductos:	<input type="checkbox"/>	Verificación operación contactores y reles:	<input type="checkbox"/>
Revisión de anclajes:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación presostatos:	<input type="checkbox"/>
Verificación operación evaporador:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación filtro secador:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación operación termostato:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación resistencia carter:	<input type="checkbox"/>
Verificación temperaturas succión y descarga:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación operación térmico compresor:	<input type="checkbox"/>
Verificación nivel de refrigerante:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación estado tubería de refrigeración:	<input checked="" type="checkbox"/>
Verificación funcionamiento motores:	<input checked="" type="checkbox"/>	Verificación nivel de aceite:	<input type="checkbox"/>

OBSERVACIONES: Mantenimiento preventivo
 Operar con normalidad
 * Bandeja desbordada

RECIBIDO:

CPS
 NOMBRE

[Firma]
 FIRMA

Correctivo



Nº 38164

REPORTE DE MANTENIMIENTO

Fecha:	21/10/2020	Refrigerante:	R410A
Cliente:	FIC Cortago	Fases:	3
Contacto:	Carlos Perez	Amperaje:	2
Ubicación de equipo:	Industria	Voltaje:	220V
Tipo de equipo:	M. A. 1/2	Presión alta:	—
Capacidad:	10.000 BTU	Presión baja:	1.000
Código:		Temperatura suministro:	7°C
MARCA:	Wintbase	Temperatura retorno:	7°C
TÉCNICOS:	Rubén Beroa	Tiempo preventivo:	
	Matias Lopez	Tiempo correctivo:	2 horas
	Tomas Aguirre	O.T.	M12345

Modelo condensador:	12-11-12541	Serie:	1234
Modelo evaporador:		Serie:	
Limpieza general del equipo:		Verificación funcionamiento compresores:	
Limpieza de difusores y rejillas:		Verificación estado ventiladores:	
Detección y corrección de ruidos anormales		Verificación cables eléctricos y terminales:	
Reparación fugas en ductos:		Verificación operación contactores y reles:	
Revisión de anclajes:		Verificación operación presostatos:	
Verificación operación evaporador:		Verificación filtro secador:	
Verificación operación termostato:		Verificación operación resistencia carter:	
Verificación temperaturas succión y descarga:		Verificación operación térmico compresor:	
Verificación nivel de refrigerante:		Verificación estado tubería de refrigeración:	
Verificación funcionamiento motores:		Verificación nivel de aceite:	

OBSERVACIONES:

Depositos y manchas de aceite en el evaporador y condensador, nivel de aceite adecuado.

Cubierta B. Buen funcionamiento.

RECIBIDO:

NOMBRE

FIRMA

3. Estimación de pérdidas económicas en laboratorios



Ana Laura Aguero Hernandez
para mí ▾

lun, 16 nov 12:16 ☆ ↶ ⋮

Buenas tardes, Jeremy:

Perdón, que no le haya contestado, pero entre tantos correos no lo había visto.

La verdad es difícil darle un monto, ya que se tiene en el Cuarto Frio 4°C una gran cantidad de reactivos bastante caros, y muestras de investigación, pero no puedo darle un monto estimado, solo que, si se dañara, sería una pérdida de miles de dólares.

En los cuartos de crecimiento, sería la pérdida de material tanto de investigación como de ventas de servicio, pero es difícil de estimar, ya que representaría atrasos en los objetivos de los proyectos, entregas de productos, pérdidas de materiales vegetales de importancia, pero no tiene un precio establecido.

En resumen, son costos que no son posibles de calcular, no le puedo dar un monto, es muy diferente a hacer cálculos de repuestos, accesorios, etc que ustedes pueden calcular, pero sí que ocasionaría la pérdida de muestras, materiales, reactivos, atrasos en proyectos de investigación, en ventas de servicios, todo representaría miles de dólares, incluso muchas veces imposibles de recuperar.

Saludos

Ana Laura Agüero Hernández
Centro de Investigación en Biotecnología
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Teléfono: 2550-9407

4. Salarios establecidos por parte del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social

Peinadora	TOC	¢	11.761,76
Peluquero / Estilista Canino	TOSG	¢	11.549,15
Peón Agrícola	TONC	¢	10.620,62
Peón de Bodegas Frías	TOC	¢	11.761,76
Peón de Camión Distribuidor	TONC	¢	10.620,62
Peón de Carga y Descarga	TONC	¢	10.620,62
Peón de Construcción	TONC	¢	10.620,62
Peón de Jardín	TONC	¢	10.620,62
Peón en General	TONC	¢	10.620,62
Periodista *	Lic.	¢	680.565,53
Periodista *	Bach	¢	567.772,50
Pilero (Lavador de Platos)	TONC	¢	10.620,62
Pintor Automotriz	TOE	¢	13.872,70
Pintor de Brocha Gorda	TOC	¢	11.761,76
Pistero	TOSG	¢	11.549,15
Pizzero (Cocina Pizzas Preparadas)	TOSG	¢	11.549,15
Portero *	TONCG	¢	316.964,69
Prensista de Artes Gráficas	TOE	¢	13.872,70
Preparador documentos, Ag. Aduana	TOE	¢	13.872,70
Programador de Computación	TOE	¢	13.872,70
Programador en Radioemisoras	TOE	¢	13.872,70
Provedor *	TOCG	¢	358.468,86
Quemador de Marcos (Serigrafía)	TOC	¢	11.761,76
Quemador de Planchas	TOE	¢	13.872,70
Recamarera	TONC	¢	10.620,62
Recepcionista *	TOSCG	¢	341.004,39
Receptor de docu, Ag. Aduana	TOE	¢	13.872,70
Recolectores de Café Cajuela	TOE	¢	1.011,22
Recolectores de Coyoil	TONC	¢	10.620,62
Relojero	TOC	¢	11.761,76
Repartidor de Cargas Livianas	TONC	¢	10.620,62
Repartidor-Propagandista	TONC	¢	10.620,62
Repuestero	TOC	¢	11.761,76
Satanero	TONC	¢	10.620,62
Salonero	TONC	¢	10.620,62
Sastre (Prendas a la Medida)	TOE	¢	13.872,70
Secretaria *	TOCG	¢	358.468,86
Secretaria*	TMED	¢	375.649,82
Secretaria*	DES	¢	500.000,15
Secretaria*	Bach	¢	567.118,50
Secretaria*	Lic.	¢	680.565,53
Sellista (Artes Gráficas)	TOC	¢	11.761,76
Servicio Doméstico *	TOE	¢	199.760,73
Soldador (Soldaduras Especiales)	TOE	¢	13.872,70
Soldador en General	TOC	¢	11.761,76
Tapicero	TOC	¢	11.761,76
Tatuador	TOC	¢	11.761,76
Taxista	TOC	¢	11.761,76
Técnico de Educación Superior *	TEdS	¢	462.947,09
Técnico en Aire Acondicionado	TOC	¢	11.761,76
Técnico en Aparatos Ortopédicos	TES	¢	21.529,01
Técnico en Lentes de Contacto	TES	¢	21.529,01
Téc. Refrigeración Doméstica-Indus.	TES	¢	21.529,01
Técnico en Registros Médicos *	TOCG	¢	358.468,86
Técnico Máq. Coser Ind. Especiales	TES	¢	21.529,01
Técnico Medio Educ. Diversificada *	TMED	¢	375.649,82
Técnico Reparación Audio y Video	TES	¢	21.529,01
Técnicos en Salud *	TEdS	¢	462.947,09

Tejedora Manual de Prendas, Muebles	TOC	¢	11.761,76
Telefonista *	TOSCG	¢	341.004,39
Tornero en Madera	TOC	¢	11.761,76
Tornero en Metal	TOE	¢	13.872,70
Tractorista (Oruga o Llanta)	TOC	¢	11.761,76
Tramitador - Abridor Aduanal	TOSG	¢	11.549,15
Vagonetero	TOC	¢	11.761,76
Verdulero	TOSG	¢	11.549,15
Zapatero	TOC	¢	11.761,76

Estos salarios contienen un incremento del **2.53 %** para todas las categorías del Decreto en relación con los salarios mínimos del periodo anterior excepto para el servicio doméstico ya que se otorgó un **2.33962%** adicional al monto general aplicado luego del primer aumento.

Para efectos de los Salarios Mínimos el instrumento para la clasificación de ocupaciones son los Perfiles Ocupacionales aprobados por el Consejo Nacional de Salarios. De conformidad con ellos se ha elaborado esta **guía ilustrativa** que contiene algunas ocupaciones clasificadas por Personal Técnico del Departamento de Salarios, en el entendido de que se basan en las tareas típicas conocidas, por lo que un puesto determinado podría tener una clasificación distinta según sus características y responsabilidades específicas.

Para consultas laborales:

llamar gratuitamente:
800 -TRABAJO (800-872-2256)

ó al **CHAT INSTITUCIONAL** por medio de
www.mtss.go.cr

CONSULTAS DE SALARIOS AL CORREO:
consulta.salarios@mtss.go.cr
salario.minimo@mtss.go.cr

Documento gratuito, prohibida su reproducción y venta



DEPARTAMENTO DE SALARIOS

Lista de ocupaciones clasificada por el personal técnico del Departamento

SALARIOS MÍNIMOS SECTOR PRIVADO AÑO 2020

Decreto Nº 42104-MTSS, publicado en el Alcance No.285 de La Gaceta No. 242, del 19 de diciembre del 2019. Rige 1º de enero del 2020.

SIGLAS Y SALARIOS MÍNIMOS

TONC	Trabajador en Ocupación No Calificada	¢10 620,62
TOSG	Trabajador en Ocupación Semicalfificada	¢11 549,15
TOC	Trabajador en Ocupación Calificada	¢13 872,70
TOE	Trabajador en Ocupación Especializada	¢13 872,70
TES	Trabajador de Especialización Superior	¢21 529,01
TONCG	Trabajador en Ocupación No Calificada (Genérico)	¢316 964,69
TOSCG	Trabajador en Ocupación Semicalfificada (Genérico)	¢341 004,39
TOCG	Trabajador en Ocupación Calificada (Genérico)	¢358 468,86
TMED	Técnico Medio en Educación Diversificada	¢375 649,82
TOEG	Trabajador en Ocupación Especializada (Genérico)	¢402 556,51
TEdS	Técnico de Educación Superior	¢462 947,09
DES	Diplomado de Educación Superior	¢500 000,15
Bach.	Bachiller Universitario	¢567 118,50
Lic.	Licenciado Universitario	¢680 565,53

* Salario mensual.

El que no tiene ninguna indicación, está por jornada ordinaria.

Para mayor información y debido a que se han hecho circular algunas listas alteradas, se sugiere consultar personalmente en la Oficina de Salarios, en Barrio Tournon del Edif. Benjamín Núñez 50 metros sureste sobre calle paralela, Edificio Anexo, al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Segundo Piso.

Teléfono: 2256 2221 Fax: 2257 4633.

Esta lista está disponible en: www.mtss.go.cr

5. Precios de equipos para sistemas de monitoreo



ELECTRONICS **Componentes electrónicos**

MICRO JPM ARDUINO EMS

Cesta: (Artículos: 5) **US\$95,65**

INICIO NOSOTROS SERVICIO CORTE LASER PREGUNTAS FRECUENTES HORARIO DE ATENCIÓN CONTÁCTANOS

[Inicio](#) > Cesta de compra

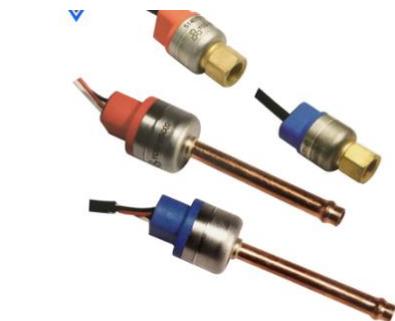
CATEGORÍAS

- CNC - Impresoras - Filamento 3D
- Corte Láser & 3D
- Sparkfun
- Arduino
- Adafruit
- Itead Studio
- Robótica
- Kit's
- Breakout Boards

Cesta de compra

Producto	Cantidad	Precio por unid.	Total
Ribbon Cable - 6 wire (15ft) [CAB-10646]	<input type="text" value="2"/>	US\$5,95	US\$11,90 ✖
WiFi Module - ESP8266	<input type="text" value="1"/>	US\$8,95	US\$8,95 ✖
Arduino Mega 2560 R3 [ORIGINAL ARDUINO.CC]	<input type="text" value="1"/>	US\$47,95	US\$47,95 ✖
DHT22 (AM2302) Digital Temperature And Humidity Sensor	<input type="text" value="1"/>	US\$8,90	US\$8,90 ✖
SCT-013 Non-Invasive AC Current Sensor (0 - 100A)(0 - 50mA)	<input type="text" value="1"/>	US\$17,95	US\$17,95 ✖
Total			US\$95,65

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



[Ver imagen más grande](#)



USD 17,64 - USD 18,58 / Unidad | 10 Unidad/es Para sensor de presión
(Pedido mínimo)

Número de Mod...

 **Garantía comercial** Protege tus pedidos de Alibaba.com

 **Alibaba.com Freight** | [Compare Rates](#) | [Learn more](#)

Pago:    Online Transfer   

Logística de Alibaba.com  Soluciones de inspección

MPX5010DP




[More Images](#)

Images are for reference only
See Product Specifications

[f](#) [t](#) [+](#)

Mouser #: 841-MPX5010DP

Mfr. #: MPX5010DP

Mfr.: [NXP Semiconductors](#)

Customer #:

Description: Board Mount Pressure Sensors PRES SEN INTEG 10KPA

Datasheet: [MPX5010DP Datasheet \(PDF\)](#)

ECAD Model:  [PCB Symbol, Footprint & 3D Model](#)

Download the free [Library Loader](#) to convert this file for your ECAD Tool. [Learn more about ECAD Model.](#)

Compare Product [Add To Project](#) | [Add Notes](#)

Specifications ^

Availability

Stock: 0

On Order: 6,999 Expected 1/25/2021
7,780 Expected 2/5/2021

Factory Lead-Time: 31 Weeks [?](#)

Enter Quantity: Minimum: 1 Multiples: 1 [Buy](#)

Pricing (USD)

Qty.	Unit Price	Ext. Price
1	\$15.99	\$15.99
10	\$11.99	\$119.90
100	\$10.33	\$1,033.00
200	\$10.05	\$2,010.00
500	\$9.55	\$4,775.00
1,000	\$9.16	\$9,160.00
2,000	Quote	

6. Años de vida útil de los equipos según el Ministerio de Hacienda



"Hacienda Pública activa para el desarrollo económico y social"

Contabilidad
Nacional
República de
Costa Rica

ANEXO N.1

Años de vida útil y porcentajes de depreciación

Bien o Actividad	Porcentaje Anual de Depreciación (Método línea recta)	Años de Vida Útil
Abanicos	10	10
Afiladoras	7	15
Agitadoras	10	10
Aire acondicionado (equipo)	10	10
Alarmas	10	10
Alfombras	10	10
Alternadores	10	10
Amplificadores (fotografía y sonido)	10	10
Amasadoras	7	15
Andamiajes (andamios)	10	10
Andariveles	10	10
Antenas y torres	5	20
Aparatos Telefónicos	10	10
Apisonadoras	15	7
Aplanadoras	15	7
Apuntadoras de metal para construcción	10	10
Aguapulpas	5	20
Arados	10	10
Archivadores (todo tipo)	10	10
Arcas pavimentadas, ornamentales, cercas y planchés	5	20
Armas de fuego	5	20
Arrancadores	7	15
Arroceras (Maquinaria y equipo)	7	15
Ascensores	7	15
Aserraderos	7	15
Aspiradoras	10	10
Atomizadores	10	10
Autobuses	15	7
Autoclaves	7	15
Automóviles (uso en empresas)	10	10
Aventadoras	7	15
Aviones	15	7
Motores 6.000 horas		
Hélices 2.000 horas		
Balanzas	10	10
Baldes o cubetas	15	7
Bandas transportadoras	10	10



"Hacienda Pública activa para el desarrollo económico y social"

**Contabilidad
Nacional
República de
Costa Rica**

Bien o Actividad	Porcentaje Anual de Depreciación (Método línea recta)	Años de Vida Útil
Equipo de ingeniería	10	10
Equipo de irrigación:		
Permanente	5	20
Pivote central	7	15
Por gravedad	5	20
Goteo	15	7
Aspersión	10	10
Equipo de laboratorios	10	10
Equipo de lavandería	5	20
Equipo de odontología	10	10
Equipo de oficina y mobiliario	10	10
Equipo de Ordeño	10	10
Equipo de Proyección (cine y sonido)	10	10
Equipo de Proyección y sonido (T.V.)	10	10
Equipo de radio y telefonía	10	10
Equipo de rayos X y fluoroscopia	10	10
Equipo de refrigeración	7	15
Equipo de relojería	10	10
Equipo de sonido	10	10
Equipo de de topografía	10	10
Equipo electrónico especializado	20	5
Equipo fotográfico (electrónico)	20	5
Equipo fotográfico (mecánico)	10	10
Equipo instrumental para profesionales	10	10
Equipo instrumental quirúrgico	10	10
Equipo médico	10	10
Equipo para pesca, excepto embarcaciones	20	5
Equipo y maquinaria (actividades agropecuaria)	10	10
Escaleras	10	10
Escaleras eléctricas	7	15
Escritorios (toda clase)	10	10
Esmeriladores	10	10
Espectrofotómetros	10	10
Estantería	10	10
Estañones	10	10
Estereotipia (talleres)	7	15
Etiquetadoras	7	15
Estufas	10	10
Evaporadoras	7	15
Excavadoras	15	7
Exhibidores	10	10
Extintores	7	15
Extractores de aire	10	10
Extrusoras	10	10



"Hacienda Pública activa para el desarrollo económico y social"

**Contabilidad
Nacional**
República de
Costa Rica

Bien o Actividad	Porcentaje Anual de Depreciación (Método línea recta)	Años de Vida Útil
Fábrica de artículos de madera	7	15
Fábrica de baterías y acumuladores	10	10
Fábrica de bebidas gaseosa y cervezas	7	15
Fábrica de calzado	7	15
Fábrica de cemento	5	20
Fábrica de cigarrillos y productos similares	5	20
Fábrica de embutidos y similares	7	15
Fábrica de hielo	10	10
Fábrica de ladrillo, mosaico, bloque, tubos y otros de origen similar	7	15
Fábrica de licores	5	20
Fábrica de madera laminada	7	15
Fábrica de pilas secas	7	15
Fábrica de productos alimenticios y golosinas	7	15
Fábrica de productos elaborados con metal	7	15
Fábrica de productos de caucho, de hule natural o sintético, recauchadotas y similares	7	15
Fábrica de productos de cuero y piel	7	15
Fábrica de productos derivados de la carne	7	15
Fábrica de productos derivados de harina vegetal	7	15
Fábrica de productos derivados de petróleo o del carbón	10	10
Fábrica de productos elaborados con papel cartón, celofán y similares	7	15
Fábrica de productos enlatados	7	15
Fábrica de productos lácteos	7	15
Fábrica de productos vegetales enlatados	7	15
Fábrica de ropa	10	10
Fábrica de tejidos (toda clase)	10	10
Fábrica de vidrios, lentes, cristalería, losa y similares	7	15
Fábrica de vinos	7	15
Fábrica de extractores o procesadora de aceites vegetales	7	15
Fábrica extractora o procesadora de aceites y otros elementos químicos	7	15
Fajas transportadoras	7	15
Faros	7	15
Fermentadores (tanques)	7	15
Ferrocarriles	5	20
Filtros de todo tipo	10	10
Fotocopiadoras	20	5
Fotografados (talleres)	7	15
Fotografía (equipo electrónico)	20	5
Fotografía (equipo mecánico)	10	10
Frigoríficos (equipos)	7	15
Fresadoras	5	15

7. Tasa social de descuento según el MIDEPLAN

3

Precios Sociales

Área de Inversiones - Unidad de Inversiones Públicas

Valores de los Precios Sociales

TASA SOCIAL DE DESCUENTO	
TSD	8,31
PRECIO SOCIAL DE LA DIVISA Y FACTOR ESTÁNDAR DE CONVERSIÓN	
Divisa	1,0645
FEC	0,9394
MANO DE OBRA	
Calificada Alta	0,947
Calificada Media	0,971
No Calificada	0,94
BIENES TRANSABLES Y NO TRANSABLES	
BTyBNT	VER EXCEL (previsualizar y descargar)

Área de Inversiones
Unidad de Inversiones Públicas
Email: inversionespublicas@mideplan.go.cr
Tel: (506) 2202-8401 / 2202-8629
www.mideplan.go.cr

mideplan