



Desarrollo de una política de RCM para los sistemas de frío alimentario del sector retail

Alberto Eduardo Pérez Macías

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Asesor

Juan David Saldarriaga Loaiza, Magíster en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Pérez Macías, 2022)
Referencia	Pérez Macías, A. (2022). <i>Desarrollo de una política de RCM para los sistemas de frío alimentario del sector retail</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Cohorte XVII.



Centro de Documentación Ingeniería CENDOI

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, a mi familia, a mi novia y futura esposa Geraldine, quienes siempre han estado a mi lado apoyándome día tras día para crecer personal y profesionalmente, porque sin sus consejos y las experiencias que hemos compartido juntos desde el amor que nos une, no sería posible alcanzar este y los demás sueños que he planteado para mi vida y carrera profesional.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por poner en mi camino las personas correctas, situaciones de reto y de crecimiento diariamente para hacer de mí reflejo de su obra maravillosa.

Agradezco a mis padres por ser mi ejemplo en la integridad, el amor, la unión y los deseos de superación personal para ser cada día mejor y ayudar a quien lo necesite.

Agradezco a mi hermana, Natalia, por inspirarme con su tenacidad y disciplina, sus excelentes capacidades profesionales y sobre todo, por su nobleza de corazón.

Agradezco a Geraldine por su amor noble y sincero, por su compañía llena de alegría, locura y ternura, por impulsarme a alcanzar mis sueños sin importar lo que cueste.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1. Antecedentes	12
2. Justificación	16
3. Objetivos.....	18
3.1. Objetivo general	18
3.2. Objetivos específicos.....	18
4. Marco teórico	19
5. Metodología	23
6. Resultados	25
6.1. Definición del SFA.....	25
6.1.1. Sistema de compresión.....	26
6.1.2. Evaporadores	27
6.1.3. Dispositivos de control de flujo de refrigerante (DCFR).....	28
6.1.4. Condensador.....	29
6.1.5. Sistema de tuberías.....	31
6.1.6. Sistema de control	31
6.2. Definición de límites en el SFA	33
6.3. Descripción del sistema.....	35
6.3.1. Descripción funcional / Parámetros clave	36
6.3.1.1. Sistema de compresión	36
6.3.1.2. Evaporadores.....	36

6.3.1.3.	Dispositivos de control de flujo de refrigerante.....	36
6.3.1.4.	Condensador	37
6.3.1.5.	Sistema de tuberías	37
6.3.1.6.	Sistema de control.....	37
6.3.2.	Elementos en redundancia.....	38
6.3.3.	Dispositivos de protección	38
6.3.4.	Elementos claves de control.....	38
6.3.5.	Diagrama funcional de bloques e interfaces de entradas y salidas	38
6.3.6.	Análisis de criticidad de los equipos del SFA.....	40
6.4.	Definición de funciones y fallas funcionales	44
6.5.	Análisis de modos y efectos de falla (FMEA)	46
6.6.	Árbol lógico de decisión	55
6.7.	Selección de actividades de mantenimiento.....	58
6.7.1.	Actividades de mantenimiento preventivo para el SFA.....	64
6.7.2.	Variables de monitoreo	67
6.7.3.	Propuesta de stock de repuestos	69
7.	Discusión.....	71
8.	Conclusiones.....	72
9.	Recomendaciones	74
10.	Referencias	75

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de los evaporadores.....	27
Tabla 2 Estructura para definir interfaces de entradas y salidas del SFA.....	39
Tabla 3 Factores de consecuencia	42
Tabla 4 Probabilidad de ocurrencia.....	42
Tabla 5 Matriz para evaluar criticidad	43
Tabla 6 Criticidad de equipos del SFA tipo	43
Tabla 7 Funciones y fallas funcionales del SFA	45
Tabla 8 Matriz de equipos-fallas funcionales	48
Tabla 9 Análisis de modos y efectos de falla	49
Tabla 10 Resultados del LTA para los modos de falla	57
Tabla 11 Selección de actividades de mantenimiento preventivo.....	61
Tabla 12 Propuesta de plan de mantenimiento para el SFA.	65

Lista de figuras

Figura 1 Fases de la cadena de frío en la industria alimenticia.....	19
Figura 2 Representación de ciclo de refrigeración industrial.....	20
Figura 3 Los 7 Pasos de la metodología RCM.....	22
Figura 4 Representación simplificada del SFA tipo.....	25
Figura 5 Rango de capacidad por tipo de compresor.	26
Figura 6 Sistema de compresión para refrigerante CO2.	27
Figura 7 Exhibidores refrigerados, evaporadores tipo 1.	28
Figura 8 Válvulas de expansión electrónica.....	29
Figura 9 Condensador enfriado por aire, tiro horizontal.	30
Figura 10 Tipos de sistemas de control para los SFA.	32
Figura 11 Diagrama de bloques para el SFA tipo.	34
Figura 12 Diagrama funcional de bloques del SFA.	40
Figura 13 Árbol lógico de decisión para modos de falla.....	56
Figura 14 Hoja de ruta para selección de actividades de mantenimiento preventivo.	59

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
cm	Centímetros
ERIC	Education Resources Information Center
Esp.	Especialista
MP	Magistrado Ponente
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
PhD	Philosophiae Doctor
PBQ-SF	Personality Belief Questionnaire Short Form
PostDoc	PostDoctor
UdeA	Universidad de Antioquia
HSEQI	Health, Security, Environment, Quality & Inocuity
SFA	Sistema de Frío Alimentario
RCM	Reliability Centered Maintenance
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating & Air conditioning Engineers
CMMS	Computerized Maintenance Management System
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
DCFR	Dispositivos de control de flujo de refrigerante

Resumen

En el presente trabajo se realizó un análisis con la metodología RCM en sistemas de frío alimentario (SFA) para empresas del sector retail con el fin de presentar una política de mantenimiento que permita a los mantenedores de SFA tener lineamientos generales para minimizar el impacto de las fallas que se puedan presentar en la operación de estos equipos. Para el desarrollo del análisis, se presentaron los equipos que usualmente componen un SFA en una empresa retail; luego, se establecieron los equipos que mayor impacto generen para la operación de un SFA, a través del análisis de modos y efectos de fallas, planteado en la metodología RCM. De aquí se estableció, con base en las recomendaciones de (ASHRAE, 2018) qué actividades preventivas se pueden planear para mitigar las fallas que se identifiquen en estos equipos críticos y qué variables se pueden monitorear para intentar identificar la existencia de una falla incipiente o potencial, para prevenir la pérdida de la función del equipo o el SFA. La aplicación de una filosofía de mantenimiento exitosa como el RCM y el empalme con las recomendaciones técnicas del Handbook de la más importante asociación en términos de sistemas de refrigeración, permitió llevar los resultados al más avanzado nivel técnico disponible, lo que maximizará los beneficios que se puedan obtener en una futura implementación en un contexto operacional específico.

Palabras clave: RCM, refrigeración, alimentos, retail, Handbook, ASHRAE.

Abstract

In this paper an analysis was performed with the RCM methodology in food cooling systems (SFA) for companies in the retail sector, in order to present a maintenance policy that allows SFA maintainers have general guidelines to minimize the impact of failures that may occur in the operation of this equipment. For the development of the analysis, initially the equipments that usually compose a SFA in a retail company were presented; then, the equipments that generate greater impact for the operation of a SFA were established, through the analysis of failure modes and effects proposed in the RCM methodology. From here it was established, based on the recommendations of (ASHRAE, 2018) which preventive activities can be planned to mitigate the failures that are identified in these critical equipment and which variables can be monitored to try to identify the existence of an incipient or potential failure, to prevent the loss of the function of the equipment or the SFA. The application of a successful maintenance philosophy as the RCM and splicing with the technical recommendations of the Handbook of the most important association in terms of refrigeration systems, allowed to bring the results to the most advanced technical level available, which will maximize the benefits that can be obtained in a future implementation in a specific operational context.

Keywords: RCM, HVAC&R, food, retail, Handbook, ASHRAE.

Introducción

La idea de este documento surgió durante el desarrollo de actividades del autor como líder del departamento de mantenimiento de una empresa frigorista, la cual era contratista de una cadena retailer en Colombia para el mantenimiento de los sistemas de frío alimentario (SFA) de sus tiendas a nivel nacional. En el alcance de este contrato se especificaba que el contratista debía realizar mensualmente el mantenimiento preventivo de los equipos de los SFA, así como la atención de los correctivos y emergencias que estos requirieran, incluyendo el suministro de gas refrigerante, aceites y demás insumos necesarios para garantizar la operación continua de los SFA.

Debido al avanzado estado de deterioro de los equipos de los SFA, producto de varios años sin las prácticas adecuadas para el mantenimiento de estos, se presentaban muchos requerimientos del área de HSEI (Health, Security, Environment, Quality & Inocuity) de la compañía retailer (y de los entes de control gubernamentales) por rangos de temperatura inadecuados en los exhibidores y cuartos fríos que almacenan los productos alimenticios que estos almacenes distribuyen. La confiabilidad de los equipos era muy baja ya que se presentaban fallas de diferentes tipos, con una frecuencia muy alta; en algunos puntos de venta se tenían fallas generalizadas en el SFA, lo que provocaba mermas de productos significativas por el tiempo que estos se exponían a temperaturas muy altas para la conservación de su inocuidad.

A pesar de seguir al pie de la letra el plan de mantenimiento propuesto por el área de mantenimiento del cliente, después de un tiempo las fallas en los equipos de los SFA seguían ocurriendo con frecuencia sin que se pudiesen predecir de manera confiable. Por lo anterior, surge la necesidad de validar si las actividades estipuladas en el plan de mantenimiento de estos SFA se alinean con recomendaciones técnicas de entidades expertas y reconocidas en este tipo de sistemas. Si bien las tareas son coherentes con las buenas prácticas en la operación y mantenimiento de estos equipos, se identificó que no estaban estructuradas correctamente dentro del plan de mantenimiento estipulado porque, por ejemplo, se omitían otras de mayor relevancia y se sobrevaloraba otras tareas cuyo impacto no resulta tan trascendental para evitar fallas en el sistema. De aquí que la implementación de un análisis RCM, metodología de mantenimiento con excelentes resultados a lo largo de los años en diferentes industrias a nivel mundial, resulte muy interesante para este fin.

1. Planteamiento del problema

Debido a la baja confiabilidad del sistema de frío alimentario, la ineficiencia del plan de mantenimiento implementado y la necesidad de resguardar mejor los alimentos perecederos que allí se almacenan, se identifica la necesidad de establecer un conjunto de actividades de mantenimiento, coordinadas y conscientes, para los diferentes equipos de los SFA que garantice la disminución efectiva de la frecuencia de ocurrencia de los diferentes modos de falla y, como consecuencia, permita obtener una mayor confiabilidad de los sistemas, temperaturas estables y en los rangos establecidos por las políticas de HSEQI para conservación de los diferentes productos alimenticios que se distribuyen en estos almacenes de cadena bajo la modalidad retail.

Se busca que estas actividades estén alineadas con los manuales y recomendaciones técnicas de las asociaciones o autores que desarrollan los estándares de operación que rigen para los equipos de refrigeración a nivel mundial. Se debe también establecer el uso de una metodología de mantenimiento cuya eficacia sea reconocida dentro de esta disciplina de la ingeniería, como el análisis propuesto en la metodología RCM (Smith & Hinchcliffe, 2004); esta permitirá estructurar una política de mantenimiento que pueda mejorar eficazmente los indicadores de mantenimiento de los SFA a los que se aplique en un futuro (Disponibilidad, confiabilidad, etc.). En futuros trabajos se puede desarrollar la metodología para un sistema específico e implementar el resultado del ejercicio del análisis RCM para evaluar cuantitativamente los resultados obtenidos en el presente.

1.1. Antecedentes

Se han realizado estudios de metodologías o planes de mantenimiento para SFA en sectores variados, incluyendo el retail. En Viña del Mar, Chile, (Codoceo Álvarez & Gallardo Romo, 2017) realizaron un plan de mantenimiento para el compresor de un frigorífico en una exportadora de frutas frescas, el cual fue definido como el equipo crítico del sistema analizado. El plan presentado contempla actividades para atender una posible emergencia en el compresor del pre-frío del frigorífico si el tercero encargado de esto no podía cumplir con este requerimiento. Con esto se evidencia, primero, que el plan está centrado en corregir una posible falla en un equipo específico de la línea. Segundo, durante la temporada de producción (diciembre a marzo), dentro de las

actividades se contempla relleno o recarga semanal de aceite, sin tener en cuenta si el nivel del lubricante es el adecuado o no, es decir, el sistema puede estar conviviendo con fugas de refrigerante y/o aceite que no han sido identificadas ni corregidas, situación que luego desencadenará en la ocurrencia de fallas inesperadas que involucrarán todos los espacios refrigerados conectados al sistema en cuestión.

También en Chile, en el mismo año, se desarrolló un análisis de RCM para los equipos de un frigorífico que almacena y distribuye pescados y mariscos congelados a nivel internacional (Concha Vega & Oyarce Quiroga, 2017). El análisis determinó que el SFA era el equipo más crítico para la operación del frigorífico debido a que una falla total de este puede ocasionar la merma de toda la producción por la pérdida de propiedades organolépticas de los mariscos y pescados debido a la exposición a temperaturas elevadas. Sin embargo, el plan de mantenimiento desarrollado se centró únicamente en el equipo crítico, el compresor, determinado por el desarrollo del análisis de los modos de falla, efectos y consecuencias procesados en el diagrama de decisiones de RCM. Como en el caso anterior, la solución está centrada en un equipo que hace parte del sistema de refrigeración y no se abarcan las posibles fallas del resto de equipos que lo componen.

En 2018 se realizó un estudio de mejora del plan de mantenimiento de los equipos frigoríficos de una cadena de supermercados en Chile, la cual delega a un externo los servicios de mantenimiento para su SFA. El autor desglosa en la obra las diferentes falencias que encuentra en el plan de mantenimiento estipulado para el SFA, propone plantillas para los documentos de control de las actividades de mantenimiento, un cronograma de mantenimientos preventivos para los diferentes equipos del sistema y un stock de repuestos críticos (Herrera Olguín, 2018). En este trabajo se logra una cobertura más amplia de los equipos que componen el SFA, aunque los controles estipulados son meramente cualitativos y no plantean parámetros y variables de seguimiento para monitorear cuantitativamente la operación del sistema.

Para aterrizar en el ámbito colombiano, una propuesta de plan de mantenimiento para los equipos de refrigeración de un laboratorio de virología establece el uso de técnicas de monitoreo para predecir fallas incipientes o evidentes en los equipos de refrigeración (Cortés Urrego & Valbuena Rojas, 2020). Se plantea monitorear la presión del refrigerante a través de un ordenador, para generar una alerta cuando la medición esté por fuera de los valores mínimo y máximo establecidos. También, se propone a través de termografía evidenciar fugas de aire frío en los equipos, sobrecalentamiento del compresor o disfunciones en los intercambiadores de calor para

intervenir los equipos antes de su falla funcional. Por último, el uso de un detector de fugas por ultrasonido activo que permita evidenciar pequeñas fugas de refrigerante en los equipos.

En los estudios descritos anteriormente se puede evidenciar que los resultados obtenidos no fueron guiados o referenciados respecto a estándares establecidos para el manejo de sistemas de refrigeración, por ejemplo, en la descripción de las actividades de mantenimiento propuestas para los equipos. En este sentido, existen varias organizaciones a nivel mundial que han estandarizado procedimientos recomendados para la operación de los sistemas de refrigeración y sus componentes principales. Una de estas es la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés: “American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”) que en su Manual de Refrigeración contiene amplias actualizaciones que cubren estadísticas del sector Retail, prácticas utilizadas en la operación, regulaciones de refrigerantes y nuevos tipos de equipos para el sector (ASHRAE, 2018). Además, mientras expone los más importantes datos técnicos para cada tipo de equipo utilizado en los SFA de los retailers acota lineamientos para la correcta operación de los equipos y rutinas de mantenimiento eficaces, garantizando un óptimo rendimiento de los equipos y mayor eficiencia energética.

Entre las recomendaciones que más se replican para cualquier sistema de refrigeración se encuentra el garantizar un libre flujo de aire a través de los intercambiadores de calor del sistema (condensadores y evaporadores) con una rutina de limpieza periódica que pueda eliminar cualquier elemento extraño que se pueda alojar en estos e impida alcanzar el caudal de aire requerido (ACCA, 2021). Conservar las condiciones operativas de los equipos, según lo estipulado por los fabricantes de los equipos y diseñadores del sistema, también resulta ser una práctica útil a la hora de operar y mantener SFA longevos, ya que puede permitirnos tener el rendimiento esperado del sistema y con este evaluar las prestaciones actuales del equipo o sistema, para definir un nivel de conservación de la capacidad frigorífica real que se tiene en el SFA.

Otro punto importante que tener bajo control es el impacto ambiental de las operaciones de un SFA, el cual se ve sensiblemente afectado por la presencia de fugas de refrigerante en uno o más equipos del SFA. Esta problemática es muy común en la industria de la refrigeración en general a pesar de las regulaciones implementadas por diferentes organismos a nivel mundial; el impacto ambiental producido por la emisión de agentes refrigerantes al medio ambiente es bastante significativo y se podrá evaluar, ya sea por el potencial de calentamiento global y/o de agotamiento

de la capa de ozono, según el tipo de refrigerante que se escape. Además, las afectaciones a la seguridad de los productos alimenticios almacenados en espacios refrigerados por SFA implican una afectación importante desde el punto de vista económico, ya que si los productos no se conservan en las condiciones adecuadas estos perderán sus propiedades organolépticas y deberán ser sacados de exhibición y catalogados como merma, costo que deberá asumir el retailer.

En la bibliografía consultada es común encontrar el uso de la metodología RCM como guía para alcanzar las actividades requeridas para el plan de mantenimiento del SFA; no obstante, en los resultados sólo proponen actividades periódicas para el sistema, o en su defecto se analiza un solo equipo. Uno de los principales aportes del presente trabajo radica en incluir las recomendaciones técnicas de la ASHRAE, en su Handbook de refrigeración, a la hora de seleccionar las actividades que se especificarán para el programa de mantenimiento, garantizando su pertinencia y oportunidad para la mitigación de las consecuencias de las fallas.

Adicionalmente, el monitoreo de variables para detectar una falla que no es evidente o que genera ineficiencias que pueden repercutir en todo el SFA aumenta significativamente su confiabilidad y mantenibilidad, abriendo la puerta a la posibilidad de ahorros importantes por la mejora en la eficiencia energética y la disminución de la merma de productos.

2. Justificación

En el mercado del retail los sistemas frigoríficos utilizados para la conservación de los alimentos que estos almacenes distribuyen, tanto refrigerados como congelados, juegan un papel trascendental en la estrategia de ventas, competitividad y rentabilidad de las empresas de este sector, ya que almacenan productos de primera necesidad para el consumidor y resulta fundamental procurar por su conservación e inocuidad. El desempeño y disponibilidad de estos equipos tiene un alto impacto en el desarrollo de las operaciones de estos almacenes y, por lo tanto, en los costos directos e indirectos de operación que se ven representados en reprocesos en el surtido de mercancía, merma de productos por pérdida de cadena de frío, entre otros.

Comúnmente, las políticas de mantenimiento de los sistemas frigoríficos en las empresas retail de Colombia se ve limitada a un plan de mantenimiento preventivo periódico basado solamente en la limpieza y aseo de los equipos, lo cual tiene un impacto limitado en la disminución efectiva de fallas repetitivas y, por ende, se presentan frecuentes actividades correctivas no programadas que redundan en afectaciones a la operación del almacén. Adicionalmente, la renovación de los equipos se realiza, en la mayoría de los casos, teniendo en cuenta factores del orden comercial o cuando la disponibilidad de los equipos es sensiblemente baja por períodos muy extensos, lo cual se vuelve insostenible para el almacén en su balance de pérdidas y ganancias.

Partiendo de esa necesidad intrínseca de disponibilidad constante de los equipos del sistema de refrigeración para garantizar la conservación de los productos alimenticios, se evidenció la necesidad de contar con un plan de mantenimiento que brinde al retailer una confiabilidad elevada para minimizar la ocurrencia de fallas en el sistema y evitar los impactos negativos de las fallas repetitivas e imprevistas de un Sistema de Frío Alimentario (SFA) deteriorado. El análisis que se planteó para llegar a este plan permitió identificar claramente las actividades de mantenimiento preventivo que se propone realizar para la prevención efectiva de fallas en el sistema (Smith & Hinchcliffe, 2004) y definir los parámetros de operación del sistema que convendrá controlar para obtener información del funcionamiento y rendimiento de los equipos, y que permita generar una alerta prematura de mantenimiento preventivo basado en condición.

Dentro de las diferentes estrategias de mantenimiento que han resaltado en la historia de esta disciplina de la ingeniería, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés: Reliability Centered Maintenance) es destacado por gran variedad de autores como una

metodología que desde los años 60 ha venido brindando soluciones importantes a diferentes industrias para el desarrollo de planes de mantenimiento exitosos y económicamente rentables (Smith & Hinchcliffe, 2004). Con la aplicación de esta metodología se buscó identificar los equipos que más influyen en las fallas que se presentan en los sistemas típicos de refrigeración comercial del sector retail de grandes superficies, se definieron actividades de mantenimiento específicas para los equipos críticos que permiten minimizar la ocurrencia de las fallas y establecer variables o parámetros que permitan determinar, a través de su monitoreo periódico, los procedimientos de ajuste o corrección que se puedan requerir antes de que se presente una falla crítica.

Dentro de las fallas más frecuentes que se presentan en los sistemas de refrigeración se encuentra la pérdida de refrigerante por fugas en las tuberías, serpentines y demás componentes del sistema. El escape de estos fluidos a la atmósfera ha sido uno de los principales contribuyentes al deterioro medioambiental por la emisión de gases de efecto invernadero y demás contaminantes (ASHRAE, 2018). El impacto ambiental de los fluidos refrigerantes se mide principalmente en dos índices que varían de acuerdo con el tipo de refrigerante, y son: (a) el potencial de degradación de capa de ozono (Ozone Depletion Potential, ODP) y (b) el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP). Cuánto más se disminuya la posibilidad de escape del refrigerante se podrá tener más control y mejores resultados respecto al impacto ambiental de la compañía, los cuales se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS 12 y 13, definidos por (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Los beneficios que se pueden lograr con la implementación de este plan de mantenimiento son muy variados y abarcan desde el aumento de la disponibilidad y confiabilidad del SFA, pasando por la disminución de los costos operacionales del almacén con base en la reducción del gasto de mantenimiento y la reducción de la merma de productos alimenticios por ruptura de la cadena de frío, hasta incluso un posible aumento en las ventas por la posibilidad de generar confianza en los consumidores y aumentar el tiempo y calidad de exhibición de los productos. El plan de mantenimiento propuesto permitirá mitigar los efectos de las posibles fallas del SFA, con la articulación de actividades de mantenimiento aplicables y eficientes con el monitoreo de variables de operación para identificar fallas oportunamente, incluso las que no son evidentes.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Elaborar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM para sistemas de refrigeración en el sector retail

3.2. Objetivos específicos

- Establecer los equipos que generan mayor impacto en la disponibilidad del sistema de refrigeración aplicando la metodología RCM
- Definir las actividades de mantenimiento preventivo para los equipos críticos que componen el sistema de refrigeración de una tienda retail
- Definir las variables de monitoreo que servirán como alertas para una intervención preventiva en el SFA
- Proponer una guía para un stock de repuestos para el retailer en base a los modos de falla que se definan para correr hasta la falla

4. Marco teórico

La refrigeración es un proceso mecánico que permite mover calor de un punto a otro, a través de un fenómeno físico controlado por algunas variables, entre las cuales se ha extendido más ampliamente el control a través de la relación presión-temperatura de un fluido especialmente desarrollado para transferir calor (ceder o recibir) con los ambientes a intervenir con el sistema (Pilatte, 2005). En otras palabras, controlando mecánicamente la presión del fluido refrigerante podemos obtener las temperaturas que se requieran, disminuyendo la presión se obtienen temperaturas cada vez menores; con este cambio de temperatura se puede o no obtener también un cambio de fase en el refrigerante.

En la industria mundial se requiere bajar la temperatura de diferentes espacios y elementos para aplicaciones tan variados como el aire acondicionado, control de variables de procesos, preservación de alimentos en las diferentes fases de la extensa cadena de frío hasta la llegada de los productos a los consumidores finales. Este último uso abarca gran variedad de sectores industriales, que como lo plantean (Loisel et al., 2021) van desde las plantas de producción de alimentos, almacenes industriales, transporte, cuartos fríos de distribución, muebles de exhibición y refrigeración doméstica. En la Figura 1 se muestra una representación gráfica de las fases a través de las cuales pasan los alimentos perecederos que requieren de refrigeración para su conservación.



Figura 1 Fases de la cadena de frío en la industria alimentaria

Nota. Adaptado de Perspectivas de la cadena de frío, por B. Sagredo, 2017 (<https://www.mundohvacr.com.mx/2017/01/perspectivas-la-cadena-del-frio/>)

En principio, cualquier sistema de refrigeración consta de cuatro componentes básicos: evaporador, compresor, condensador y dispositivo de expansión (Kelly, 2003). En la Figura 2 se muestra el ciclo de refrigeración simplificado para identificar la función de cada uno de ellos describiendo el recorrido que realiza el refrigerante en el circuito y las variaciones de estado y presión que sufre en ese proceso.

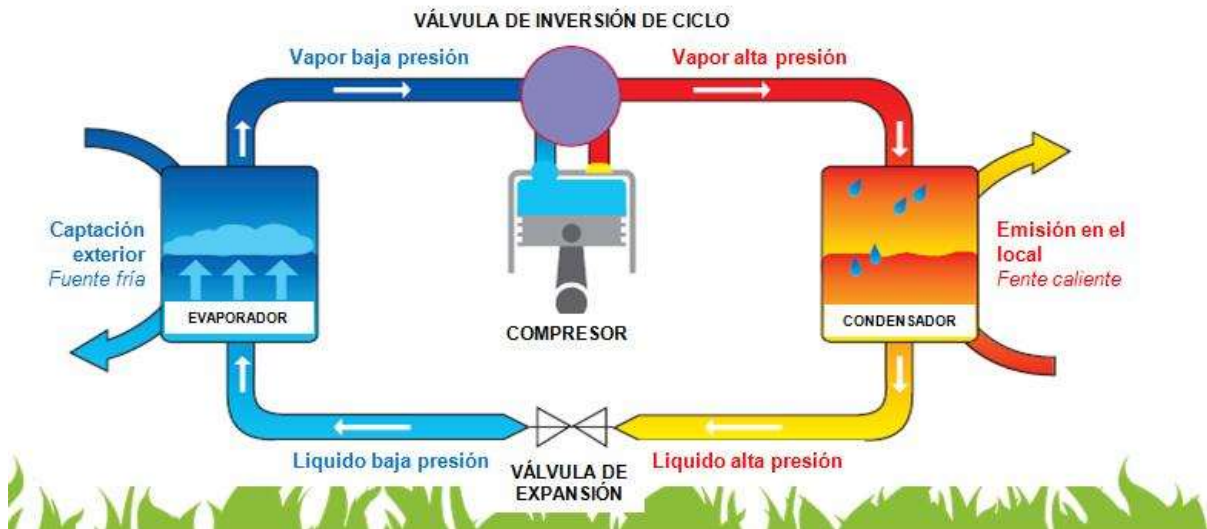


Figura 2 Representación de ciclo de refrigeración industrial.

Nota. Adaptado de El ciclo de refrigeración, por Apctech, 2018 (<http://www.apctech.com/BLOG/uncategorized/el-ciclo-de-refrigeracion/>)

El evaporador contiene refrigerante en tránsito a baja presión (por ende, a baja temperatura) y con capacidad para absorber calor del ambiente o elemento a enfriar; el refrigerante con el calor recibido cambia de estado (líquido a gaseoso). El gas con el calor que transporta llega al compresor, quien aumenta la presión del fluido y, por ende, su temperatura; cuando este gas llega al condensador se le extrae el calor que viene transportando el fluido y, dependiendo del tipo de refrigerante, puede o no cambiar de fase (gaseoso a líquido). Después del condensador se envía el refrigerante con capacidad frigorífica disponible a un dispositivo de expansión que disminuye drásticamente la presión del refrigerante para alcanzar las temperaturas requeridas en el ambiente a refrigerar, regulando el flujo y cerrando así el proceso entrando en el evaporador. En función de la temperatura de punto de rocío del evaporador, en (ASHRAE, 2018) se clasifican los equipos de refrigeración en el retail en dos tipos:

- Media temperatura (MT), en un rango de -7 a 4,5°C
- Baja temperatura (BT), en un rango de -40 a -12°C

A lo largo de la historia, la industria del retail se ha enfrentado con variedad de retos para minimizar las pérdidas de productos que requieren refrigeración o congelación para su preservación. Entre las principales causas que se pueden presentar durante su vida de anaquel en el supermercado pueden destacarse según (Loisel et al., 2021) las fallas en el sistema de refrigeración, configuración de temperatura errada en los equipos o la exposición prolongada a una temperatura ambiente mayor durante las operaciones de recibo, almacenamiento y surtido de muebles exhibidores.

En algunas empresas del sector retail se ha podido identificar que se han puesto en práctica diferentes alternativas de planes de mantenimiento para mitigar los impactos que tienen las fallas de los SFA en la preservación de los productos perecederos en los puntos de venta. Sin embargo, las rutinas estipuladas son generalmente reactivas en función de las solicitudes cambiantes de los diferentes departamentos que se involucran con estos sistemas dentro de las estructuras organizacionales de los retailers (Limpieza, desinfección y rangos de temperatura en lo mínimo posibles). Estas rutinas suelen centrarse en el cumplimiento del compromiso de lavar los equipos del sistema para mantener un nivel de higiene apropiado para la exhibición o almacenamiento de productos, más no en el seguimiento de un plan de mantenimiento que resulte en la disminución efectiva de la frecuencia de ocurrencia de fallas y todo lo que esto implica (Martínez et al., 2021). Extendiendo el concepto a una política de mantenimiento, la cual debe contar con criterios de decisión a la hora de priorizar la atención de los equipos que conforman portafolio de activos del almacén, estrategias para la correcta selección de las actividades de mantenimiento a implementar, gestión de los recursos requeridos para su ejecución y/o plan de reposición de activos, la falencia se hace aún más sustancial para los intereses.

Es aquí donde la metodología RCM puede brindar una mejora sustancial en el mantenimiento y operación del sistema de frío alimentario. Esta filosofía de mantenimiento goza de gran aceptación y éxito en muchas industrias a nivel mundial, entre las cuales destaca la aviación comercial, pionera en introducir el método que caracteriza al RCM (Smith & Hinchcliffe, 2004). La metodología consta de un procedimiento de análisis de sistema de 7 pasos muy bien definidos, con los cuales se busca identificar las actividades de mantenimiento preventivo que se deben

priorizar con el fin de lograr mantener la función del sistema o equipo en cuestión. A continuación, en la Figura 3 se lista cada uno de los pasos de la metodología RCM que garantizan aplicar fielmente los criterios de decisión que respaldan el éxito en tantas industrias a nivel mundial.

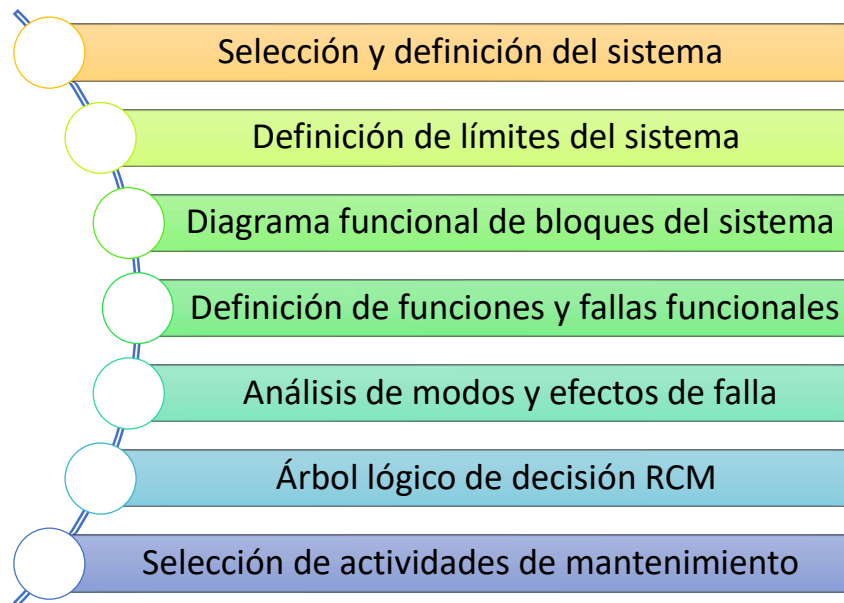


Figura 3 Los 7 Pasos de la metodología RCM

Al final de este procedimiento se tendrá un conjunto de actividades de mantenimiento bien pensadas y sólidamente sustentadas para conservar la función del sistema, con costos operacionales y de mantenimiento adecuados, gracias a que se sustenta cada actividad que se pretende realizar analizando porqué se debería realizar y qué se obtiene de esa actividad. Para iniciar la implementación de la metodología se establecerá una arquitectura tipo para el Sistema de Frío Alimentario que se analizará en el presente trabajo; cabe aclarar que el objetivo no es abarcar todas las posibles configuraciones de los SFA, sino delimitar una configuración genérica que sirva para representar un grupo significativo de estos sistemas y con esto brindar lineamientos generales que sean aplicables a los sistemas específicos de los retailer. Los equipos se tratarán siempre en su función general, entendiendo que dentro de cada equipo que conforma un SFA se pueden encontrar clasificaciones según el tipo de refrigerante, los mecanismos de acción de los componentes o la tecnología que utilizan.

5. Metodología

En el presente trabajo se aplicó la estrategia RCM en los diferentes componentes de un sistema de refrigeración utilizado para la conservación de productos alimenticios, abreviados en el presente como Sistemas de Frío Alimentario (SFA). El equipo de expertos estuvo conformado por 3 ingenieros mecánicos con más de 10 años de experiencia en la refrigeración comercial, con Proyectos, Instalaciones y Mantenimientos de Sistemas de frío alimentario en toda Colombia; quien se encargaron de establecer los requisitos de calidad para el almacenamiento de productos alimenticios que requieren refrigeración. La metodología RCM consta de 7 pasos según lo expuesto por (Smith & Hinchcliffe, 2004), los cuales se siguieron al pie de la letra de tal forma que se garantice un resultado adecuado con el mayor retorno de inversión posible, como se mostró en la Figura 3. Los SFA pueden tener arquitecturas y diseños muy variados; muchas veces dos o más arquitecturas coexisten en busca de optimizar varias dimensiones importantes en la operación de una tienda retail y casi cualquier industria, como consumo energético, modularidad, centralización/distribución, eficiencia térmica, etc. En el presente trabajo se plasmó una arquitectura típica que contiene los equipos que más frecuentemente se encuentran en las instalaciones de un supermercado de grandes superficies, sin pretender abarcar todas las posibles configuraciones y tecnologías aplicables a los SFA; se pretende dar lineamientos para la toma de decisiones y así hacer extensiva la metodología desarrollada en el presente trabajo para la gran cantidad de aplicaciones específicas de SFA que el lector pueda requerir analizar o implementar.

La implementación de los pasos de la metodología RCM resultó en un conjunto de actividades que permita aumentar la confiabilidad de los SFA, llevando las fallas a niveles de consecuencia y frecuencia tolerables para la operación de estos sistemas en una empresa retail; el objetivo principal en este desarrollo no fue eliminar la ocurrencia de fallas, sino minimizarlas y mitigar el impacto que estas puedan generar en la operación con planes de acción estructurados y asertivos.

Dentro de estas actividades se propusieron variables de desempeño a las que se les estableció rutinas de monitoreo para detectar fallas tempranas en los equipos del sistema; el comportamiento de esta variable debe mostrar una baja en el rendimiento de algún equipo o del sistema en cierta medida, para activar un plan de intervención prioritario que permita la pronta puesta a punto y el hallazgo de una falla incipiente en el SFA (Loisel et al., 2021).

Una vez se establecieron las actividades de mantenimiento para los equipos definidos en el análisis RCM se planteó un posible stock de repuestos para reducir los tiempos de respuesta en las actividades que fueron catalogadas como operación hasta falla, de tal manera que se logre poner en marcha el equipo a la mayor brevedad posible, con un costo/beneficio atractivo para el retailer y considerando la criticidad y frecuencia de las fallas evaluadas.

6. Resultados

6.1. Definición del SFA

Inicialmente, se presenta la arquitectura del SFA tipo que se desarrolló para el análisis, la cual, como se dijo anteriormente, no representa específicamente todos los componentes de un SFA; este representa un sistema de compresión centralizado que se conecta con los evaporadores y condensador a través de un sistema de tuberías, generalmente de cobre (Cu), y es operado por un sistema de control, que regula la capacidad entregada en función de la demanda, activando o cerrando los dispositivos de control de flujo (ASHRAE, 2018). En la Figura 4 se representa gráficamente los componentes que hacen parte del SFA tipo estudiado en el presente trabajo con imágenes de referencia de cada uno.



Figura 4 Representación simplificada del SFA tipo.

Nota. Adaptado de *Productos*, por Epta Refrigeration, 2021 (<https://www.eptarefrigeration.com/es/products>), de *Electronic expansion valves*, por Danfoss, 2011 (<https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-stories/dcs/electronic-expansion-valves/>), de *Condensadores Vertical Vario*, por Güntner, 2022 (<https://www.guntner.es/productos/condensadores/vario/vertical-vario-con>), de *Einstein E2 Manual de instalación*, por Emerson, 2010 (<https://climate.emerson.com/documents/026-1612-e2-user-manualesp-rev2-en-2884286.pdf>) y de *Tuberías y accesorios de cobre*, por Amir Gumarov, 2019 (<https://engineer.decorexpro.com/es/santeh/tools/mednye-truby-i-fitingi.html>).

6.1.1. Sistema de compresión

El propósito de los compresores en los sistemas HVAC&R es el de aumentar la presión del gas refrigerante desde la presión de succión que sale del evaporador hasta la presión del condensador (comprimir el fluido refrigerante en estado gaseoso). Existe una amplia variedad de compresores que se utilizan en la refrigeración, esta clasificación depende principalmente del método utilizado para aumentar la presión del fluido. El compresor recíprocante es muy utilizado en la industria debido a su amplio rango de capacidad, el mayor entre todos los tipos; su diseño se encuentra en su etapa de madurez y, en parte, a esto se debe su amplio uso hoy en día (ASHRAE, 2015; Hundy et al., 2016). En la Figura 5 se puede observar los rangos aproximados de capacidad que abarca cada tipo de compresor en kW.

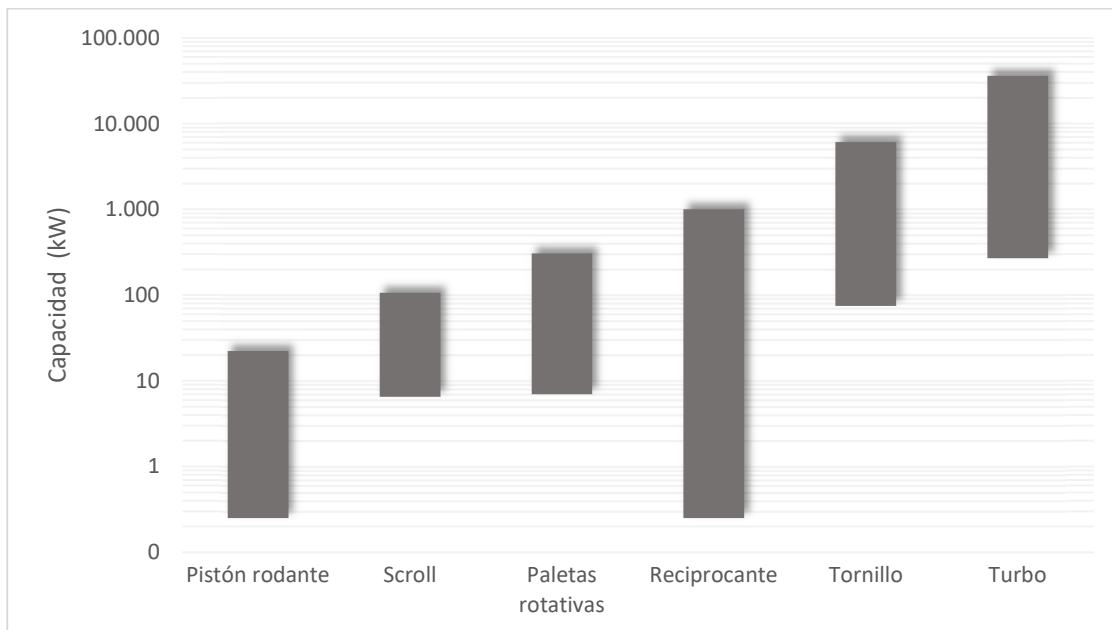


Figura 5 Rango de capacidad por tipo de compresor.

Nota. Adaptado de (Hundy et al., 2016)

En la Figura 6 se presenta un ejemplo del sistema de compresión para un SFA en un supermercado de grandes superficies; en esta se pueden identificar algunos de sus componentes como los compresores, el tablero de control y potencia, el separador de aceite, recibidor de líquido.



Figura 6 Sistema de compresión para refrigerante CO2.

Nota. Adaptado de *Productos*, por Epta Refrigeration, 2021 (<https://www.eptarefrigeration.com/es/products>)

6.1.2. Evaporadores

Transforma el refrigerante de estado líquido a gaseoso a través de la disminución drástica de presión del refrigerante, proceso en el cual se baja mucho la temperatura del fluido y se puede obtener su capacidad calorífica para bajar la temperatura a los productos que se desea refrigerar o congelar (Wang, 2000). En la Tabla 1 se encuentra relacionados las diferentes clasificaciones de los evaporadores en función del medio de transferencia y el método de suministro de refrigerante.

Tabla 1 Clasificación de los evaporadores.

#	Tipo de evaporador	Medio de transferencia	Suministro de refrigerante
1	Expansión directa	Aire	Expansión directa
2	Inundado de líquido	Líquido	Inundación
3	Expansión directa de líquido	Líquido	Expansión directa
4	Sobrealimentación de líquido	Líquido	Sobrealimentación
5	Fabricador de hielo	Superficie	Expansión directa

Para el sistema centralizado lo más común es encontrar evaporadores tipo 1 para los diferentes fluidos refrigerantes utilizados comercialmente. En un SFA se pueden encontrar con diferentes construcciones y ser usados en variedad de espacios, por ejemplo, exhibidores refrigerados para el piso de venta en el retail o, intercambiadores de calor en cuartos fríos de almacenamiento. Existen equipos para rangos de capacidad más pequeños en los que se han extendido tanto los evaporadores tipo 1 y 2 dependiendo del área de exhibición, configuración del mueble refrigerado, tipo de refrigerante y otras variables.

Los evaporadores tipo 5 corresponden a las máquinas fabricadoras de hielo que, extrayendo gran cantidad de calor de una superficie de transferencia (tambor o placa comúnmente, puede ser metálico o no), logran congelar rápidamente el agua de un suministro y fabricar hielo en diferentes presentaciones (hojuelas, escarcha, etc.). De acuerdo con cada uno de estos tipos de evaporador se tendrán consideraciones específicas para desarrollar las actividades de mantenimiento a realizar (ASHRAE, 2015).

En el presente trabajo nos centraremos en los evaporadores de tipo 1, incluyendo aplicaciones de media y baja temperatura, específicamente para exhibidores refrigerados verticales abiertos y cerrados, autoservicio y venta asistida, los cuales se pueden observar en la Figura 7.



Figura 7 Exhibidores refrigerados, evaporadores tipo 1.

Nota. Adaptado de *Productos*, por Epta Refrigeration, 2021 (<https://www.eptarefrigeration.com/es/products>)

6.1.3. Dispositivos de control de flujo de refrigerante (DCFR)

Se encargan de regular el paso de refrigerante para alcanzar la capacidad requerida en el evaporador según la variación de demanda del último; además, disminuye la presión del fluido

refrigerante hasta la presión de evaporación requerida. Existen varios tipos dependiendo de su construcción, capacidad, refrigerante y aplicación; el más común es la válvula de expansión termostática (TXV), aunque también existen los tubos capilares, válvulas de expansión electrónica y válvulas de flotador (ASHRAE, 2015; Wang, 2000). En la Figura 8 encontramos algunos de los tipos de válvulas de expansión electrónica que se utilizan comúnmente en los grandes sistemas de refrigeración.



Figura 8 Válvulas de expansión electrónica

Nota. Adaptado de *Electronic expansion valves*, por Danfoss, 2011

(<https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-stories/dcs/electronic-expansion-valves/>)

6.1.4. Condensador

Transforma el gas sobrecalentado que sale del compresor a alta presión en un líquido a través del intercambio de calor con otro fluido, usualmente aire o agua, en un serpentín ubicado en un espacio que facilite ese intercambio de calor. Existe un tercer tipo, condensador evaporativo, el cual esparce agua en aerosol sobre tubería del serpentín de condensación para extraer el calor de rechazo del fluido refrigerante (Wang, 2000). Este proceso se realiza en tres fases dentro del serpentín, sin importar el tipo de condensador:

- Extracción del sobrecalentamiento del gas caliente
- Condensación y rechazo del calor latente del fluido
- Subenfriamiento del fluido refrigerante

Para el sistema centralizado lo más probable es que nos encontremos con condensadores de cualquier tipo, siendo los más comunes los enfriados por aire, en los cuales nos centraremos. Sin embargo, a diferencia de los evaporadores su construcción no varía tanto y se pueden considerar, en general, criterios similares para estipular sus actividades de mantenimiento, excepto para los condensadores evaporativos, que incluyen otros equipos para el proceso de condensación del fluido refrigerante.

En la Figura 9 se observa un condensador enfriado por aire de tiro horizontal que será utilizado como referencia para el desarrollo del ejercicio del presente trabajo; allí se puede notar 2 tuberías principales que distribuyen el refrigerante por todo el serpentín, una de ellas corresponde a la entrada (IN) donde se recibe gas a alta presión y temperatura a través de la tubería de descarga; la otra conexión es la salida hacia la tubería de líquido y el reservorio si el sistema lo incluye.



Figura 9 Condensador enfriado por aire, tiro horizontal.

Nota. Adaptado de *Condensadores Vertical Vario*, por Guntner, 2022

(<https://www.guntner.es/productos/condensadores/vario/vertical-vario-con>)

6.1.5. Sistema de tuberías

Las tuberías de refrigeración conectan los diferentes componentes del SFA para que se alcance el efecto de refrigeración requerido. Para los refrigerantes halocarbonos (CFC, HCFC, HFC y HFO) y algunos refrigerantes naturales (CO₂) se utiliza tubería de cobre; esta se encuentra normalmente de tres tipos, que varían principalmente en el espesor de pared del tubo:

- K, trabajo pesado
- L, trabajo estándar
- M, trabajo suave

Las tuberías de cobre en cualquier sistema de refrigeración deben estar completamente libres de suciedad, óxidos, humedad y cualquier otra impureza. En el proceso de diseño de tubería se debe garantizar que esta pueda transportar la cantidad requerida de refrigerante en función de las diferentes condiciones de carga; la caída de presión en las tuberías debe ser óptima de tal manera que no haya cambios significativos en la temperatura de saturación de los diferentes tramos del tendido de tuberías (succión, descarga y líquido). En sistemas con refrigerantes halocarbonos, se requiere garantizar una velocidad mínima en la tubería para garantizar que el aceite que es arrastrado por el refrigerante retorne al cárter del sistema de compresión y se mantenga un nivel adecuado de lubricación.

6.1.6. Sistema de control

Se encarga de regular la capacidad de operación de los equipos del SFA y garantizar que estos operen siempre en condiciones seguras y con un consumo de energía óptimo en función de la variación de las condiciones de carga del sistema; son sistemas de control y gestión de energía que, a su vez, funcionan como sistema de protección para los equipos del SFA. Estos sistemas se pueden clasificar en función de la distribución del control en los diferentes equipos del SFA; los controles centralizados permiten relacionar todas las variables controladas en un mismo elemento, se brinda una mayor restricción al acceso de personal en la instalación (tienda) a los parámetros de funcionamiento del SFA y son normalmente más complejos de manejar. Por otro lado, los controles

distribuidos permiten manejar directamente desde cada equipo o ubicación del SFA los rangos de temperatura requeridos y, desde el cuarto de máquinas gobernar los equipos con parámetros más complejos en su control o que su acceso se deba restringir al personal de mantenimiento del SFA (sistema de compresión, condensadores, por ejemplo).

Entre estas dos arquitecturas de sistemas de control existen muchas variantes dependiendo del alcance, método y modo de control que el diseñador del SFA haya definido. En la Figura 10 se muestra a la izquierda un ejemplo del controlador principal para un sistema centralizado, marca Emerson; a la derecha, se observan los diferentes posibles controladores para un sistema distribuido Carel, estos varían en función de la cantidad de equipos que pueden controlar y su complejidad.



Figura 10 Tipos de sistemas de control para los SFA.

Nota. Adaptado de *Einstein E2 Manual de instalación*, por Emerson, 2010

(<https://climate.emerson.com/documents/026-1612-e2-user-manualesp-rev2-en-2884286.pdf>) y de *ir33 universale*, por Carel, 2022 (<https://www.carel.com/product/ir33-universale>)

Entre las funciones principales de un sistema de control óptimo para un SFA o cualquier sistema de refrigeración se pueden destacar las siguientes:

- Mantener los parámetros controlados dentro de un rango requerido por el usuario (presión, temperatura, humedad relativa, entalpía, flujo del refrigerante, etc.).

- Ajustar el funcionamiento de los diferentes componentes del SFA en función de las lecturas de las variables controladas y su relación con los valores establecidos (set-point).
- Garantizar que el SFA opere en condiciones seguras, tanto para garantizar la continuidad de su operación, alertar oportunamente sobre anomalías y tomar acciones preventivas contra el deterioro de los equipos cuando estas anomalías se detecten.
- Proporcionar un histórico de datos de operación del SFA que permita al personal de mantenimiento identificar las prestaciones del sistema, analizar su relación con variables externas al SFA (cantidad de productos almacenados y exhibidos, intervenciones mayores del personal de operación de la tienda como inventarios de productos, frecuencia de surtido o condiciones de ingreso de los productos al SFA).

6.2. Definición de límites en el SFA

En esta sección se precisarán los parámetros para definir los límites que indican el alcance físico de cada uno de los equipos que componen el SFA tipo, utilizando como guía los criterios establecidos en (Smith & Hinchcliffe, 2004). La composición física propia de los equipos y la relación de entradas y salidas de cada uno de ellos guiarán la definición de los límites en el SFA. Se representa gráficamente en la Figura 11 el SFA elegido para este análisis con el fin de facilitar la comprensión de la interacción entre los diferentes equipos que componen el sistema de estudio.

Los equipos que componen el SFA están interconectados a través de un sistema de tuberías que se encarga de transportar y contener el fluido refrigerante del sistema. Existe un control centralizado que se encarga de coordinar los diferentes instrumentos de control para el condensador, evaporadores y sistema de compresión (Sondas de temperatura, Presostatos, sensores de nivel, etc.).

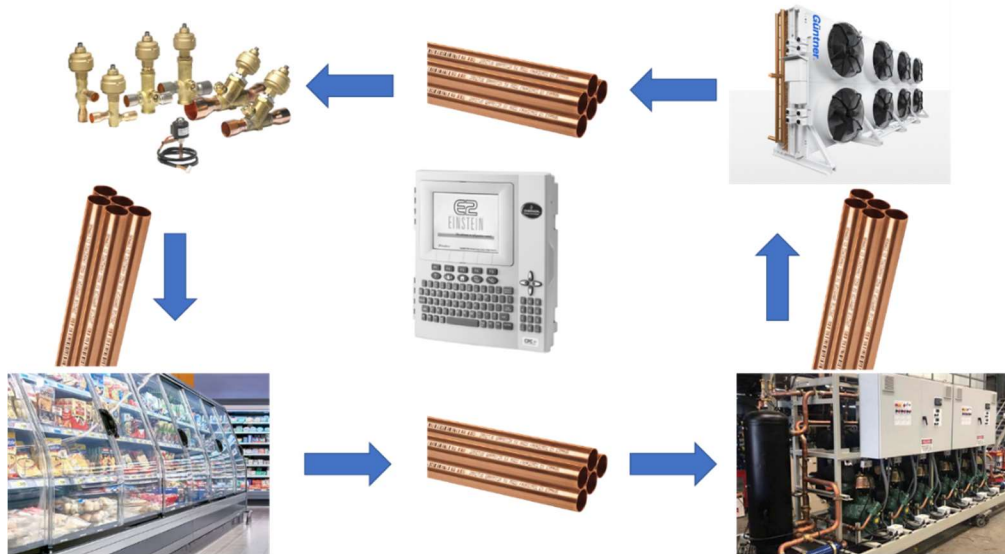


Figura 11 Diagrama de bloques para el SFA tipo.

Nota. Adaptado de *Productos*, por Epta Refrigeration, 2021 (<https://www.eptarefrigeration.com/es/products>), de *Electronic expansion valves*, por Danfoss, 2011 (<https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-stories/dcs/electronic-expansion-valves/>), de *Condensadores Vertical Vario*, por Guntner, 2022 (<https://www.guntner.es/productos/condensadores/vario/vertical-vario-con>), de *Einstein E2 Manual de instalación*, por Emerson, 2010 (<https://climate.emerson.com/documents/026-1612-e2-user-manualesp-rev2-en-2884286.pdf>) y de *Tubería de cobre Tipo L*, por Mayun, 2019 (<https://www.mayun.com.co/portfolio-items/tuberia-rigida-de-cobre-tipo-l/>).

A continuación, se presentan las conexiones entre los diferentes equipos y los límites que se recomienda establecer para el análisis RCM, apoyándose en las entradas y salidas de cada equipo (IN/OUT):

- Condensador va desde IN hasta el receptor de líquido
- Tubería de líquido desde receptor de líquido hasta elemento de expansión
- Elemento de expansión, únicamente el elemento físico (IN hasta OUT)
- Evaporador desde OUT de elemento de expansión hasta salida de espacio refrigerado o válvula reguladora de presión (si existe)
- Tubería de succión desde OUT evaporador hasta sistema de compresión
- Sistema de compresión desde succión de compresores hasta salida de separador de aceite, incluye sistema de lubricación

- Tubería de descarga desde separador de aceite hasta IN del condensador

Esta delimitación permitirá establecer claramente, en una futura aplicación, qué componentes se incluyen en cada equipo y qué variables se deben controlar en una inspección para saber si el equipo está cumpliendo su función o si esta se ha deteriorado. Esta no pretende ser la delimitación definitiva para estos sistemas, incluso en la aplicación real se podrá requerir de algunas iteraciones y ajustes en este punto a medida que se avanza en los siguientes dos pasos; esto con el fin de buscar la manera más eficiente de representar esos límites en función de la realidad del sistema que se está analizando y sus particularidades.

6.3. Descripción del sistema

La información plasmada en el punto anterior se debe registrar siguiendo las recomendaciones plasmadas por (Smith & Hinchcliffe, 2004) en el capítulo 5. Esto permitirá establecer precisamente una línea base para la definición del sistema tal cual fue concebido en el momento del análisis; en un futuro, cuando se pretendan realizar mejoras o modificaciones operacionales o de diseño, se podrá evitar que se pierda el foco en las condiciones con que fue establecido el sistema y los parámetros para los que fue calculado. También permitirá establecer el criterio con el que fue entendido el sistema por parte del analista e identificar parámetros críticos operacionales y de diseño, que juegan un papel importante en la delimitación de la pérdida de función de los equipos del SFA.

A continuación, se muestra la estructura planteada para la descripción del sistema, se brindan recomendaciones y lineamientos para la construcción de cada punto, los cuáles deben ser ampliados con las condiciones específicas del SFA real en el que se pretenda aplicar esta metodología. Los criterios técnicos para determinar los valores de referencia presentados a continuación fueron tomados en base a los Handbook de Refrigeración (ASHRAE, 2018) y de Aplicaciones (ASHRAE, 2015) pueden ser utilizados, cuando este lo especifique, en caso de no tener acceso a las memorias de diseño del SFA.

6.3.1. Descripción funcional / Parámetros clave

6.3.1.1. Sistema de compresión

- Mantener la presión de succión del refrigerante para alcanzar las temperaturas de evaporación requeridas en refrigeración [bar o psi] y congelación [bar o psi], de tal forma que los evaporadores entreguen las temperaturas requeridas para la conservación de los productos.
- Aumentar la presión del refrigerante desde las presiones de succión hasta la presión de condensación [bar o psi] establecida en el diseño del sistema, o la calculada según las condiciones de operación, por ejemplo, temperatura ambiente y relación de compresión.
- Garantizar la redistribución del aceite lubricante hacia los compresores con el nivel adecuado según recomendación de diseñador o fabricante

6.3.1.2. Evaporadores

- Transformar el refrigerante de estado líquido a gaseoso haciendo la transferencia de calor con los espacios refrigerados garantizando un sobrecalentamiento en cada uno según recomendaciones de diseñador [_ grados en refrigeración y _ grados en congelación]
- Garantizar que la temperatura en cada uno de los espacios refrigerados del SFA sea la requerida para el sostenimiento de los productos almacenados [set-point de temperatura]
- Garantizar un flujo de aire en los ventiladores con los CFM requeridos según el diseño original de cada evaporador

6.3.1.3. Dispositivos de control de flujo de refrigerante

- Regular el paso del refrigerante líquido hacia el evaporador para alcanzar la capacidad requerida en el espacio refrigerado garantizando un sobrecalentamiento en su evaporador correspondiente según recomendaciones del diseñador [_ grados en refrigeración y _ grados en congelación]

- Disminuir la presión del refrigerante líquido hasta la presión de succión requerida según la aplicación, refrigeración [bar o psi] y congelación [bar o psi]

6.3.1.4. Condensador

- Transformar el gas refrigerante sobrecalentado en un líquido subenfriado sin variar la presión de condensación [bar o psi] con un subenfriamiento de [°C o °F]
- Mantener un delta T entre la temperatura de entrada y salida según cálculos del fabricante o el diseñador [°C o °F]

6.3.1.5. Sistema de tuberías

- Contener el refrigerante del sistema en un circuito cerrado y estanco para mantener el nivel requerido y evitar la contaminación con agentes externos
- Transportar el refrigerante a través de los diferentes equipos del SFA con las caídas de presión según recomendaciones establecidas para la eficiencia del sistema
- Garantizar el retorno del aceite lubricante desde los evaporadores hacia los compresores y el sistema de lubricación

6.3.1.6. Sistema de control

- Coordinar la interacción entre los diferentes equipos del SFA para ajustar la capacidad en función de la variación de la demanda frigorífica y así garantizar el mínimo uso de energía con una operación dentro de parámetros establecidos por el usuario
- Permitir el ajuste de los parámetros requeridos por el usuario (final o técnico operativo) según las necesidades de almacenamiento en el SFA
- Monitorear y registrar los valores de las variables de control establecidas por el fabricante del sistema de control y el diseñador del SFA

6.3.2. Elementos en redundancia

En esta sección se debe especificar los componentes o equipos del sistema que cuentan con un respaldo o standby para ser reemplazados, manual o automáticamente, en caso de que se presente una falla. Compresores adicionales en el sistema de compresión, baipás de tuberías para manipulación de válvulas o cambio de filtros, elementos duplicados en el sistema de control, entre otros, son ejemplos de redundancias que se pueden presentar en los SFA de los almacenes retail.

6.3.3. Dispositivos de protección

Entre los dispositivos de protección podemos encontrar todos aquellos que monitorean variables del proceso y en base a las lecturas tomadas establecen una acción con el fin de proteger los equipos de un posible daño por operación fuera de los rangos establecidos por sus fabricantes o diseñadores. Por ejemplo, módulos electrónicos de lubricación, termostatos, presostatos o medidores de corriente y/o voltaje son algunos de los elementos que normalmente cumplen esta función en los SFA.

6.3.4. Elementos claves de control

Desde el controlador principal hasta los diferentes microcontroladores propios de cada espacio refrigerado hacen parte de este grupo, así como los medidores de presión y temperatura que informan las condiciones de operación del sistema para que el controlador principal pueda tomar la mejor decisión en materia de eficiencia energética.

6.3.5. Diagrama funcional de bloques e interfaces de entradas y salidas

Una vez completada la descripción funcional del SFA se recomienda relacionar esta información gráficamente a través de un diagrama funcional de bloques en el que se pueda identificar fácilmente las diferentes interacciones entre las funciones de los diferentes equipos del SFA. Este diagrama debe construirse teniendo en cuenta las entradas y salidas definidas en los límites del SFA, sección 6.2; a medida que se va construyendo el diagrama se hará evidente que

existen más interfaces de entradas y salidas que las definidas en esta sección previa, por lo que se recomienda utilizar la estructura presentada en la Tabla 2.

Tabla 2 Estructura para definir interfaces de entradas y salidas del SFA.

Tipo	Sistema delimitante	Ubicación de la interfaz	Plano de referencia
IN/OUT (elemento que fluye y valor de referencia)	Atmósfera / componente / limitante física / etc.	Punto de referencia ya sea en el sistema o en la ubicación física, debe ser identificable fácilmente	Referencia al plano de la edificación o del SFA

En la Figura 12 se presenta un diagrama de bloques con base al SFA que definimos anteriormente y sus límites. El desglose más detallado requiere información específica de los equipos reales y sus componentes, arquitectura constructiva, entre otras. Por ejemplo, se deben especificar cada uno de los evaporadores y dispositivos de control de flujo de refrigerante; dependiendo de la cantidad de compresores o condensadores será más complejo el diagrama, pero en esencia se debe seguir el criterio de listar entradas y salidas en la Tabla 2 y actualizar el diagrama cuantas veces sea necesario para abarcar la totalidad de los equipos involucrados en el SFA.

Al final del ejercicio se estará construyendo un listado amplio de los equipos y componentes del SFA que se involucrarán más adelante en las siguientes etapas del RCM y servirán para la elaboración, por ejemplo, de la taxonomía detallada del SFA para el programa de mantenimiento. De igual forma, el historial de los equipos se debe agregar a este compilado de información haciendo especial énfasis en los modos y causas de falla de los diferentes componentes del sistema, en los últimos 2 o 3 años, ya que nos servirá como insumo en el paso 5 del RCM, análisis de modos y efectos de falla. Esta información normalmente reposa en los registros del departamento de mantenimiento, ya sea en los registros de órdenes de trabajo o en los archivos del CMMS de la compañía retail. Se debe analizar con cuidado la información que se va a tomar de estos registros porque no siempre será de utilidad para el estudio RCM que se pretende desarrollar; una correcta depuración de estos datos garantizará el éxito en futuras etapas del análisis.

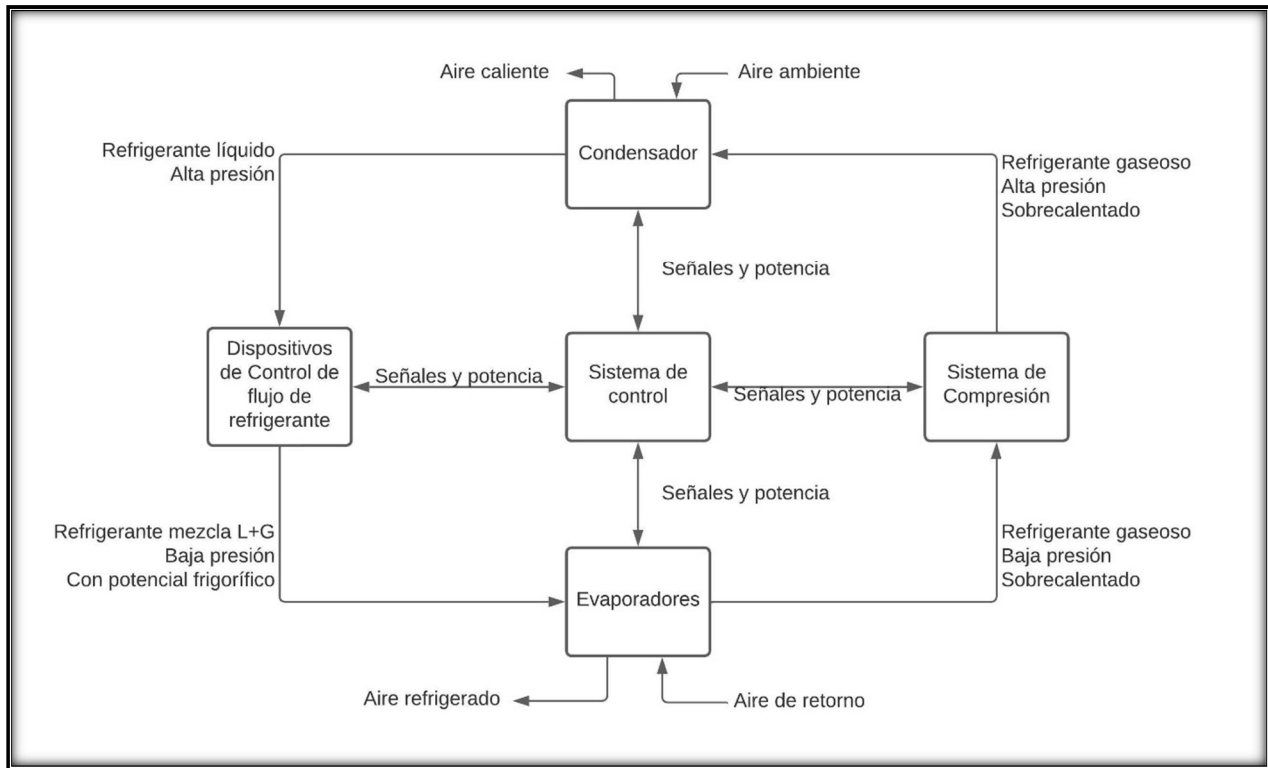


Figura 12 Diagrama funcional de bloques del SFA.

6.3.6. Análisis de criticidad de los equipos del SFA

Una vez descrito claramente el sistema y sus funcionalidades es importante establecer cuáles equipos son más críticos para el desempeño del SFA y así poder tener un criterio objetivo para la toma de decisiones en futuras implementaciones de la metodología. Para este ejercicio se toman en cuenta dos variables, **los factores de consecuencia y la probabilidad de ocurrencia**; la definición de las escalas de evaluación para estas variables es de libertad del analista y puede encaminarlas para cumplir con las políticas y el contexto de la compañía para la cual se realiza el estudio; en general, se recomienda utilizar de 3 a 5 escalas para cada variable (NORSOK Standard Z-008 Risk based maintenance and consequence classification, 2011). En la Tabla 3 se presenta un ejemplo de los factores de consecuencia que normalmente se deben tener en cuenta para cualquier SFA. En la Tabla 4 se definen las escalas para evaluar la probabilidad de ocurrencia y en la Tabla 5 se desarrolla la matriz para evaluar la criticidad de los equipos, en la que se combinan ambas variables para generar el concepto y clasificación de criticidad: rojo, muy alta; naranja, alta; amarillo, media; verde, baja.

En la Tabla 6 se le asigna una calificación de probabilidad de ocurrencia de fallas a cada equipo, de acuerdo con las escalas planteadas en el párrafo anterior; del mismo modo, se evalúan para cada uno de los cinco factores de consecuencia que se tuvieron en cuenta en el análisis. entre los 5 valores de consecuencia que se obtienen para cada equipo, se selecciona el mayor de ellos y al multiplicarlo por el factor de probabilidad de ocurrencia se calcula el valor de criticidad para cada equipo del SFA. Se clasifica según los valores de la matriz para evaluación de criticidad, obteniendo que esta es muy alta en todos los equipos; al ser diferenciada por el valor numérico de criticidad obtenemos que el sistema de compresión y el sistema de tuberías son los más críticos de todos, asegurando así el primer objetivo específico del trabajo, estableciendo los equipos que más impacto generan al funcionamiento del SFA y su disponibilidad.

Tabla 3 Factores de consecuencia

FACTOR	CALIFICACIÓN	SEGURIDAD [personal]	PRODUCCIÓN [% del costo del inventario de frío]	MEDIO AMBIENTE [% carga total de refrigerante]	COSTO DEL MTTO [% venta diaria]	TIEMPO DE REPARACIÓN [h]
ESCALA						
Catastrófica	16	Muerte	> 80%	> 60%	> 60%	> 24
Mayor	8	Incapacidad permanente	80% > x < 40%	60% > x < 20%	60% > x < 20%	24 > x < 8
Media	4	Incapacidad temporal	40% > x < 10%	20% > x < 10%	20% > x < 10%	8 > x < 3
Menor	2	Primeros auxilios	x < 10%	x < 10%	x < 10%	3 > x < 1
Mínima	1	Sin lesión	No significativo o cero	No significativo o cero	No significativo o cero	< 1

Tabla 4 Probabilidad de ocurrencia

PROBABILIDAD	CALIFICACIÓN	REFERENCIA
ESCALA		
Muy alta/Muy frecuente	5	Una o varias fallas por semana
Alta/ Frecuente	4	Una a tres fallas por mes
Media/Ocasional	3	Una a diez fallas por año
Baja/Remota	2	Una a cuatro fallas en 5 años
Muy baja/Improbable	1	Una a tres fallas en 20 años

Tabla 5 Matriz para evaluar criticidad

Probabilidad	5	5	10	20	40	80
	4	4	8	16	32	64
	3	3	6	12	24	48
	2	2	4	8	16	32
	1	1	2	4	8	16
		1	2	4	8	16
Consecuencia						

Tabla 6 Criticidad de equipos del SFA tipo

	Consecuencias						Criticidad
	Probabilidad	Seguridad	Producción	Medio ambiente	Costo del mantenimiento	Tiempo de reparación	
Sistema de compresión	5	8	16	16	16	16	80
Evaporadores	3	4	8	4	4	4	24
Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3	4	8	4	8	8	24
Condensador	3	8	16	8	16	16	48
Sistema de tuberías	5	8	16	8	16	16	80
Sistema de control	4	4	8	4	8	8	32

6.4. Definición de funciones y fallas funcionales

En esta sección nos encontramos en el cuarto paso de la metodología RCM, donde debemos establecer qué funciones se espera que nuestro SFA cumpla, qué objetivo o producto se desea obtener con la operación de este sistema y, además, cómo se identificará que esa función se ha perdido o degradado. Las interfaces de salida normalmente determinan cuáles son los productos del sistema, o lo que se conoce como su función; a partir de este punto se debe tener en mente con claridad que lo que se busca con este ejercicio es preservar la función del sistema, más no el sistema en sí. Esta afirmación puede resultar un poco difícil de asimilar al principio, pero diferenciar correctamente cuál es la función del sistema permitirá enfocar las actividades de mantenimiento que se definirán más adelante en garantizar que el resultado que esperamos del sistema se mantenga. Ilustremos con un ejemplo más cercano a la cotidianidad: si se tiene un vehículo último modelo, con todos sus elementos nuevos y en perfecto estado, pero sin combustible, lo más probable es que este no podrá cumplir su función (trasladar al conductor del punto A al punto B).

Una vez definidas las funciones, se deben establecer los diferentes escenarios en los que se considera que se ha presentado una falla funcional; existirán escenarios donde la pérdida de la función tendrá como consecuencia un paro completo del sistema y otros donde esta se verá reflejada como una disminución leve en la calidad o cantidad del resultado esperado. La precisión en estas definiciones será vital para priorizar más adelante, en función de su criticidad, las diferentes fallas funcionales.

Teniendo esta claridad presente, a continuación, se define en la Tabla 7 las funciones de los diferentes equipos que componen el SFA en estudio y algunas de sus posibles fallas funcionales. Algunos valores de referencia no se especifican ya que deberán ser estipulados según el sistema concreto o son variables en función de las condiciones de operación (tipo de refrigerante, rango de temperatura del SFA, entre otras).

Tabla 7 Funciones y fallas funcionales del SFA

Función	Falla funcional	Descripción
1		Mantener una presión de descarga acorde con la temperatura ambiente exterior
	1.1	Presión de descarga mayor al rango de protección establecido por el fabricante o diseñador
	1.2	Presión de descarga mayor a la requerida en 20%
	1.3	Presión de descarga menor a la requerida en 20%
	1.4	Presión de descarga cercana a 0 psi (vacío)
2		Mantener una presión de aceite según lo estipulado por el fabricante de los compresores, psi por encima de Psucción
	2.1	Presión de aceite igual a la presión de succión
	2.2	Presión de aceite menor o igual al promedio del valor de referencia y presión de succión
	2.3	Pérdida de nivel de lubricante en los compresores
3		Mantener la temperatura en los espacios refrigerados en el rango estipulado según los productos almacenados
	3.1	Mantener una temperatura entre 4 y 10 grados por encima del límite superior del rango del espacio refrigerado (MT o BT)
	3.2	Mantener una temperatura entre 1 y 3 grados por encima del límite superior del rango del espacio refrigerado (MT o BT)
	3.3	Temperatura en el espacio refrigerado cercana a la temperatura ambiente
4		Mantener un flujo de aire con los CFM calculados por el diseñador o fabricante
	4.1	Flujo de aire con CFM por encima de los requeridos
	4.2	Flujo de aire con CFM menor al 80% de los requeridos
	4.3	Flujo de aire ausente
5		Mantener una diferencia entre Tevap y Tretorno según requerimiento de humedad
	5.1	Diferencia entre Tevap y Tretorno por encima del requerimiento
	5.2	Diferencia entre Tevap y Tretorno por debajo del requerimiento
	5.3	Sin diferencia entre Tevap y Tretorno
6		Mantener la presión de succión requerida según Tevap en MT o BT
	6.1	Presión de succión mayor a la requerida
	6.2	Presión de succión menor a la requerida
	6.3	Presión de succión cercana a 0 psi (vacío)
7		Mantener un sobrecalentamiento apropiado según la aplicación MT o BT
	7.1	Sobrecalentamiento mayor al valor de referencia
	7.2	Sobrecalentamiento menor al valor de referencia
8		Condensar el refrigerante gaseoso de alta presión con un subenfriamiento de 3 grados
	8.1	Subenfriamiento mayor a 5 grados
	8.2	Subenfriamiento menor a 2 grados
	8.3	Subenfriamiento negativo, presencia de gas
9		Mantener el refrigerante contenido en un sistema cerrado y estanco
	9.1	Presencia de fugas en el sistema
10		Mantener las caídas de presión de refrigerante según requerimientos de diseño
	10.1	Caída de presión en succión menor a delta T de 4°F
	10.2	Caída de presión en líquido o descarga menor a delta T de 3°F
11		Monitorear los valores de las variables de control establecidas por el diseñador del SFA
	11.1	Registro erróneo de variables de control
	11.2	No registro de variables de control
12		Permitir el ajuste de los parámetros de operación del sistema según niveles de acceso
	12.1	No permitir el ajuste de parámetros de operación
	12.2	No discriminar niveles de acceso
13		Ajustar la capacidad frigorífica entregada por el sistema según la variabilidad de la demanda
	13.1	No ajusta la capacidad del sistema
	13.2	Ajuste erróneo de capacidad del sistema

6.5. Análisis de modos y efectos de falla (FMEA)

En esta fase del análisis se relacionarán las fallas funcionales establecidas en la sección anterior con los diferentes equipos que componen el SFA, con el fin identificar los componentes que tienen el potencial de generar una o más fallas funcionales. Para este ejercicio se puede utilizar la matriz de equipos-fallas funcionales propuesta por (Smith & Hinchcliffe, 2004) en la sección 5.6.1 para este paso del análisis. Cada equipo listado en el SFA se relaciona con cada falla funcional y se hace la siguiente pregunta: ¿Es posible que un mal funcionamiento de este equipo induzca que esta falla funcional ocurra? Si la respuesta es afirmativa, entonces se coloca una “X” en la intersección correspondiente, lo que indica que deberá ser analizada con mayor detalle en el FMEA. Cuando la matriz sea completada se habrá trazado una hoja de ruta específica que nos guiará a través de los pasos restantes del proceso de análisis.

La Tabla 8 es el resultado de este ejercicio en el SFA de este análisis; en aplicaciones específicas la lista de equipos será más extensa e incluirá los componentes definidos según la Sección 6.3.5 del presente documento. Se procede a identificar las fallas funcionales que tengan mayor cantidad de “X” para iniciar el FMEA con los modos de falla de cada equipo que aplica según la Tabla 8.

Para el FMEA se utilizará el formato presentado en la Figura 5-16 del libro de (Smith & Hinchcliffe, 2004), la cual relaciona falla funcional, modos de falla con su causa, efectos de falla y su alcance a nivel local (equipo), de sistema y de planta, y, por último, si el modo de falla pasará a la siguiente etapa del análisis, columna LTA (Logic Tree Analysis). Con cada modo de falla de los equipos agregados al FMEA se debe revisar si este aplica para otras fallas funcionales del mismo equipo (marcadas con X en la misma línea en la Tabla 8).

El resultado de este ejercicio para el SFA del estudio se muestra en la Tabla 9, donde se especificaron los modos de falla más relevantes para cada equipo en términos de consecuencia, probabilidad de ocurrencia y las recomendaciones de los Handbooks de (ASHRAE, 2015, 2018). Es importante aclarar que los efectos especificados aquí son descritos de forma cualitativa porque el impacto real puede variar mucho en función de diferentes variables como el tamaño o capacidad del SFA, cantidad de refrigerante, longevidad de los equipos, factores administrativos o de operación, por mencionar los más evidentes. En este punto es oportuno realizar las siguientes afirmaciones:

- Los efectos más graves se presentan cuando hay pérdida de refrigerante del sistema, porque involucra, además de la afectación en la operación por la afectación de las temperaturas de los equipos, sino por el aumento en el consumo energético por la pérdida de capacidad, el impacto ambiental, la necesidad de reposición del fluido y la premura con que se debe atender la contingencia (cada segundo que se pierde refrigerante se aumenta el costo de la reparación).
- La merma de productos es un riesgo inminente en la mayoría de los modos de falla, lo que se traduce en pérdida de producción (venta) y aumento de costo operacional.

Tabla 9 Análisis de modos y efectos de falla

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
1.3	1	Sistema de compresión	1.1	Compresor apagado	Lubricación deficiente	Mayor demanda del resto de compresores, mayor gasto energético	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T	Merma de productos, costo de operación aumenta, disminuye la producción	S
2.3	1	Sistema de compresión	1.2	Válvula lubricadora obstruida	Contaminación excesiva del aceite	Se apaga el resto de los compresores	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en la T	Merma de productos, costo de operación aumenta, disminuye la producción	S
9.1	1	Sistema de compresión	1.3	Empaques de compresor rotos	Tolerancias excesivas	Aumenta el tiempo de trabajo de los compresores, mayor gasto energético, compresor fuera de servicio	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T, pérdida de refrigerante	Merma de productos, costo de operación aumenta, consumo de refrigerante, disminuye la producción, contaminación ambiental	S
3.1	2	Evaporador	2.1	Ubicación errada de sonda	Soporte deficiente	Fallas potenciales adicionales, Merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	S
3.2	2	Evaporador	2.2	Serpentín obstruido/sucio	Acumulación de hielo/suciedad	Deterioro acelerado del serpentín	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	S

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
3.3	2	Evaporador	2.3	Ventiladores apagados	Cortocircuito en motor	Daño de componente, fallas potenciales adicionales, Merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	N
4.1	2	Evaporador	2.4	Ventiladores con sobrevoltaje	Conexión eléctrica errada	Pérdida de función, ineficiencias en el proceso	Ninguno	Ninguno	N
5.3	2	Evaporador	2.5	Ventiladores con giro invertido	Conexión eléctrica errada	Fallas potenciales adicionales, posibilidad de daño del componente, merma de productos	Ninguno	Ninguno	N
6.3	2	Evaporador	2.6	Serpentín bloqueado	Calibración deficiente	Merma de productos, retención de refrigerante sin uso efectivo	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T	Ninguno	S
9.1	2	Evaporador	2.7	Tubería de evaporador con fuga	Soldadura débil	Parada del equipo para detener la pérdida de fluido refrigerante,	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T, pérdida de	Merma de productos, costo de operación aumenta, consumo de refrigerante, disminuye la	S

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
						pérdida de eficiencia	nivel de refrigerante	producción, contaminación ambiental	
3.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.1	Elemento ecualizador bloqueado	Contaminantes en el refrigerante	Daño de componente, fallas potenciales adicionales, Merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	S
3.2	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.2	Elemento de expansión con restricción excesiva	Calibración deficiente	Pérdida de función, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Ninguno	Ninguno	S
5.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.3	Elemento de expansión con apertura excesiva	Calibración deficiente	Merma de productos, retención de refrigerante sin uso efectivo	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T	Ninguno	S
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.4	Tuerca flare rota	Torque excesivo	Pérdida de refrigerante, bloqueo del elemento ecualizador, pérdida de la función	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T, pérdida de nivel de refrigerante	Merma de productos, costo de operación aumenta, consumo de refrigerante, contaminación ambiental	S

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.5	Tuerca flare suelta	Torque deficiente	Pérdida de refrigerante, bloqueo del elemento equalizador, pérdida de la función	Pérdida de capacidad frigorífica, aumento en las T, pérdida de nivel de refrigerante	Merma de productos, costo de operación aumenta, consumo de refrigerante, disminuye la producción, contaminación ambiental	S
1.1	4	Condensador	4.1	Ventilador detenido	Bobinado aterrizado	Pérdida de función, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno, dependiendo redundancias existentes	S
1.2	4	Condensador	4.2	Serpentín obstruido/sucio	Acumulación de suciedad	Pérdida de capacidad, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno, dependiendo redundancias existentes	S
1.4	4	Condensador	4.3	Serpentín perforado	Caída de ventilador	Pérdida de refrigerante, se requiere cambio del serpentín o correctivo muy complejo e inseguro	Pérdida total de refrigerante, grandes mermas de producto	Altísimo consumo de refrigerante, costo operacional aumenta significativamente	S

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
3.3	4	Condensador	4.4	Condensador apagado	Sobrecorriente	Presión de descarga se eleva indefinidamente hasta activar protecciones, si las hay	Pérdida total de función, posible pérdida de refrigerante	Costo de operación aumenta, disminuye la producción	S
8.1	4	Condensador	4.5	Ventiladores sin control, siempre ON	Conexión eléctrica errada	Pérdida de capacidad, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Compresores se pueden apagar por medio del control, posible pérdida parcial o total de función	Costo de operación aumenta, disminuye la producción	S
2.2	5	Sistema de tuberías	5.1	Tubería obstruida internamente	Acumulación de contaminantes	Pérdida de capacidad, ineficiencias en el proceso	Posible afectación a los compresores o DCFR	Posible merma de productos, costo de operación aumenta	S
2.3	5	Sistema de tuberías	5.2	Tubería o accesorio fracturado	Vibración excesiva	Pérdida de refrigerante y aceite, parada extensa del equipo	Pérdida total o parcial de función, merma de productos	Merma de productos, costo de operación aumenta, consumo de refrigerante, disminuye la producción, contaminación ambiental	S
3.1	5	Sistema de tuberías	5.3	Caída de presión excesiva	Diseño errado	Pérdida de capacidad, ineficiencias en	Mayor demanda de refrigerante,	Costo de operación aumenta	S

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla			LTA
						Local (equipo)	Sistema	Planta	
						el proceso, es posible merma de productos	mayor consumo energético		
3.1	6	Sistema de control	6.1	Lectura de temperatura errada	Sensor con indicación errada	Pérdida de capacidad, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Costo de operación aumenta	S
11.1	6	Sistema de control	6.2	Contacto desconectado	Torque deficiente	Pérdida de función, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	S
12.1	6	Sistema de control	6.3	Reseteo/desconfiguración de controlador	Batería de reserva agotada	Pérdida de función, ineficiencias en el proceso, es posible merma de productos	Mayor demanda de refrigerante, mayor consumo energético	Ninguno	S

6.6. Árbol lógico de decisión

Los modos de falla que en el FMEA fueron seleccionados para ser analizados en este paso serán priorizados según el análisis del árbol lógico de decisión. Esta estructura del proceso RCM permite clasificar los diferentes modos de falla que sobrevivieron al paso anterior de manera rápida y precisa, a través de una lógica de 3 preguntas simples con respuestas afirmativas o negativas únicamente.

Los modos de falla serán identificados en una de las siguientes 3 categorías: relacionados con seguridad, operación y económicos. También se podrá reconocer si estos son evidentes para el operador o no. En la Figura 13 se muestra una adaptación del árbol lógico de decisión (LTA) en el que se especifica el proceso a seguir para el desarrollo de este análisis y los resultados que se obtendrán.

Cuando el proceso del árbol lógico de decisión haya terminado los modos de falla se habrán clasificado en una de las siguientes seis opciones: A, B, C, D/A, D/B o D/C. Con base en estos resultados se priorizará la asignación de recursos en el siguiente paso de la metodología RCM. En la Tabla 10 se resumen los resultados obtenidos para los modos de falla analizados, donde se evidencia que, de los modos de falla relacionados en el árbol lógico, sólo uno fue categorizado como problema económico menor, lo que evidencia la aplicabilidad al momento de establecer los modos de falla.

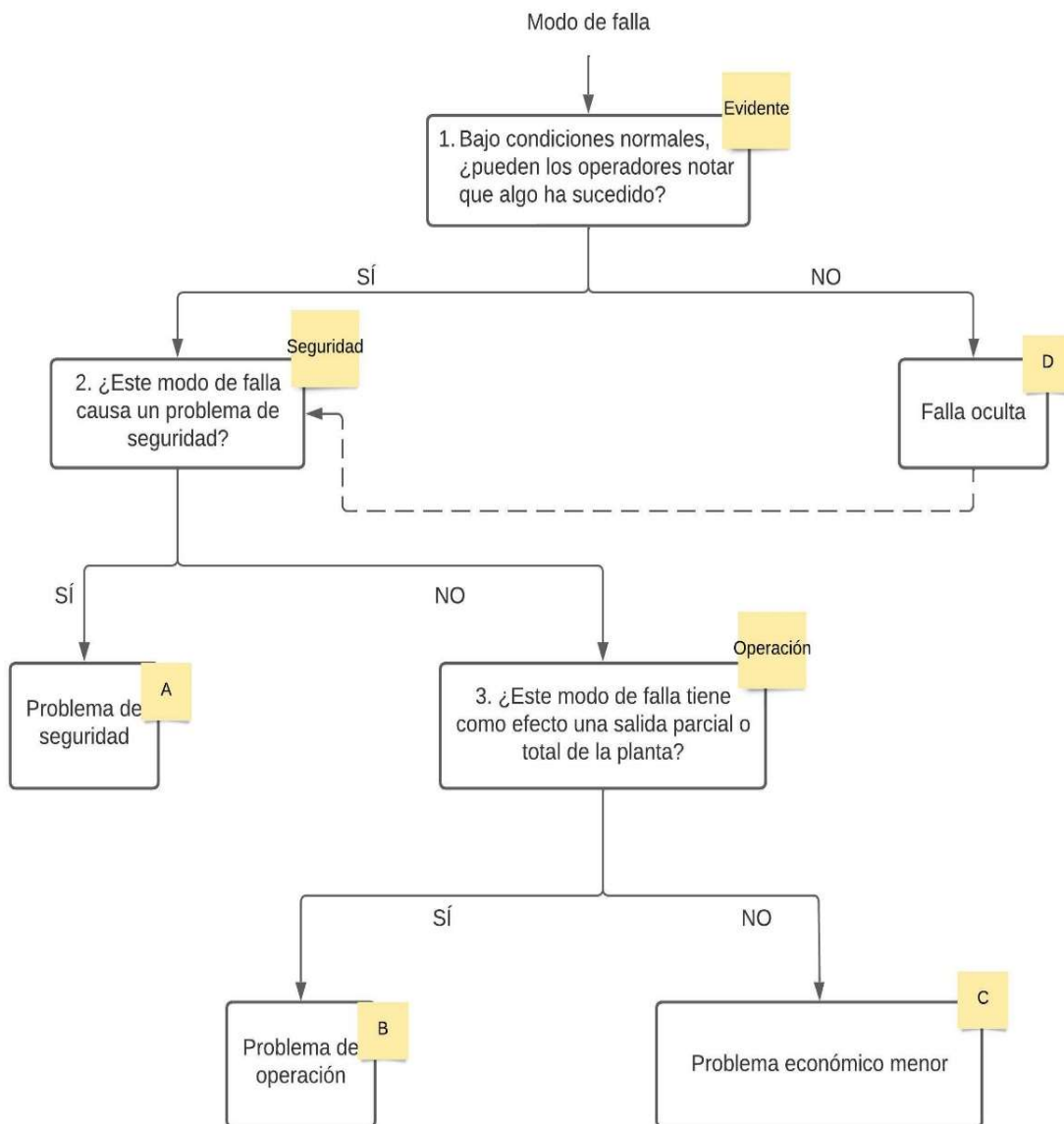


Figura 13 Árbol lógico de decisión para modos de falla.

Nota. Adaptado de (Smith & Hinchcliffe, 2004) (p. 110).

Tabla 10 Resultados del LTA para los modos de falla

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	¿Evidente?	Seguridad	Operación	Categoría	Comentarios
1.3	1	Sistema de compresión	1.1	Compresor apagado	SI	NO	SI	B	
2.3	1	Sistema de compresión	1.2	Válvula lubricadora obstruida	SI	NO	SI	B	
9.1	1	Sistema de compresión	1.3	Empaques de compresor rotos	NO	NO	SI	D/B	
3.1	2	Evaporador	2.1	Ubicación errada de sonda	SI	NO	SI	B	
3.2	2	Evaporador	2.2	Serpentín obstruido/sucio	SI	NO	SI	B	
6.3	2	Evaporador	2.6	Serpentín bloqueado	SI	NO	SI	B	
9.1	2	Evaporador	2.7	Tubería de evaporador con fuga	NO	SI	SI	D/A	
3.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.1	Elemento ecualizador bloqueado	NO	NO	SI	D/B	
3.2	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.2	Elemento de expansión con restricción excesiva	NO	NO	SI	D/B	
5.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.3	Elemento de expansión con apertura excesiva	NO	NO	SI	D/B	
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.4	Tuerca flare rota	NO	SI	SI	D/A	
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.5	Tuerca flare suelta	NO	SI	SI	D/A	
1.1	4	Condensador	4.1	Ventilador detenido	SI	NO	SI	B	
1.2	4	Condensador	4.2	Serpentín obstruido/sucio	SI	NO	SI	B	
1.4	4	Condensador	4.3	Serpentín perforado	NO	NO	SI	D/B	
3.3	4	Condensador	4.4	Condensador apagado	NO	NO	SI	D/B	
8.1	4	Condensador	4.5	Ventiladores sin control, siempre ON	NO	NO	SI	D/B	
2.2	5	Sistema de tuberías	5.1	Tubería obstruida internamente	NO	NO	SI	D/B	
2.3	5	Sistema de tuberías	5.2	Tubería o accesorio fracturado	NO	NO	SI	D/B	
3.1	5	Sistema de tuberías	5.3	Caída de presión excesiva	NO	NO	NO	D/C	
3.1	6	Sistema de control	6.1	Lectura de temperatura errada	NO	NO	SI	D/B	
11.1	6	Sistema de control	6.2	Contacto desconectado	NO	NO	SI	D/B	
12.1	6	Sistema de control	6.3	Reseteo/desconfiguración de controlador	NO	NO	SI	D/B	

6.7. Selección de actividades de mantenimiento

En este último paso de la metodología RCM, la misión es determinar cuáles son las actividades de mantenimiento aplicables para cada uno de los modos de falla definidos y priorizados como A, D/A, B y D/B en el paso anterior. Estas actividades deben cumplir con dos premisas importantes para poder ser consideradas en el proceso RCM:

- Aplicable, la actividad debe prevenir o mitigar la falla, detectar su inicio o descubrir una falla oculta.
- Efectiva, la actividad es la opción más efectiva en términos de costo entre las candidatas.

Si en el estudio de las alternativas no existen actividades que cumplan con ambos criterios, entonces el camino será dejar correr a la falla, a menos que esté relacionada en los grupos A o D/A, relativos a la seguridad del personal. En la metodología RCM existe una hoja de ruta para ayudar al analista a desarrollar con criterio lógico las actividades de mantenimiento candidatas para cada modo de falla; esta se resume en la Figura 14 que se presenta a continuación. Las actividades que se colocarán como candidatas se respaldarán de las recomendaciones de (ACCA, 2021; ASHRAE, 2015, 2018), así como de la experiencia del autor/analista, siempre y cuando esté alineado a las mismas.

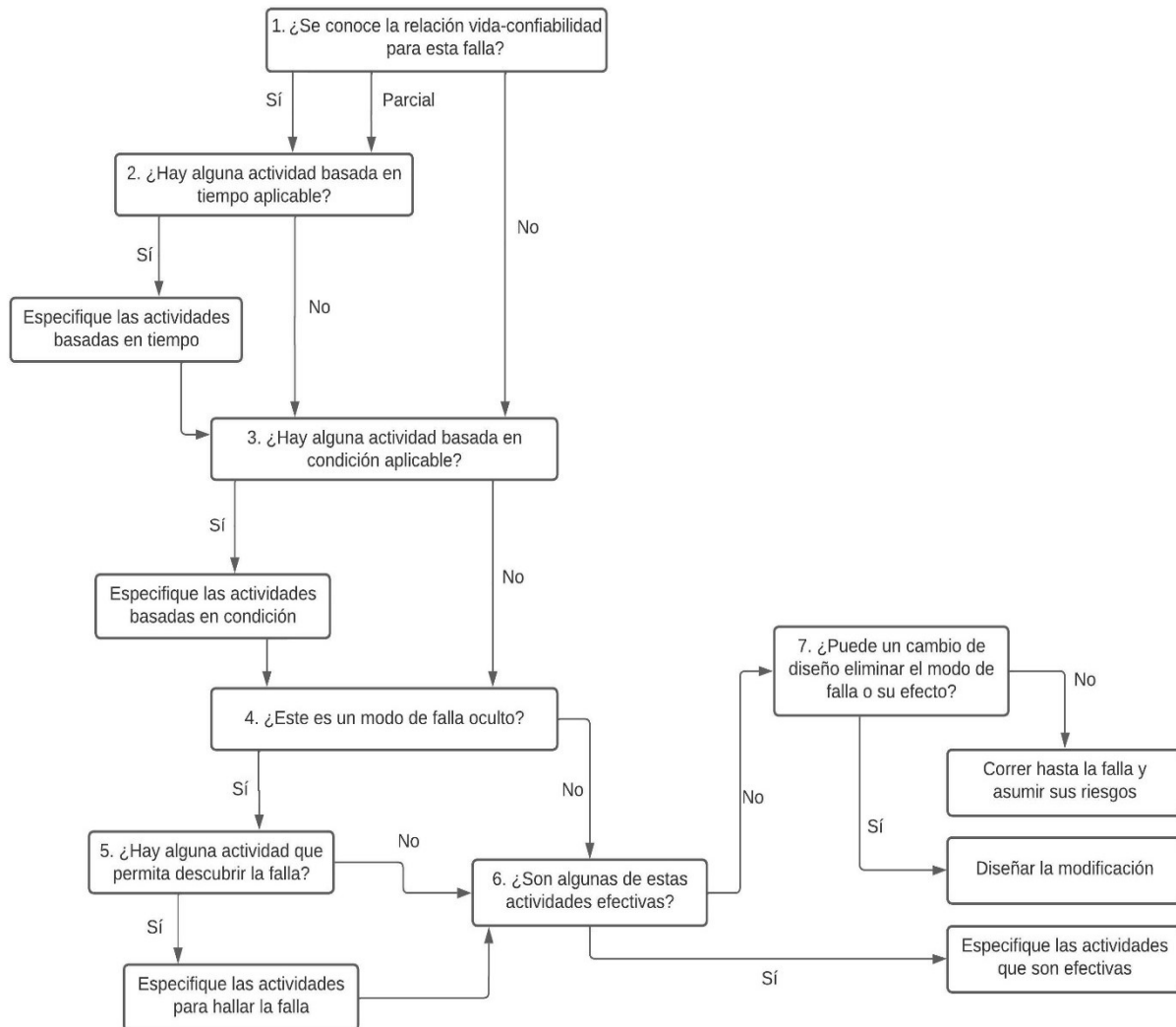


Figura 14 Hoja de ruta para selección de actividades de mantenimiento preventivo.

Nota. Adaptado de (Smith & Hinchcliffe, 2004) (p. 114).

En el presente trabajo y para el SFA tipo definido el autor se refirió a los capítulos 1, 5, 7, 9, 14 y 15 del Handbook de Refrigeración (ASHRAE, 2018). Para complementar estas recomendaciones y aterrizar específicamente en las actividades el autor se refirió a la sección 5 ANSI/ACCA Standard 14 (ACCA, 2021), “Maintenance Tasks” (5.10 para evaporadores y DCFR; 5.9 para el resto de los equipos). Al momento de una implementación con un sistema específico se deben revisar los 14 checklist para definir las actividades para cada tipo de equipo o componente

que incluya el sistema; si ninguno de estos checklist aplica para algún equipo específico se podrá construir uno particular para el equipo con las actividades que apliquen de los checklist 5.1 a 5.14.

En la Tabla 11 se muestra el resultado del ejercicio de selección de las actividades de mantenimiento preventivo producto de esta investigación. Para todos los modos de falla se respondió negativo en la pregunta 1 porque esta información es específica del historial del sistema; por otro lado, no pertenece al alcance de este trabajo el considerar la posibilidad de rediseño de algún equipo del sistema ya que para realizar este ejercicio con criterio estrictamente técnico se debe contar con información específica del contexto operacional del equipo, su ubicación física, características técnicas, longevidad e historial de intervenciones de mantenimiento, información con la que no se cuenta por tratarse de un SFA tipo para referencia. Por lo anterior, la pregunta 7 no aplica para este ejercicio, por lo que no se respondió en ningún caso.

Tabla 11 Selección de actividades de mantenimiento preventivo.

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	1	2	3	4	5	6	7	Actividad candidata	Frecuencia estimada
1.3	1	Sistema de compresión	1.1	Compresor apagado	Lubricación deficiente	N	N	S	N	N	S	-	Revisar nivel y presión de aceite en reservorio y compresores	Trimestral
2.3	1	Sistema de compresión	1.2	Válvula lubricadora obstruida	Contaminación excesiva del aceite	N	N	S	S	S	S	-	Verificar caída de presión en los filtros de lubricante y separador	Trimestral
9.1	1	Sistema de compresión	1.3	Empaques de compresor rotos	Tolerancias excesivas	N	N	N	S	S	S	-	Detección de fugas con luz ultravioleta y líquido fluorescente	Mensual
3.1	2	Evaporadores	2.1	Ubicación errada de sonda	Soporte deficiente	N	N	N	N	N	N	-	Correr hasta la falla funcional	-
3.2	2	Evaporadores	2.2	Serpentín obstruido/sucio	Acumulación de hielo/suciedad	N	N	S	N	N	S	-	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral
6.3	2	Evaporadores	2.6	Serpentín bloqueado	Calibración deficiente	N	N	S	N	N	S	-	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral
9.1	2	Evaporadores	2.7	Tubería de evaporador con fuga	Soldadura débil	N	N	N	S	S	S	-	Detección de fugas con luz ultravioleta y líquido fluorescente	Mensual
3.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.1	Elemento ecualizador bloqueado	Contaminantes en el refrigerante	N	N	S	N	N	S	-	Verificar presencia de estrangulamientos en filtros o válvulas, cambiar si se requiere	Trimestral
3.2	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.2	Elemento de expansión con restricción excesiva	Calibración deficiente	N	N	S	N	N	S	-	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	1	2	3	4	5	6	7	Actividad candidata	Frecuencia estimada
5.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.3	Elemento de expansión con apertura excesiva	Calibración deficiente	N	N	S	S	S	S	-	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.4	Tuerca flare rota	Torque excesivo	N	N	N	S	S	S	-	Revisar estado y torquar las conexiones mecánicas	Trimestral
9.1	3	Dispositivos de control de flujo de refrigerante	3.5	Tuerca flare suelta	Torque deficiente	N	N	N	S	S	S	-	Revisar estado y torquar las conexiones mecánicas	Trimestral
1.1	4	Condensador	4.1	Ventilador detenido	Bobinado aterrizado	N	N	S	N	N	S	-	Medir aislamiento eléctrico del bobinado de cada ventilador	Anual
1.2	4	Condensador	4.2	Serpentín obstruido/sucio	Acumulación de suciedad	N	S	N	N	N	S	-	Realizar limpieza de serpentín con desincrustante, si se requiere	Trimestral
1.4	4	Condensador	4.3	Serpentín perforado	Caída de ventilador	N	N	S	S	N	S	-	Inspección de ruidos y vibraciones anormales	Trimestral
3.3	4	Condensador	4.4	Condensador apagado	Sobrecorriente	N	N	S	N	N	S	-	Medir parámetros de operación del condensador y de cada motor	Trimestral
8.1	4	Condensador	4.5	Ventiladores sin control, siempre ON	Conexión eléctrica errada	N	N	N	S	S	S	-	Revisar el correcto funcionamiento de los elementos de control	Anual
2.2	5	Sistema de tuberías	5.1	Tubería obstruida internamente	Acumulación de contaminantes	N	N	S	S	S	S	-	Realizar prueba de acidez a una muestra del aceite	Anual

# FF	Equipo	Descripción del equipo	# MF	Modo de falla	Causa de falla	1	2	3	4	5	6	7	Actividad candidata	Frecuencia estimada
2.3	5	Sistema de tuberías	5.2	Tubería o accesorio fracturado	Vibración excesiva	N	N	S	N	S	S	-	Verificar que los soportes y conexiones de la tubería estén bien asegurados	Anual
3.1	5	Sistema de tuberías	5.3	Caída de presión excesiva	Diseño errado	N	N	N	N	N	N	-	Correr hasta la falla funcional	-
3.1	6	Sistema de control	6.1	Lectura de temperatura errada	Sensor con indicación errada	N	N	N	N	S	S	-	Comparación de medida con instrumento externo, si hay valores anormales, cambiar el sensor	Anual
11.1	6	Sistema de control	6.2	Contacto desconectado	Torque deficiente	N	S	N	S	S	S	-	Revisar estado y torquar las conexiones del sistema de control	Trimestral
12.1	6	Sistema de control	6.3	Reseteo/desconfiguración de controlador	Batería de reserva agotada	N	N	N	S	N	N	-	Correr hasta la falla funcional	-

6.7.1. Actividades de mantenimiento preventivo para el SFA

Las actividades seleccionadas a través del proceso RCM permitirán organizar el plan de mantenimiento para el SFA seleccionado, distribuyendo su ejecución en ciclos anuales. Las actividades de un equipo se pueden extender a otros, por ejemplo, la detección de fugas de refrigerante, que debe hacerse en todos los equipos excepto el sistema de control. Al organizar las actividades en las filas de una tabla contra los 12 meses de un año podemos, visualmente y por iteración, establecer la mejor manera de distribuir estas tareas en el ciclo. En la Tabla 12 se muestra el resultado de este ejercicio, en el que se tomaron en cuenta los siguientes criterios para la organización de las actividades en el calendario:

- Iniciar el plan de mantenimiento con las actividades de los equipos de mayor criticidad, en este caso, sistema de compresión y sistema de tuberías; así el mantenedor podrá, desde el primer momento en que se implemente el plan, saber el estado de los equipos y tomar las acciones correctivas a que haya lugar con prontitud, para garantizar que las fallas que más repercuten en el global del sistema
- Dar prioridad al inicio de las actividades que repercuten y permiten control directo de variables de resultado final del sistema, como las temperaturas de los espacios refrigerados (evaporadores y dispositivos de control de flujo de refrigerante)
- La inspección de ruidos y vibraciones se recomienda que sea mandatorio se haga en el primer mes, ya que un desajuste muy grande en los motores de este equipo puede repercutir, en el peor de los casos, en la caída de un ventilador en el serpentín, la generación de una fuga de refrigerante de alta presión que vaciará por completo la carga del fluido en el sistema, generando una contingencia general en el almacén retail
- Distribuir equitativamente la carga de trabajo a lo largo del año, moviendo estratégicamente las actividades entre meses para estabilizar la variación del costo del plan en el año y optimizar la cantidad de recurso humano requerido para cumplir con el plan de mantenimiento
- Dependiendo de la cantidad de evaporadores que tenga el sistema, las actividades sugeridas para este equipo se pueden realizar mensualmente, pero en diferentes evaporadores con base en el criterio anterior.

Tabla 12 Propuesta de plan de mantenimiento para el SFA.

Descripción del equipo	Actividad a ejecutar	Frecuencia	Propuesta de Calendario de ejecución (meses)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sistema de compresión	Revisar nivel y presión de aceite en reservorio y compresores	Trimestral	x			x				x			x		
Sistema de compresión	Verificar caída de presión en los filtros de lubricante y separador	Trimestral	x			x				x			x		
Sistema de compresión, sistema de tuberías, evaporadores, DCFR y condensador	Detección de fugas con luz ultravioleta y líquido fluorescente	Mensual	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Evaporadores, DCFR	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral		x				x							x
Evaporadores	Realizar limpieza de serpentín con desincrustante, si se requiere	Mensual	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Dispositivos de control de flujo de refrigerante, DCFR	Verificar presencia de estrangulamientos en filtros o válvulas, cambiar si se requiere	Trimestral		x				x							x
Dispositivos de control de flujo de refrigerante, DCFR	Medir el sobrecalentamiento del evaporador, ajustar si es necesario	Trimestral		x				x							x
Dispositivos de control de flujo de refrigerante, DCFR	Revisar estado y torquar las conexiones mecánicas	Trimestral		x				x							x
Condensador	Medir con megger el bobinado de cada ventilador	Anual													x
Condensador	Realizar limpieza de serpentín con	Trimestral	x			x							x		

Descripción del equipo	Actividad a ejecutar	Frecuencia	Propuesta de Calendario de ejecución (meses)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	desincrustante, si se requiere														
Condensador, sistema de compresión	Inspección de ruidos y vibraciones anormales	Trimestral	x			x				x				x	
Condensador	Medir parámetros de operación del condensador y de cada motor	Trimestral	x			x				x				x	
Condensador	Revisar el correcto funcionamiento de los elementos de control	Anual				x									
Sistema de tuberías	Realizar prueba de acidez a una muestra del aceite	Anual	x												
Sistema de tuberías	Verificar que los soportes y conexiones de la tubería estén bien asegurados	Anual	x												
Sistema de control	Comparación de medida con instrumento externo, si hay valores anormales, cambiar el sensor	Anual													x
Sistema de control	Revisar estado y torquear las conexiones del sistema de control	Trimestral				x				x				x	

El hecho de especificar el método de búsqueda de fugas a emplear va directamente alineado con la necesidad de que la actividad sea eficaz para detectar la falla funcional y, por lo tanto, solucionarla o mitigarla. Existen muchas tecnologías para la detección de fugas, y la elección de la alternativa a elegir dependerá de muchos factores, como la disponibilidad en el mercado, el acceso físico a la red de tuberías y el presupuesto para el plan de mantenimiento; desde la experiencia del autor la tecnología de luz ultravioleta y líquido fluorescente brinda muy buenos resultados, ya que logra detectar microfugas que con otras metodologías sería más difícil evidenciar, además de que

indica el lugar exacto donde se está escapando el fluido refrigerante o lubricante. Estos productos se pueden conseguir con fabricantes como Spectroline, Mastercool, entre otras; el kit normalmente incluye una linterna de luz ultravioleta, gafas oscuras, una muestra del líquido fluorescente (aceite que se mezcla con los fluidos del propio sistema sin afectar sus propiedades) y un aplicador que facilita la inyección del líquido en el sistema.

Con la información contenida en la Tabla 12 se da cumplimiento al segundo objetivo específico de este trabajo, especificando un conjunto de actividades preventivas y una ruta de ejecución con frecuencias establecidas que permitirá mitigar significativamente los efectos de las fallas en el SFA y mejorar las prestaciones de este para aportar a los resultados del negocio.

6.7.2. Variables de monitoreo

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, en esta sección se brindarán lineamientos estratégicos para llevar a cabo un control de variables asertivo para tener certeza del estado de operación del sistema de frío alimentario. Dentro de las actividades especificadas en el punto anterior existen variables que se controlan periódicamente para evidenciar fallas ocultas o potenciales antes de que comprometan la funcionalidad del SFA y las temperaturas de los espacios refrigerados para la conservación de los productos alimenticios perecederos. El equipo de mantenimiento encargado del SFA debe velar por la presencia de instrumentos de medida óptimos para capturar las mediciones de estas variables y llevar una trazabilidad de su comportamiento en el tiempo, con el mayor nivel de detalle que la realidad de su contexto operacional le permita. A continuación, recopilamos las variables principales que se recomienda monitorear periódicamente ya que permiten identificar si los equipos están cumpliendo con la función que se espera de ellos y actuar oportunamente para corregir en caso de que no se cumplan los rangos establecidos:

- **Sobrecalentamiento (Superheat) de evaporadores:** esta variable permite medir el funcionamiento del evaporador en la transferencia de calor al refrigerante, un sobrecalentamiento muy alto indica que el flujo de refrigerante no es suficiente para realizar un óptimo intercambio de calor con el espacio refrigerado y la temperatura alcanzada en este último será mayor a la requerida. Por otro lado, si este parámetro es muy cercano a

cero (0) se corre el riesgo de que llegue refrigerante en estado líquido al sistema de compresión, por lo que su monitoreo permite garantizar la protección de este modo de falla.

- **Subenfriamiento (Subcooling) del condensador:** con este parámetro se controla el rendimiento del condensador en convertir el refrigerante del estado gaseoso al líquido y la extracción del calor ganada por el refrigerante en los evaporadores para garantizar disponibilidad de capacidad frigorífica del fluido en el siguiente ciclo de evaporación. Un valor muy bajo de este parámetro, cercano a cero, indicará una disminución en la capacidad de transferencia de calor del condensador, lo que llevará a investigar las causas de esa pérdida de eficiencia que pueden ser tan variadas como una falla en uno de los motores, un aumento en la carga térmica por temperaturas ambiente muy altas o la obstrucción del serpentín con elementos extraños o suciedad.
- **Caída de presión en filtros y tuberías:** la diferencia de presión entre el antes y el después de un elemento filtrante, cualquiera que sea su tipo, nos indica saturación del componente y la pérdida de su capacidad de contener contaminantes que puede estar presentes en los fluidos del sistema.
- **Temperaturas de los espacios refrigerados:** el seguimiento de estas variables, que son el resultado final que se espera de un sistema de frío, nos permite identificar si las actividades que estamos realizando están siendo efectivas para el cumplimiento de la función del sistema. Una tendencia de aumento en alguna de estas temperaturas puede ser indicador del deterioro del estado físico o la capacidad frigorífica del evaporador; si el aumento es generalizado en los diferentes evaporadores, el problema puede encontrarse en los equipos que afectan el sistema en general.
- **Presiones del sistema:** teniendo en cuenta que los niveles de los fluidos del sistema son muy variables en función de la fluctuación de la carga térmica del SFA por factores exógenos, su control por sí solo no permitirá tener una idea acertada del estado del sistema. Esta se debe complementar con el seguimiento a las presiones de succión, descarga y de aceite, en paralelo con el estado de operación de los compresores y motores del condensador, así como las condiciones externas al sistema (temperatura ambiente exterior y de los alrededores de los evaporadores de exhibidores abiertos, temperatura de recibo de los productos refrigerados, entre otros).

6.7.3. Propuesta de stock de repuestos

En el cuarto objetivo específico del trabajo se planteó proponer una guía para el manejo de un stock de repuestos para el retailer en base a los elementos que se hayan definido para correr hasta la falla. El principal motivo por el cual se estudia la alternativa de un stock de repuestos es la de minimizar los tiempos de respuesta en caso de una falla en el sistema, ya que durante el tiempo que se extienda la falla estarán ocurriendo varios eventos que representarán pérdidas económicas significativas para el retailer: El deterioro de las condiciones organolépticas de los productos y la imposibilidad de vender estos productos por no poder ser exhibidos al público por el riesgo de afectaciones de la salud en los consumidores.

Para una correcta evaluación de la viabilidad de la implementación de un stock de repuestos para el SFA se debe tener a disposición la información referente al costo del inventario de productos almacenado en cada equipo del sistema; esta información permitirá decidir el presupuesto que es económicamente eficiente asignar para este fin. En la literatura se encuentran muchas metodologías para este fin y es plena libertad del encargado de este ejercicio seleccionar la que más se ajusta al contexto operacional aplicable, pero en general debería ser máximo, según la experiencia, la posibilidad de resguardar el producto en otro espacio refrigerado, la disponibilidad del repuesto en el mercado y/o el consumo histórico de los repuestos involucrados, alrededor del 5% del costo del inventario de productos en riesgo en la falla hipotética.

La no existencia de redundancias en el SFA para el equipo o componente es un factor que influye mucho en la decisión de incluir un repuesto en el stock y, si se define incluirlo, en las unidades o cantidad a adquirir y mantener en inventario. Además, algunos de estos repuestos pueden estar presentes en varios equipos del sistema, por lo aumentará la probabilidad de llegar a requerir el repuesto (dependiendo la estandarización de modelos o marcas). Por lo general, en los SFA se encuentran componentes sin redundancias que tienen un costo significativamente bajo y con certeza vale la pena considerarlos si se quiere contar con esta alternativa en la política de mantenimiento. A continuación, algunos ejemplos:

- Motores de evaporadores, la falla de uno de estos afecta la tasa de transferencia de calor entre el refrigerante que circula en los evaporadores y el aire del espacio refrigerado, provocando la pérdida de función en la sección afectada del exhibidor.

- Sondas de temperatura, es el instrumento que realiza la medición de la temperatura de los espacios refrigerados y la convierte en una señal para que el controlador de temperatura realice una u otra acción para garantizar alcanzar la temperatura solicitada por el usuario. De acuerdo con la configuración de la distribución del sistema de tuberías y los evaporadores, uno o más espacios refrigerados entrarán en falla, poniendo en riesgo todos los productos almacenados en ellos.
- Controladores de temperatura, en línea con lo descrito para las sondas, si el controlador no recibe o no procesa correctamente la lectura de temperatura, uno o más espacios refrigerados entrarán en falla, poniendo en riesgo todos los productos almacenados en ellos.

Por otro lado, hay un elemento que el autor considera importante que se evalúe involucrar para el análisis de stock de repuestos: el fluido refrigerante. Si bien este elemento normalmente es bastante costoso y en los SFA de los supermercados, caso de estudio de este trabajo, se requieren grandes cantidades para lograr el correcto funcionamiento del sistema, resulta una alternativa atractiva debido a la probabilidad tan alta de ocurrencia de fugas de refrigerante y la dificultad para evidenciarlas oportunamente. Sin embargo, se debe tener cuidado con evitar caer en la mala práctica de no buscar minuciosamente la presencia de fugas de refrigerante en el sistema por la facilidad que se tiene de reponer la carga requerida por la presencia del elemento en inventario. se debe mantener como máxima prioridad el evitar el escape de refrigerante al medio ambiente, por el alto potencial de contaminación que estos fluidos generan, así como el impacto en el fenómeno del calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono.

7. Discusión

Con la culminación exitosa del proceso de la metodología RCM se obtuvo un plan de mantenimiento que abarca los diferentes componentes del SFA con actividades respaldadas técnicamente por estándares y manuales de asociaciones técnicas que llevan la vanguardia en el área de la refrigeración como (ASHRAE, 2015, 2018) y (ACCA, 2021). En este trabajo se propone impulsar el uso de la capacidad tecnológica disponible para adquirir la mayor cantidad de datos del sistema que permita tener un punto para el control de su rendimiento, identificar oportunamente la presencia de fallas en los diferentes equipos que lo componen y mitigar el efecto que estas puedan tener para la operación del supermercado (Smith & Hinchcliffe, 2004).

Conseguir enlazar los diferentes equipos que componen el sistema de frío en el plan de mantenimiento propuesto representa un paso importante en la búsqueda constante de la mejora de la confiabilidad de los elementos que componen la cadena de frío para los productos alimenticios. En la bibliografía revisada previamente se encontraban planes de mantenimiento para uno o 2 equipos máximo por lo que no se lograba abarcar la influencia del resto de componentes en las fallas del sistema; por otro lado, muchas de las actividades allí planteadas resultan bastante costosas para el mantenimiento de los equipos, ya que implican procedimientos invasivos que representan un riesgo alto para la conservación de la vida útil e integridad física de los equipos. La mayoría de las actividades planteadas en este trabajo no son invasivas y se pueden realizar en una ruta de mantenimiento sin necesidad de interrumpir la operación del SFA y poner en riesgo los alimentos perecederos que se resguardan en él.

Los resultados de este trabajo pueden ser utilizados como insumo para otras investigaciones referentes al mantenimiento de sistemas de refrigeración en general, haciendo la claridad de qué se deben considerar los factores propios del contexto operacional del sistema de refrigeración que se quiera estudiar. Algunos de estos factores pueden ser la cantidad de equipos, la finalidad última del proceso de refrigeración, el tipo de negocio, ubicación geográfica y condiciones climatológicas; estos permitirán acotar de manera específica para cada caso la criticidad de los equipos del sistema siguiendo la metodología propuesta en el presente trabajo.

8. Conclusiones

El presente trabajo cumple con el objetivo planteado al inicio de la investigación de generar un plan de mantenimiento que permita disminuir significativamente la ocurrencia de fallas en un sistema de frío alimentario para supermercados del sector retail. Se desarrolló estrictamente la metodología RCM según los lineamientos de los autores de la temática; gracias a este ejercicio se logró un plan de mantenimiento que cumple con los cuatro principios básicos para ser considerado una aplicación fiel de la metodología (Smith & Hinchcliffe, 2004). Primero, las actividades se dirigen a preservar las funciones de los equipos, más no los equipos en sí, lo cual viene como consecuencia intrínseca de la correcta aplicación de la metodología y el plan de mantenimiento resultante; se identificaron los modos de falla que conllevan a que los equipos no puedan prestar la función que se espera de ellos, los cuales se priorizan de manera objetiva en función de su criticidad, que viene dada por los factores de consecuencia y la probabilidad de ocurrencia. Más adelante, se verificó la aplicabilidad y efectividad de las actividades de mantenimiento preventivo que se definieron para el plan usando las recomendaciones de los estándares técnicos del Handbook de Refrigeración (ASHRAE, 2018) y las actividades recomendadas por el Estándar 14 (ACCA, 2021).

La implementación de la metodología RCM en un sistema de frío alimentario del sector retail abre la puerta para que esta industria alcance mejores niveles de confiabilidad de sus equipos, lo que permitirá que quienes apliquen este plan de mantenimiento mejoren su competitividad en el mercado disminuyendo significativamente los costos de operación impactando un sistema que representa aproximadamente el 50% de su consumo energético y casi la mitad de las ventas totales de alimentos (ASHRAE, 2018). La reducción en el impacto ambiental del retail como resultado de la disminución de emisiones de gases refrigerantes a la atmósfera le permitirá a este sector económico mostrar un compromiso serio con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados por la ONU, especialmente el ODS 13 Acción por el clima, así como alinearse con los objetivos planteados en el marco de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) ("El Acuerdo de París | Naciones Unidas", 2015) lo que representaría un avance importante para el sector a nivel mundial ya que históricamente han tenido una contribución importante tanto en el calentamiento global como en la degradación de la capa de ozono (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Al controlar efectivamente los parámetros de operación más importantes del SFA con el plan de mantenimiento, se logra disminuir la merma de productos alimenticios por la ruptura de cadena de frío situación que, a todas luces, es beneficiosa tanto para el sector retail como para la comunidad en general. La reducción del desperdicio de alimentos es otro de los escenarios en que la implementación de este trabajo genera un impacto relevante para el sector del retail, abanderados en el ODS 12 Producción y consumo responsables (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Y los beneficios empiezan desde el mismo balance de pérdidas y ganancias de cada almacén donde se implemente este plan, ya que los montos económicos que tendrán que asumir por la merma de productos disminuirán significativamente.

El aumento de disponibilidad y confiabilidad que se espera lograr en los equipos del SFA donde se implemente esta metodología permitirá impactar positivamente en la reducción del lucro cesante ya que será mucho menor la cantidad de veces que se deberán activar planes de contingencia para resguardar productos alimenticios por una falla en el sistema de frío; también repercutirá en la imagen de la compañía brindando seguridad y confianza a sus clientes y consumidores, lo que puede incluso aumentar el volumen de ventas.

Todo lo anterior significa que la implementación de RCM en una cadena retail brinda la posibilidad de maximizar las utilidades del negocio desde muchas líneas: reducción de los costos operacionales, del gasto de mantenimiento y el impacto ambiental, así como el posicionamiento de la marca como una opción confiable para que los consumidores puedan adquirir sus productos perecederos siempre frescos y con la conservación de todas sus propiedades nutritivas y organolépticas.

9. Recomendaciones

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se recomienda desarrollar nuevas investigaciones relacionadas con la implementación de la metodología aquí descrita en sistemas frío alimentario en supermercados, realizando el ejercicio con el listado completo de equipos y una extensión más amplia de los modos de falla que pueden afectar a los diferentes equipos que este sistema puede tener. El historial de fallas propio del sistema brindará información importante para el análisis de modos y efectos de falla, lo que hará el resultado final tan extenso y minucioso como se precise, siempre y cuando sea técnica y económicamente viable.

Se recomienda evaluar la posibilidad de extender la presente investigación a otros sectores de la economía que utilicen sistemas de refrigeración en su proceso productivo, involucrando en el análisis las variables relevantes del contexto operacional de este nuevo sector, lo que puede variar en la priorización de modos de falla y actividades del plan de mantenimiento.

Las diferentes arquitecturas de construcción de los SFA en los que se aplique la metodología permitirán ampliar el conocimiento de los modos de falla presentes en este tipo de sistemas y complementar los resultados obtenidos aquí con información relevante de la influencia del diseño del sistema en su operación y mantenimiento. La inclusión de más tipologías de equipos extenderá los campos de aplicación de esta metodología y permitirán abarcar más categorías de almacenes con productos alimenticios refrigerados, así como otros eslabones de la cadena de frío como los centros de distribución y el transporte refrigerado.

10. Referencias

- ACCA. (2021). *Quality Maintenance of Commercial Refrigeration Systems*. www.acca.org
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE handbook: heating, ventilating, and air-conditioning applications, Inch - Pound Edition*.
- ASHRAE. (2018). *2018 ASHRAE handbook: refrigeration*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Codoceo Álvarez, C. S., & Gallardo Romo, A. M. (2017). *PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPO CRÍTICO DE FRIGORÍFICO EXSER LTDA*.
- Concha Vega, A. A., & Oyarce Quiroga, P. I. (2017). *ELABORACIÓN DE PLAN DE MANTENIMIENTO FRIGORÍFICO FIORDOSUR*.
- Cortés Urrego, A. G., & Valbuena Rojas, J. L. (2020). *Propuesta de un plan de mantenimiento basada en la metodología RCM para los equipos de refrigeración del laboratorio de virología del Instituto Nacional de Salud*.
- Herrera Olguín, J. I. (2018). *PROPUESTA DE MEJORA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO EN EQUIPOS FRIGORÍFICOS DE CENCOSUD*. UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
- Hundy, G. F., Trott, A. R., & Welch, T. C. (2016). *REFRIGERATION, AIR CONDITIONING AND HEAT PUMPS* (Fifth Edition).
- Kelly, T. J. (2003). *Fundamentals of refrigeration*.
- Loisel, J., Duret, S., Cornuéjols, A., Cagnon, D., Tardet, M., Derens-Bertheau, E., & Laguerre, O. (2021). Cold chain break detection and analysis: Can machine learning help? In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 112, pp. 391–399). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.052>
- Martínez, C. I. P., Poveda, A. C., & Barreto, D. R. T. (2021). Diagnosis and baseline refrigerant use in the Colombian meat, dairy, and fruit and vegetable industries. *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.08.017>
- El Acuerdo de París | Naciones Unidas. (2015). Retrieved 14 June 2022, from <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement> Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Agenda 2030 Sobre El Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Pilatte, A. (2005). *IIR Educational Course Refrigeration Fundamentals*.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM, A Gateway to World Class Maintenance*.

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7461-4.X5000-X>

Standards Norway. (2011). *NORSOK Standard Z-008 Risk based maintenance and consequence classification (3rd ed.)*. Lysaker, Norway.

Wang, S. K. (Shan K. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration*. McGraw-Hill.