

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**SEDE SAN JOAQUÍN – SANTIAGO DE CHILE**



**UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA**

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE  
MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) EN EL SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN COMERCIAL DE SANTA ISABEL QUILÍN**

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero  
en Mantenimiento Industrial

Alumno: Aníbal Alfonso Norambuena Silva

Profesor Guía: MSc. Eng. Cristian Cuadra Urbina

**2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) EN EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN COMERCIAL DE SANTA ISABEL QUILÍN

Nombre del candidato(a): Aníbal Alfonso Norambuena Silva

Carrera / Grado: Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Santiago San Joaquín; Departamento: Mecánica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Cuadra Urbina, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.


El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años


Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26-08-2025; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/08/2025; Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **RESUMEN**

Este documento presenta una propuesta de implementación de la metodología mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en el sistema de refrigeración comercial de Santa Isabel Quilín, estructurado en 3 etapas esenciales:

En la primera etapa, se conoció la empresa prestadora del servicio de mantenimiento Sustenta, se estableció el contexto operacional y el marco teórico del funcionamiento del sistema para frío alimentario, identificando su importancia dentro del proceso productivo del supermercado. Se analizan los principales componentes del sistema, su funcionamiento y ubicación dentro del recinto.

La segunda etapa se enfoca en evaluar los impactos de cada componente e implementar la metodología RCM en los ítems más críticos del sistema: compresor y condensador. Se realiza un análisis detallado de los modos y efecto de falla (FMECA), identificando que cerca de 80% de las eventualidades son de origen eléctrico y apenas un 20% por razones mecánicas. Esto permitió establecer estrategias de mantenimiento que optimicen la confiabilidad y disponibilidad del sistema, minimizando riesgos y costos operacionales.

Finalmente, en la tercera etapa, se lleva a cabo una evaluación técnica y económica de los resultados obtenidos. Se estima que, a largo plazo, los ahorros en la gestión del mantenimiento con la propuesta RCM podrían superar los \$200.000.000. Por otra parte, se desarrollaron sugerencias de indicadores de desempeño (KPI), se describieron las etapas para consolidar el plan de acción y se realizaron recomendaciones generales sobre la implementación de la metodología y garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de RCM no solo mejora la confiabilidad y seguridad operacional del sistema de refrigeración, sino que también optimiza los costos de mantenimiento y refuerza la eficiencia de la organización. Además, fomenta una cultura de mantenimiento proactivo a través del trabajo multidisciplinario y la capacitación del personal, estableciendo un modelo sostenible para la gestión de activos en el sector retail.

## ÍNDICE

RESUMEN ... ..	2
ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
SIGLAS .....	8
UNIDADES DE MEDIDA.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
PROBLEMÁTICA.....	11
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL	13
1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA .....	14
1.1.1. EMPRESA B.....	14
1.1.2. ORGANIGRAMA DE MANTENIMIENTO .....	16
1.1.3. MAPA DE PROCESOS.....	17
1.1.4. HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS PARA EL MANTENIMIENTO..	18
1.2. MARCO TEÓRICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	19
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN .....	19
1.2.2. DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA P-H .....	21
1.3. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	22
1.3.1. DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES EVAPORADORAS .....	23

1.3.2.	DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES CONDENSADORAS .....	25
1.3.3.	COMPONENTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	26
1.3.3.1.	UNIDADES EVAPORADORAS .....	26
1.3.3.2.	CONTROLADORES DE EVAPORADOR .....	28
1.3.3.3.	VÁLVULA DE EXPANSIÓN .....	29
1.3.3.4.	UNIDADES CONDENSADORAS .....	30
1.3.3.5.	COMPRESOR .....	33
1.3.3.6.	REFRIGERANTE.....	34
1.3.3.7.	ACEITE .....	37
1.3.3.8.	CAÑERÍAS.....	37
CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE METODOLOGÍA RCM		38
2.1	METODOLOGÍA .....	39
2.1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE IMPLANTACIÓN DEL RCM .....	41
2.1.2	PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.....	41
2.1.2.1	CONFORMACIÓN DE EQUIPO NATURAL DE TRABAJO EN EL PROCESO RCM.....	42
2.1.2.2	SELECCIÓN DEL SISTEMA Y DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL.....	43
2.1.2.3	DESARROLLO DEL CONTEXTO OPERACIONAL.....	45
2.1.2.4	DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE MODO Y EFECTOS DE FALLA PARA ACTIVOS CRÍTICOS (FMECA) .....	47
2.1.2.5	SELECCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.....	53
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN RCM		56
3.1	ANÁLISIS DE IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN RCM.....	57
3.1.1	ANÁLISIS CUANTITATIVO DE MODOS DE FALLA.....	57

3.1.1.1	COSTOS DE FALLAS Y RIESGOS .....	57
3.1.1.2	EXPLICACIÓN DE CÁLCULOS DE COSTOS .....	61
3.1.1.3	COMPARACIÓN DE COSTOS CORRECTIVOS VS PREVENTIVOS .....	63
3.1.1.4	PROYECCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.....	64
3.1.2	ANÁLISIS CUALITATIVO DE MODOS DE FALLA.....	65
3.2	COMPARACIÓN CON ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PREVIA .....	66
3.2.1	MANTENIMIENTO PREVENTIVO VS MANTENIMIENTO RCM.....	67
3.3	INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN RCM .....	69
3.3.1	INDICADORES DE MANTENIMIENTO .....	69
3.3.2	INDICADORES DE COSTOS DE MANTENIMIENTO .....	71
3.4	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN .....	74
3.4.1	FACTIBILIDAD TÉCNICA.....	74
3.4.2	FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	74
3.5	ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN.....	75
3.6	RECOMENDACIONES .....	76
	CONCLUSIÓN.....	78
	REFERENCIAS .....	79
	ANEXOS .....	81
	Anexo 1: Gráfico Porcentaje de Pérdida para Supermercados año 2022 .....	81
	Anexo 2: Layout Frío Alimentario - Planta Sala de Ventas .....	82
	Anexo 3: Layout Frío Alimentario – Planta Cubierta – Unidades Condensadoras .....	83
	Anexo 4: Diagrama de Flujo Unidad Condensadora Emerson Copeland ZXD120BE ...	84
	Anexo 5: Desarrollo de FMECA de Compresor.....	85

Anexo 6: Desarrollo de propuesta RCM de Compresor .....	86
Anexo 7: Desarrollo de FMECA de Condensador .....	87
Anexo 8: Desarrollo de propuesta RCM de Condensador.....	88
Anexo 9: Actividades de mantenimiento en centrales frigoríficas – Sustenta .....	89
Anexo 10: Actividades de mantenimiento en condensadores – Sustenta.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Logotipo de certificación de Empresa B .....	15
Figura 1.2 Organigrama de Mantenimiento de Sustenta .....	16
Figura 1.3 Mapa de Procesos de Mantenimiento de Sustenta .....	17
Figura 1.4 Componentes básicos en un ciclo de Refrigeración .....	20
Figura 1.5 Comparación de ciclo ideal v/s ciclo real de refrigeración .....	21
Figura 1.6 Mural de lácteos en Sala de Ventas .....	24
Figura 1.7 Unidades Condensadoras instaladas en la cubierta del edificio .....	26
Figura 1.8 Evaporador Línea ERL.....	27
Figura 1.9 Evaporador Línea ERC.....	27
Figura 1.10 Controlador de Evaporador modelo AK-C55.....	28
Figura 1.11 Controlador de Evaporador de modelo EKA 164 .....	29
Figura 1.12 Válvula de Expansión Electrónica modelo AKV 10P.....	30
Figura 1.13 Distribución de componentes en Unidad Condensadora modelo ZX .....	31
Figura 1.14 Eficiencia del sistema con intercambiador de calor de subenfriado.....	32
Figura 1.15 Tablero eléctrico contenido en la Unidad Condensadora ZX .....	33
Figura 1.16 Compresor Scroll modelo ZX .....	34
Figura 1.17 Tabla de Seguridad de R-507 .....	35
Figura 2.1 Modelo de proceso de Gestión de Mantenimiento (MGM) .....	39
Figura 2.2 Siete preguntas claves del RCM.....	40
Figura 2.3 Flujograma de implementación del RCM .....	41
Figura 2.4 Taxonomía del Sistema de Refrigeración.....	43
Figura 2.5 Matriz de criticidad para componentes de Sistema de Refrigeración .....	44

Figura 2.6 Diagrama EPS para activos críticos .....	46
Figura 2.7 Esquema de análisis de los modos y efectos de fallas.....	48
Figura 2.8 Árbol lógico de Decisión del RCM.....	53
Figura 3.1 Evaluación cuantitativa de modos de fallas de componentes críticos.....	60
Figura 3.2 Evaluación cualitativa de modos de fallas de componentes críticos.....	66
Figura 3.3 Proceso de desarrollo de KPIs según ISO 14224 .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Herramientas e instrumentos de Sustenta .....	19
Tabla 1.2 Evaluación de Impacto Ambiental y Seguridad de R-507.....	36
Tabla 1.3 Clasificación R-507 según Toxicidad e Inflamabilidad .....	37
Tabla 2.1 Integrantes de equipo de trabajo para implementación de metodología RCM.....	42
Tabla 2.2 Análisis FMECA de Compresor (1/3) .....	49
Tabla 2.3 Análisis FMECA de Compresor (2/3) .....	50
Tabla 2.4 Análisis FMECA de Compresor (3/3) .....	50
Tabla 2.5 Análisis FMECA de Condensador (1/3).....	51
Tabla 2.6 Análisis FMECA de Condensador (2/3).....	52
Tabla 2.7 Análisis FMECA de Condensador (3/3).....	52
Tabla 2.8 Resumen Actividades de Mantenimiento propuestas por RCM (1/2) .....	54
Tabla 2.9 Resumen Actividades de Mantenimiento propuestas por RCM (2/2) .....	55
Tabla 3.1 Evaluación de fallas y riesgos de Compresor .....	58
Tabla 3.2 Evaluación de fallas y riesgos de Condensador.....	59
Tabla 3.3 Comparación riesgo cuantitativo v/s presupuesto anual.....	64
Tabla 3.4 Proyección de riesgo por fallas v/s presupuesto preventivo .....	65
Tabla 3.5 Comparación de actividades preventivas vs RCM .....	68

## SIGLAS

BT:	Baja Temperatura
CFC:	Clorofluorocarbono
COP:	Coefficient of Performance
GWP:	Global Warming Potential
HCFC:	Hidroclorofluorocarbono
HFC:	Hidrofluorocarbono
HH:	Hora Hombre
KPI:	Key Performance Indicators
MCC:	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
MT:	Media Temperatura
ODP:	Ozone Depletion Potential
PAO:	Potencial de Agotamiento del Ozono
POE:	Polyol Esters
PCG:	Potencial de Calentamiento Global
R-507:	Refrigerante 507
RCM:	Reliability Centered Maintenance

## UNIDADES DE MEDIDA

A:	Amperes
°C:	Grados Celsius
BTU/h:	British Thermal Unit por Hora
HP:	Horsepower
Hz:	Hertz
K:	Kelvin
Kg:	Kilógramo
L:	Litro
m <sup>3</sup> /h:	Metro cúbico por hora
mm:	Milímetro
ppm:	Partes por millón
PSIg:	Pounds per Square Inch Gauge
RPM:	Revoluciones por Minuto
v:	Volts
W:	Watt

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, las organizaciones industriales están implementando nuevas técnicas con el objetivo principal de optimizar sus procesos de gestión de mantenimiento. Dentro de estas nuevas técnicas, la metodología denominada Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) constituye actualmente una de las principales y más efectivas herramientas para mejorar y optimizar el mantenimiento en las organizaciones.

El éxito de RCM a nivel mundial, se debe principalmente a que esta filosofía permite establecer los requerimientos necesarios de mantenimiento de los distintos equipos en su contexto operacional, tomando en cuenta el posible impacto que pueden provocar las fallas de estos equipos: al medioambiente, la seguridad humana y las operaciones, aspectos que en el presente son considerados de vital importancia dentro de cualquier proceso productivo.

Esta metodología aplicada al mantenimiento en los sistemas de refrigeración comercial es fundamental para garantizar su buen funcionamiento y evitar costosas fallas. Estos sistemas operan de manera continua, sin interrupciones, ya que son esenciales para conservar productos perecederos y controlar temperaturas en procesos de fabricación o envasado. Un plan de mantenimiento adecuado permite detectar y corregir problemas antes de que se conviertan en fallas mayores, prolongando la vida útil de los equipos y asegurando la calidad de los productos. Es importante saber que un mantenimiento deficiente puede generar pérdidas económicas significativas, por lo que es imprescindible contar con un plan de revisión y monitoreo periódico.

El siguiente informe desarrolla una estrategia adecuada para la implementación de la metodología RCM en los ítems más críticos del sistema de refrigeración comercial de SISA Quilín: compresor y condensador, componentes del sistema que pueden fallar especialmente en época de verano, cuando el aumento de la carga térmica y la alta temperatura ambiente dificultan la condensación del refrigerante.

Esta aplicación permitirá un incremento en la efectividad de la gestión del mantenimiento, mejorando los niveles de disponibilidad y seguridad operacional. Como resultado, se optimizarán los costos y se incrementará la rentabilidad de la organización, aspectos fundamentales para cualquier empresa.

## **PROBLEMÁTICA**

Actualmente, el supermercado Santa Isabel Quilín posee un sistema de refrigeración que abastece el frío alimentario de muebles de sala de ventas, cámaras frigoríficas y salas de procesos de trastienda. Cuando en el sistema se producen averías, no sólo pueden derivar en posibles sanciones por parte de la Seremi de Salud por alimentos que pierden su cadena de frío, sino que también afectan la disponibilidad de productos refrigerados y congelados en góndola. Esto impacta negativamente la experiencia del cliente, perjudica la reputación del establecimiento y disminuye la confianza del consumidor.

A diferencia de otras sucursales donde existe un registro histórico de fallas, este sistema de refrigeración es relativamente nuevo y la falta de datos dificulta la predicción de averías y la planificación de mantenimientos preventivos. En este contexto, la aplicación de una estrategia basada en el mantenimiento centrado en la confiabilidad podría optimizar la gestión de los activos críticos y reducir el riesgo de fallas inesperados.

Según el V Estudio de Mermas en el Retail realizado por la Escuela de Negocios de la Universidad Adolfo Ibáñez para la Cámara de Comercio de Santiago, indica que el porcentaje de pérdida en la categoría de “comidas y bebidas” para supermercados alcanzó un 1,83% respecto a las ventas para el año 2022 (Universidad Adolfo Ibáñez y otros, 2023). Esta cifra resulta alarmante, especialmente para empresas de gran escala como Cencosud, que en ese mismo año generó ingresos en sus cadenas de supermercados de \$1.289.767.000.000 tan solo en Chile (CENCOSUD, 2023).

La implementación de un plan de mantenimiento ineficaz en el sistema de refrigeración de SISA Quilín no sólo compromete la seguridad y calidad de los productos, sino que también representa un quiebre en la rentabilidad del negocio. Este hecho resulta una problemática significativa que se traduce en elevados costos operacionales por intervenciones no programadas, lo que refuerza la necesidad de un enfoque estratégico para la gestión del mantenimiento.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar una propuesta de metodología RCM que permita un incremento en la efectividad de la gestión del mantenimiento, la fiabilidad y seguridad operacional de los componentes más críticos pertenecientes al sistema de refrigeración comercial de Santa Isabel Quilín.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el contexto operacional, por medio de visita en terreno y análisis técnico, asociado al sistema de refrigeración comercial de Santa Isabel Quilín.
- Desarrollar una metodología RCM para componentes críticos: condensadora de tubo aletado y compresor scroll Emerson Copeland ZX45KCE-TFD-558.
- Evaluar técnica y económicamente la propuesta de la metodología RCM, definiendo las recomendaciones para consolidar la ejecución del plan de acción orientado a eliminar o minimizar las consecuencias de los modos de fallas identificados.

**CAPÍTULO 1:      DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL**

## **1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA**

Sustenta es una empresa de proyectos y servicios de ingeniería para la refrigeración industrial y comercial ubicada en la comuna de Las Condes, Santiago de Chile. Sus labores están enfocadas en la mejora continua y la sustentabilidad, teniendo como misión hacer ingeniería responsable, velar por el desarrollo tecnológico y enfocados en dirigir la transición y perfeccionamiento hacia los sistemas de refrigeración en base a refrigerantes naturales.

Los servicios que brinda se pueden clasificar en 3 grupos:

- **Proyectos:** Desarrollo de proyectos de diseño, instalación, puesta en marcha y remodelación de sistemas de refrigeración industrial y comercial, así como también evaluaciones e implementaciones de sistemas de consumo eficiente y en base a gases refrigerantes naturales.
- **Mantenimiento:** Especialistas en mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas de refrigeración industrial y comercial.
- **Reciclaje:** Compromiso de recuperar, almacenar y tratar de manera responsable los gases freones que quedan en desuso, el cual es regenerado para que este no se libere a la atmósfera.

Sustenta cuenta con alianzas en Europa que brindan apoyo y conocimiento en el rubro de la refrigeración industrial y comercial. Asimismo, son marcas italianas las que proveen la tecnología y equipamiento de los muebles que se instalan en cada proyecto de montaje.

### **1.1.1. EMPRESA B**

Surge como iniciativa de B Lab, una compañía cofundada en 2006 por Jay Coen Gilbert desde la que se trata de crear las condiciones necesarias para que prosperen las empresas que tienen vocación sostenible.

Este paradigma redefine el sentido de éxito en los negocios al formular una pregunta básica: ¿cuál es el propósito de la empresa en la sociedad? Al responder esta pregunta, los rendimientos financieros pasan a ser entendidos como herramienta indispensable para lograr sus

objetivos, pero no como su razón de existencia única. El éxito pasa, entonces, no sólo por su nivel de facturación, utilidades o dividendos, sino por cómo su modelo de negocios integra los beneficios con el impacto en la sociedad y el medio ambiente de un modo medible y escalable.

Sustenta es una Empresa B (o B Corporation), la cual es un tipo de organización que considera tres pilares fundamentales dentro de sus operaciones:

- **Impacto social:** Se enfoca en cómo la empresa beneficia a la comunidad y a sus trabajadores, promoviendo el bienestar social y contribuyendo a causas sociales.
- **Impacto ambiental:** Evalúa cómo las operaciones de la empresa afectan el medio ambiente, promoviendo prácticas sostenibles, reduciendo la huella de carbono y minimizando el desperdicio.
- **Impacto económico:** Aunque buscan generar ganancias, estas empresas también consideran cómo sus actividades contribuyen a una economía más justa y equitativa, promoviendo la economía local y prácticas comerciales responsables.

### **Figura 1.1**

*Logotipo de certificación de Empresa B*



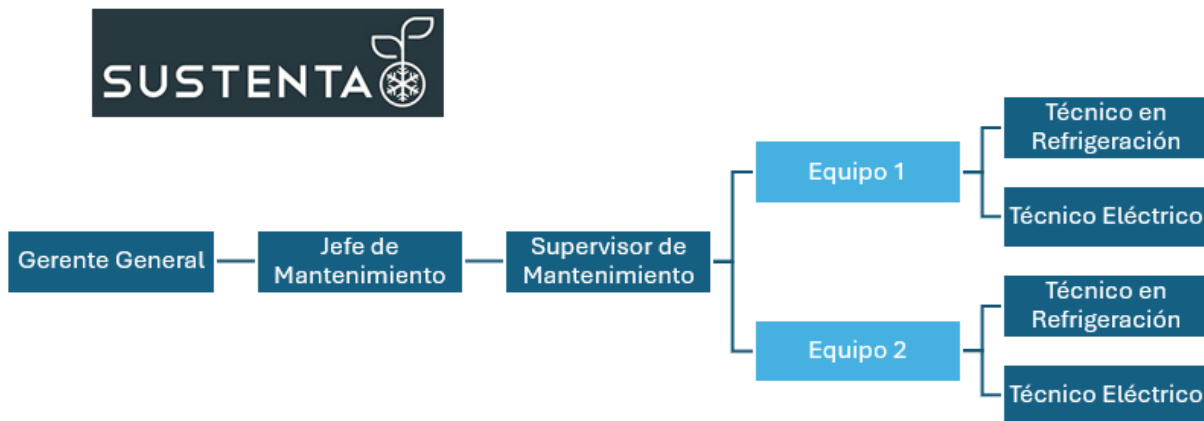
*Fuente:* Tomado de Sistema B (2012), <https://www.sistemab.org>.

### 1.1.2. ORGANIGRAMA DE MANTENIMIENTO

De acuerdo con las áreas involucradas en la ejecución del mantenimiento, la Figura 1.2 define un organigrama simple para poder comprender de donde provienen las personas a la hora de generar un grupo de trabajo multidisciplinario para poder evaluar una problemática.

**Figura 1.2**

*Organigrama de Mantenimiento de Sustenta*



*Fuente:* Elaboración propia basada en Sustenta (2019), <https://www.sustentachile.com>.

Este organigrama abarca solamente el área de mantenimiento, ya que existe una distribución distinta si se trata del área de montaje de la empresa.

En términos generales, el gerente cumple el rol de aprobar los presupuestos y recursos del área para que el jefe de mantenimiento planifique y coordine todas las actividades, asegurando el buen desarrollo de políticas y procedimientos. Por consiguiente, el estado de las órdenes las controla con el supervisor, quien se encarga de asignar tareas diarias y realizar inspecciones regulares para identificar necesidades en el plan de mantenimiento.

Como la gran parte de los componentes del sistema son electromecánicos, las tareas preventivas son abordadas por los técnicos eléctricos y frigoristas, quienes se encargan simultáneamente de ejecutar el plan de mantenimiento, basados en los instructivos y

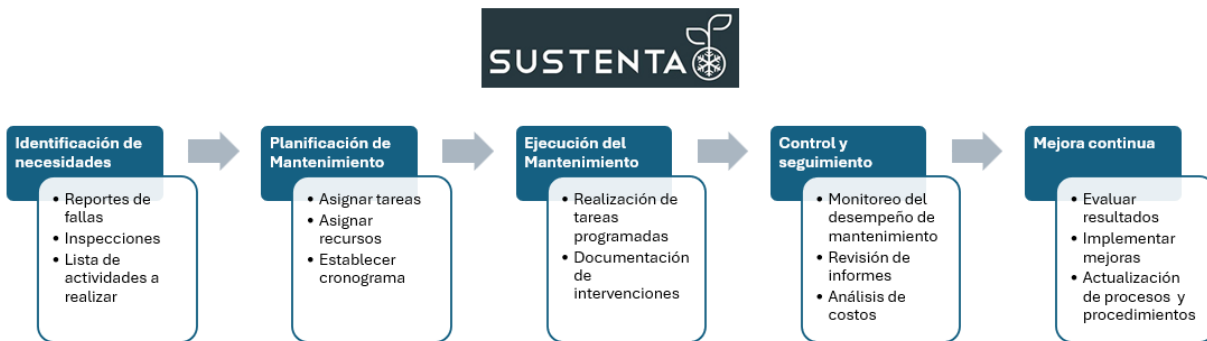
procedimientos establecidos para cumplir con los estándares de calidad de mantenimiento, realizando inspecciones periódicas, diagnosticando y reparando averías, documentando las actividades de mantenimiento y registrando los resultados.

### 1.1.3. MAPA DE PROCESOS

A continuación, se muestra el mapa de los procesos principales de mantenimiento:

**Figura 1.3**

*Mapa de Procesos de Mantenimiento de Sustenta*



*Fuente:* Elaboración propia basada en Sustenta (2019), <https://www.sustentachile.com>.

El proceso de mantenimiento sigue un orden secuencial y se compone de cinco etapas clave para garantizar la operatividad y la eficiencia de los equipos y sistemas dentro de la organización.

El proceso de identificación de necesidades implica la recopilación de información sobre el estado actual de los equipos, sistemas e instalaciones, mediante las inspecciones visuales, informes de fallas, análisis de rendimiento y retroalimentación del personal operativo. Es crucial involucrar a todos los actores relevantes, como operadores y técnicos de mantenimiento, para obtener una visión completa de las necesidades.

Posteriormente se procede a la planificación del mantenimiento donde se desarrollan estrategias para abordar las necesidades identificadas, elaborando un cronograma que prioriza las tareas según su urgencia e impacto en la operación. Se asignan recursos, tanto humanos como materiales, y se establecen presupuestos. Es importante definir los indicadores de rendimiento (KPIs) que permitirán medir la efectividad del mantenimiento programado.

Con el plan en mano se lleva a cabo la ejecución del mantenimiento, realizando las actividades programadas que pueden incluir reparaciones, reemplazos, ajustes y limpieza de equipos. Documentar las actividades, siguiendo los procedimientos establecidos, es clave para futuras referencias y para el análisis de resultados.

Después de la ejecución, se realiza el control y seguimiento de las actividades para evaluar el cumplimiento del plan de mantenimiento mediante la comparación de los resultados obtenidos con los objetivos planteados, considerando los KPIs definidos anteriormente para medir la efectividad del mantenimiento.

Finalmente se busca optimizar el proceso de mantenimiento de manera constante, identificando oportunidades de mejora en los procedimientos, recursos y planificación.

#### **1.1.4. HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS PARA EL MANTENIMIENTO**

Los prestadores técnicos de servicio deben contar con todos los medios necesarios para desarrollar labores de instalación, mantenimiento y/o puesta en marcha de los sistemas. A continuación, se indican los medios técnicos más importantes del rubro con los que cuenta Sustenta para ejercer sus labores:

**Tabla 1.1***Herramientas e instrumentos de Sustenta*

#	Herramienta / Instrumento	Sí	No	#	Herramienta / Instrumento	Sí	No
1	Termómetro láser	X		17	Cilindro de nitrógeno	X	
2	Manómetros análogos de alta presión	X		18	Juego de expandidor cónico	X	
3	Manómetros análogos de baja presión	X		19	Juego de expandidor recto	X	
4	Multímetro digital de tenaza	X		20	Dobladora de tubo	X	
5	Vacuómetro	X		21	Juego de alicates	X	
6	Anemómetro		X	22	Juego de atomilladores	X	
7	Higrómetro		X	23	Cortatubos	X	
8	Detector de fugas electrónico	X		24	Escariador	X	
9	Bomba de vacío	X		25	Llave de vástago	X	
10	Recuperadora de refrigerante	X		26	Peine para aletas	X	
11	Cilindros de recuperación	X		27	Aprieta terminales	X	
12	Balanza digital	X		28	Cámara termográfica		X
13	Hidrolavadora	X		29	Detector de ultrasonido		X
14	Equipo de soldadura oxiacetileno	X		30	Kit de análisis de aceite		X
15	Cilindro de oxígeno	X		31	Analizador de vibraciones		X
16	Cilindro de acetileno	X					

*Nota:* Esta tabla de elaboración propia no contempla la totalidad de herramientas e instrumentos que posee Sustenta, pero sí las más fundamentales para el rubro de la refrigeración.

## **1.2. MARCO TEÓRICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

Para comprender el ciclo del refrigerante dentro del sistema frigorífico se requiere de un estudio no sólo de los procesos particulares que constituyen el ciclo, sino también de las relaciones que existen entre los diferentes procesos y que cualquier cambio tiene efecto en los demás procesos.

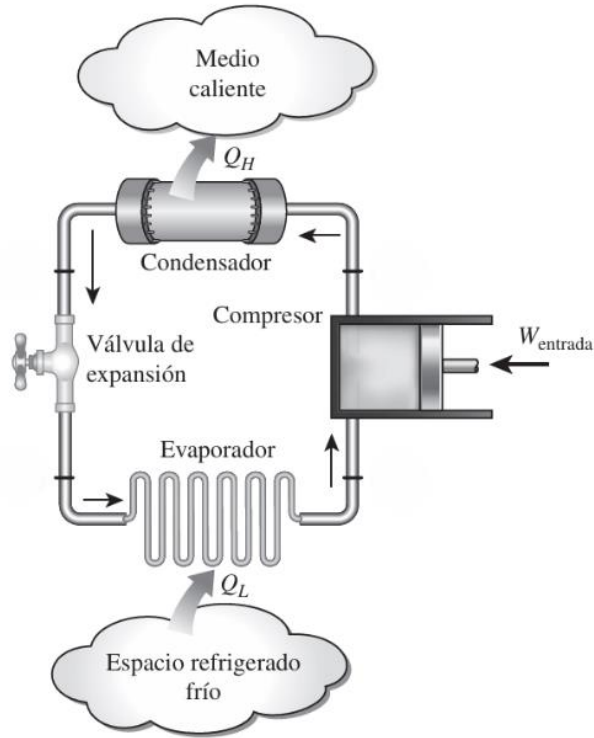
### **1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN**

El ciclo de refrigeración por compresión es un proceso termodinámico que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en sistemas de refrigeración y climatización. Este ciclo permite transferir calor desde un espacio que se desea enfriar hacia un ambiente externo, mediante el uso de un refrigerante que cambia de estado a lo largo del proceso, con el propósito de mantener una temperatura deseada en un ambiente determinado.

Como indica la Figura 1.4, un ciclo de refrigeración se compone de los siguientes cuatro componentes básicos: compresor, condensador, evaporador y dispositivo de expansión.

**Figura 1.4**

*Componentes básicos en un ciclo de Refrigeración*



*Fuente: Tomada de Termodinámica, Séptima Edición, página 619, por Y. Çengel & M. Boles (2012)*

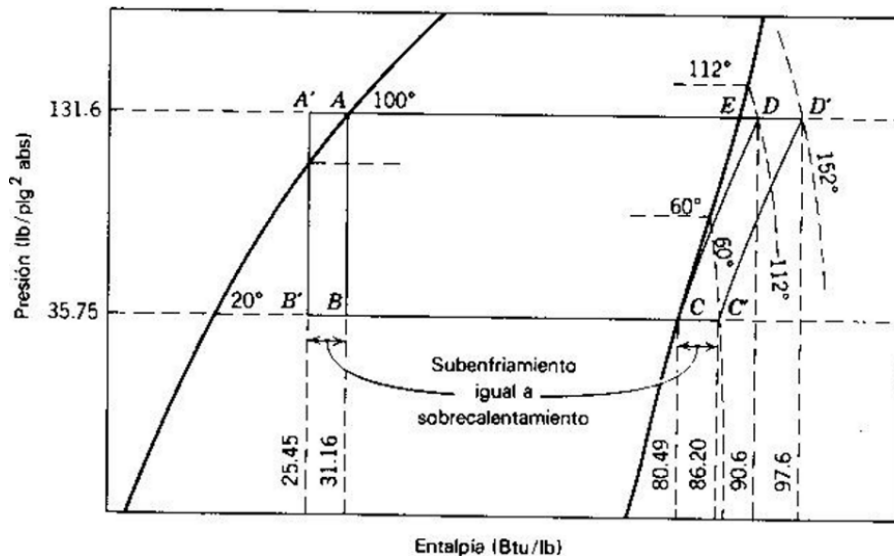
A medida que el refrigerante circula a través del sistema, experimenta un número de cambios en su estado o condición, cada uno de los cuales es llamado un proceso. El refrigerante empieza en algún estado o condición inicial, pasa a través de una serie de procesos en una secuencia definida y regresa a su condición inicial. Esta serie de procesos es llamada ciclo. Cualquier cambio que experimente el refrigerante en alguno de los procesos, produce cambios en los demás procesos del ciclo.

## 1.2.2. DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA P-H

El ciclo de refrigeración por compresión consta de cuatro procesos fundamentales y serán explicados tomando como referencia los ciclos termodinámicos de la Figura 1.5.

**Figura 1.5**

*Comparación de ciclo ideal v/s ciclo real de refrigeración*



*Fuente:* Tomada de *Principios de Refrigeración*, página 157, por Dossat, R. J. (1991).

*Nota:* Esta figura representa una comparación utilizando como referencia valores en los que trabaja el R-12, distinto al R-507 utilizado en la instalación.

A pesar de que para efectos de análisis se prefiere utilizar el ciclo ideal [ABCDE], en esta oportunidad abordaremos la explicación utilizando el ciclo real [A'B'C'D'E]:

- **Compresión:** El ciclo comienza cuando el compresor succiona el vapor de refrigerante a baja presión (C') y lo comprime en un proceso isoentrópico, disminuyendo su volumen específico e incrementando tanto la presión como la temperatura, es decir, llevando al refrigerante desde la presión de evaporación hacia la presión de condensación. En este punto (D') el vapor de refrigerante tiene el valor más alto de energía en todo su ciclo. El

vapor sobrecalentado y a alta presión facilita su posterior condensación y es impulsado desde el compresor hacia el condensador.

- Condensación: Una vez en el condensador, el vapor a alta presión y temperatura cede calor al medio de enfriamiento (generalmente aire o agua) hasta alcanzar su punto de vapor saturado (E). Continuando en el intercambio de calor, el refrigerante sigue condensándose en un proceso isobárico e isotérmico, hasta su punto de líquido saturado a alta presión (A). Este líquido es subenfriado (A') para asegurar un 100% de líquido en la entrada de la válvula de expansión.
- Expansión: Al llegar a la válvula de expansión, esta restringe el caudal de refrigerante líquido, sufriendo una drástica reducción de presión en un proceso isoentálpico. Este descenso en presión provoca una disminución considerable de la temperatura del refrigerante, que se convierte en una mezcla de líquido y vapor a baja presión (B').
- Evaporación: El refrigerante frío y de baja presión ingresa al evaporador, donde absorbe calor del entorno que se desea enfriar en proceso isobárico e isoentálpico. Durante este proceso, el refrigerante líquido se evapora completamente hasta llegar a su punto de vapor saturado a baja presión y temperatura (C). Este vapor se sobrecalienta para asegurar un 100% de vapor en la succión del compresor (C'), alcanza su punto más alto de volumen específico y es enviado nuevamente al compresor para repetir el ciclo termodinámico.

### **1.3. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

La refrigeración es la ciencia que trata de reducir el calor de un espacio herméticamente aislado para mantener una temperatura constante. La aplicación de este fundamento sobre la conservación de alimentos tiene como propósito controlar la proliferación de bacterias para retardar su descomposición natural y aumentar su vida útil. Previamente a la venta, el alimento ha experimentado un proceso de cadena de frío y al igual que una cadena metálica, cada eslabón es fundamental: si uno se rompe, el producto se descompone. Este sistema de conservación considera la elaboración, traslado, almacenaje y exhibición del producto comestible. Bajo esta premisa, es esencial para las organizaciones cuya rentabilidad está basada en vender productos alimentarios,

tener la capacidad de ofrecer un producto fresco con sus características originales para ser consumido por el cliente.

La central de refrigeración que estudiaremos pertenece a Cencosud y está ubicada en el supermercado Santa Isabel Quilín. Este sistema abastece el frío alimentario de cada sección del supermercado: carnicería, frutas y verduras, platos preparados, pescadería, pastelería y lácteos. El suministro de frío distingue unidades de conservación MT y de mantención de productos congelados BT, las cuales funcionan en un rango mayor a 0°C y menor a 0°C, respectivamente.

### **1.3.1. DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES EVAPORADORAS**

Para cada punto de frío, existe una unidad terminal encargada de mantener cierto rango de temperatura. El Anexo 2 nos permite visualizar la distribución general de los evaporadores al interior del supermercado.

Las unidades evaporadoras o puntos de frío de este sistema se encuentran en tres zonas distintas del establecimiento:

## **SALA DE VENTAS**

Es el área principal del supermercado destinada a la exhibición y comercialización de productos. Este espacio está diseñado para facilitar la experiencia de compra del consumidor, permitiendo la visualización y acceso a una amplia variedad de alimentos, estimulando la compra impulsiva a través de la disposición de productos y promociones atractivas. Los equipos en sala de ventas deben pasar inadvertidos, como si no existieran. Su presencia es secundaria en relación con los productos que se ofrecen.

En esta área existen 20 muebles de refrigeración clasificados como murales, islas, vitrinas y coolers de MT y BT, cuyo objetivo es conservar productos y exhibirlos de tal forma que sean atractivos para el consumidor.

## Figura 1.6

### *Mural de lácteos en Sala de Ventas*



*Fuente:* Elaboración propia.

*Nota:* La imagen fue capturada el 13 de noviembre de 2024 en las instalaciones de SISA Quilín.

## **SALA DE PROCESOS**

Son áreas específicas dentro del supermercado dedicadas a la preparación y manipulación de alimentos antes de ser exhibidos. Están diseñadas con mesas de trabajo y utensilios, destacando la implementación de sistemas de ventilación y desinfección para garantizar un ambiente seguro y limpio. Estas salas pueden incluir secciones para la manipulación de carnes y pescados, donde se llevan a cabo actividades de corte, empaquetado y etiquetado. Otro ejemplo es la sección de pastelería donde se elaboran masas, tortas y postres.

En el supermercado existen 3 salas de MT las cuales operan en un rango de entre 8 a 10°C, destinadas a los trabajos afines a cada sección.

## **CÁMARAS**

Son espacios técnicos diseñados para el almacenamiento de productos perecederos que requieren temperaturas controladas para mantener su frescura y calidad. Pueden variar en tamaño y capacidad y están ubicadas en áreas que permiten un fácil acceso desde la sala de ventas y otras zonas de procesamiento. Las cámaras de conservación que integran en su interior otra cámara de congelado son denominadas precámaras y están constituidas de esta forma con el fin de optimizar el ahorro energético y disminuir las ganancias de calor del entorno.

En el supermercado existen 5 cámaras de MT las cuales funcionan en un rango de entre 0 a 2°C y 1 cámara de BT que opera entre -20 a -18°C.

### **1.3.2. DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES CONDENSADORAS**

Las unidades condensadora se encuentran en la techumbre del supermercado, tal como lo ilustra el Anexo 3.

Para abastecer la capacidad total del sistema, hay instaladas 3 unidades condensadoras de MT para conservación de productos frescos y 1 unidad condensadora de BT para conservación de productos congelados.

## **Figura 1.7**

*Unidades Condensadoras instaladas en la cubierta del edificio*



*Fuente:* Elaboración propia.

*Nota:* La imagen fue capturada el 13 de noviembre de 2024 en las instalaciones de SISA Quilín.

### **1.3.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

En esta sección se realizará un reconocimiento de los componentes mecánicos y eléctricos más relevantes que conforman el sistema:

#### **1.3.3.1. UNIDADES EVAPORADORAS**

Corresponden a las unidades contenidas en salas de proceso y cámaras frigoríficas para extraer el calor del recinto. Se conforman de una carcasa que en su interior contiene un intercambiador de calor de tubo aletado, ventiladores para generar la convección forzada del aire, la válvula de expansión electrónica, sensores de temperatura, un transductor de presión y resistencias eléctricas para el deshielo.

Las unidades evaporadoras contenidas en salas de proceso corresponden a la línea ERL de Intercal.

**Figura 1.8**

*Evaporador Línea ERL*



*Fuente: Tomada de Línea de Evaporadores Retail, Intercal (2019).*

Por otra parte, las unidades evaporadoras contenidas en cámaras frigoríficas de baja y media temperatura corresponden a la línea ERC de Intercal.

**Figura 1.9**

*Evaporador Línea ERC*



*Fuente: Tomada de Línea de Evaporadores Retail, Intercal (2019).*

Para los evaporadores de los muebles frigoríficos de la sala de ventas, existe un intercambiador de calor con similares características, pero variando en su capacidad, dimensiones y separación de aletas, de acuerdo con las necesidades del equipo.

### **1.3.3.2. CONTROLADORES DE EVAPORADOR**

Componente eléctrico de control que está instalado en muebles y cámaras frigoríficas. Se conforma del cuerpo del controlador (Figura 1.10, componentes superiores) y de una pantalla digital que está visible para acceder a los parámetros (Figura 1.10, componentes inferiores). Posee entradas de medición para sensores de temperatura y transductores de presión, los cuales permiten que cumpla las funciones de apertura y cierre de la válvula de expansión (ingreso de refrigerante), energización de ventiladores e iluminación y control del deshielo. Además, proporciona alarmas que notifican cuando existen inconvenientes en la operación y el monitoreo de las condiciones del evaporador se puede hacer manualmente o mediante bluetooth.

El controlador de evaporador utilizado es el modelo AK-C55 de Danfoss. Los display pueden ser del tipo bluetooth, como el tercero mostrado en la parte inferior de la Figura 1.10:

**Figura 1.10**

*Controlador de Evaporador modelo AK-C55*



*Fuente: Tomada de Guía del usuario: Control de Evaporadores AK-C55, Danfoss (2020).*

Los display también pueden tener acceso manual, como es el modelo EKA 164 de Danfoss. Ambos modelos son intercambiables utilizando el mismo terminal que proviene del cuerpo del controlador. Ambos modelos están distribuidos en muebles y cámaras frigoríficas.

### **Figura 1.11**

*Controlador de Evaporador de modelo EKA 164*



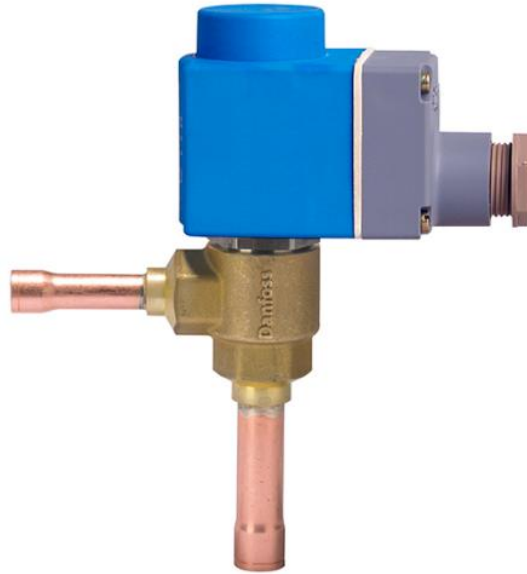
*Fuente: Tomada de Display EKA 163 / EKA 164, Danfoss (2013).*

### **1.3.3.3. VÁLVULA DE EXPANSIÓN**

El componente utilizado en las unidades evaporadores para producir la expansión del refrigerante y su caída de presión y temperatura es la válvula de expansión electrónica AKV 10P de Danfoss. Este componente está presente en todos los evaporadores de la instalación y su precisa inyección de líquido es regulada mediante las señales que recibe del controlador, en respuesta a la información reunida de los sensores. La capacidad de apertura del orificio de la válvula es ajustada por medio de una modulación por ancho de pulsos de la bobina sobre el inducido. Cuando no se requiera refrigeración, la válvula permanecerá cerrada y, por lo tanto, funcionará como una válvula solenoide. Posee un conector hermético para prevenir el acceso de humedad.

## Figura 1.12

*Válvula de Expansión Electrónica modelo AKV 10P*



*Fuente: Tomada de Válvula de Expansión Electrónica tipo AKV 10P y AKV 10PS, Danfoss (2023).*

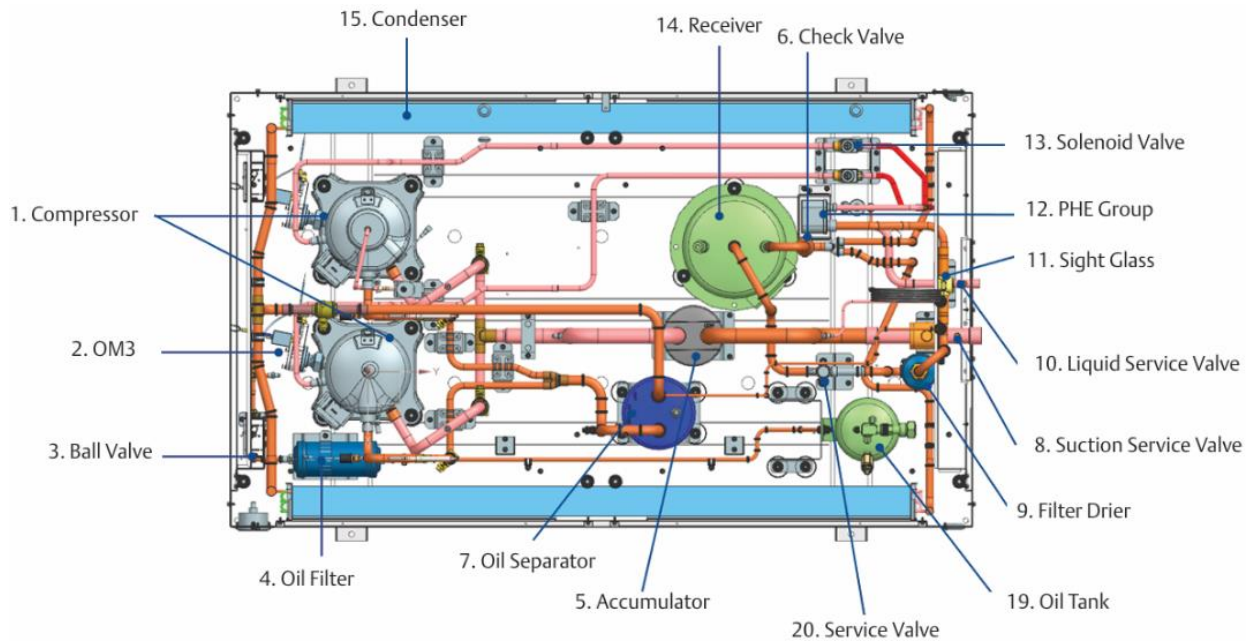
### **1.3.3.4. UNIDADES CONDENSADORAS**

La unidad de condensación del sistema de refrigeración es la ZXLD120BE-TFD-551 de Copeland Emerson. Estas unidades se encargan de ceder al ambiente el calor absorbido por el refrigerante en los evaporadores. A grandes rasgos, cumplen la función de comprimir y condensar el refrigerante. Están constituidos por dos compresores tipo scroll, dos condensadores de tubo aletado por convección forzada con control de capacidad que están conectados en paralelo por el lateral del equipo. Para más claridad, revisar el diagrama de flujo del Anexo 4.

Además de los componentes principales ya mencionados, la unidad condensadora posee una serie de elementos que están distribuidos de la siguiente forma:

**Figura 1.13**

*Distribución de componentes en Unidad Condensadora modelo ZX*

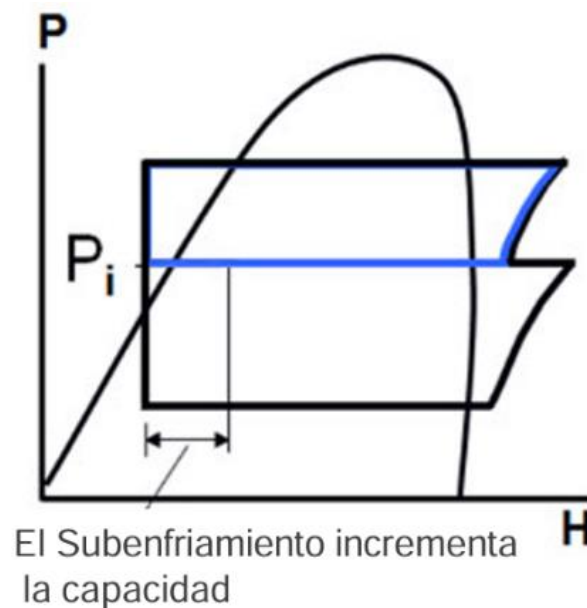


*Fuente: Tomada de Large ZX Condensing Unit - User Manual, página 11, Emerson Copeland (2022).*

Este sistema tiene la particularidad de contar con un componente de optimización denominado “subenfriado, el cual es un intercambiador de placa que genera un proceso de traspaso de calor entre el refrigerante líquido que proviene del condensador y el refrigerante gaseoso conectado a la succión de los compresores. Como indica el gráfico p-h de la Figura 1.16, permite reducir la temperatura del refrigerante líquido y así incrementar el subenfriamiento, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema y aumentar la capacidad de enfriamiento del evaporador. También, aumenta la temperatura de succión y el sobrecalentamiento para proteger al compresor de golpes de líquido.

### Figura 1.14

*Eficiencia del sistema con intercambiador de calor de subenfriado*

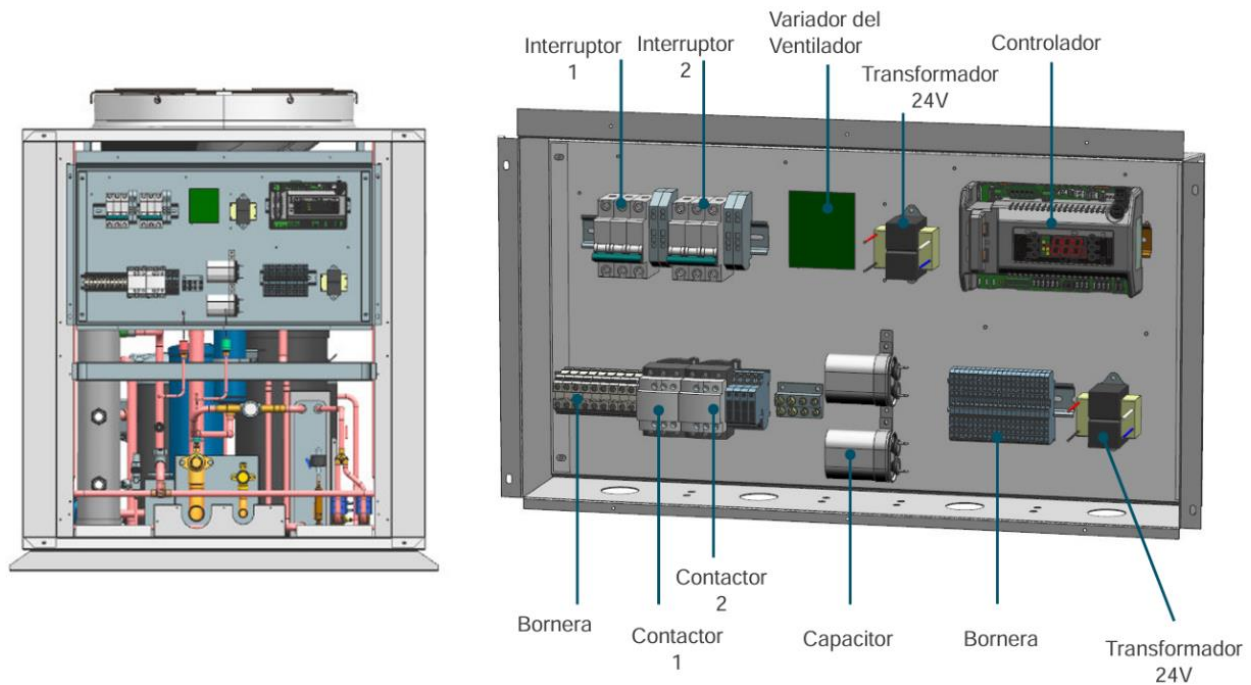


*Fuente:* Tomada de *Unidades Condensadoras ZX 12/16/20 HP*, página 8, Emerson Copeland (2019).

Cada unidad tiene instalada un controlador electrónico avanzado que tiene la capacidad de aprender sobre sus parámetros, síntomas y la recuperación de códigos de fallas, permitiendo ayudar a mejorar la velocidad y precisión de los diagnósticos del sistema. Además, cuenta con elementos eléctricos de protección contra sobre corriente, sobrecalentamiento, rotación de fase incorrecta, ciclos del compresor, restablecimientos de alta presión y cortes de baja presión. También puede enviar un mensaje de advertencia a un operador cuando hay un retorno de líquido, lo que puede prevenir daños críticos en la unidad.

**Figura 1.15**

*Tablero eléctrico contenido en la Unidad Condensadora ZX*



*Fuente: Tomada de Large ZX Condensing Unit - User Manual, página 12, Emerson Copeland (2022).*

### **1.3.3.5. COMPRESOR**

El proceso de compresión de refrigerante es realizado por dos compresores de tipo scroll contenidos dentro de la unidad condensadora. Este modelo es el ZX45KCE-TFD-558 de Copeland Emerson. Su función es generar las dos presiones de trabajo del sistema: presión de baja (evaporación) y presión de alta (condensación).

## Figura 1.16

### *Compresor Scroll modelo ZX*



*Fuente: Tomada de Compresor Scroll modelo ZX, Emerson Copeland (2009).*

La compresión en el tipo scroll se crea por la interacción de una espiral en órbita y una espiral estacionaria. El gas entra por las aberturas exteriores cuando el espiral orbita (no gira). Los conductos abiertos se sellan a medida que el gas es atraído hacia el centro. A medida que la espiral continúa orbitando, el gas se comprime en bolsas cada vez más pequeñas. En el momento en que el gas llega al puerto central, se ha alcanzado la presión de descarga. Durante el funcionamiento, los conductos de gas están en varias etapas de compresión en todo momento, lo que resulta en una succión y descarga casi continuas.

#### **1.3.3.6. REFRIGERANTE**

El fluido caloportador utilizado en la instalación es el R-507. Es una mezcla HFC azeotrópica de R-125 y de R-143a en una proporción de 1:1 en peso. Esto significa que se garantiza

el fácil manejo del refrigerante y que se evita que se separen las fases, ni siquiera cuando aparecen fugas. Se caracteriza por su estabilidad química, sus buenas propiedades termodinámicas y su baja toxicidad.

La Figura 1.17 contiene información sobre las propiedades fisicoquímicas y riesgos para el manejo del refrigerante, para garantizar un uso seguro en sistemas de refrigeración.

**Figura 1.17**

*Tabla de Seguridad de R-507*



*Fuente: Tomada de Hoja de Seguridad R-507, Proquiel Químicos.*

La utilización de los refrigerantes está íntimamente ligada al impacto medioambiental ya que gran parte de ellos son sustancias químicas artificiales que, al ser emitido a la atmósfera en caso de fuga o liberación irresponsable, contribuyen a la destrucción de la capa ozono y el calentamiento global.

“El PAO (ODP por sus siglas en inglés), es un índice que indica el grado que una sustancia química puede aportar a la disminución de la capa ozono. El nivel de referencia es 1, perteneciente al PAO del R-11 (CFC-11). Por otra parte, el PCG (GWP por sus siglas en inglés),

es un índice que compara el efecto de calentamiento en el período de 100 años de diferentes gases con relación al CO2 cuyo índice es 1.” (Ministerio del Medio Ambiente de Chile y otros, 2020)

Los refrigerantes HFC no contienen cloro y de esta manera no destruyen la capa de ozono, pero contribuyen significativamente al calentamiento global.

**Tabla 1.2**

*Evaluación de Impacto Ambiental y Seguridad de R-507*

<i>Evaluación</i>	<i>Valor</i>	<i>Riesgo</i>	<i>Justificación</i>
PAO	0	Nulo	No posee cloro en su composición molecular
PCG	3985	Moderado	Permanece en la atmósfera durante décadas
Toxicidad	1000 ppm	Baja	Es seguro en condiciones normales pero puede ser riesgoso en altas concentraciones
Inflamabilidad	No inflamable	Nulo	No se enciende fácilmente ni sostiene la combustión en presencia de chispas o llamas

*Fuente:* Elaboración propia basada en *Manual Buenas Prácticas en Sistemas de Refrigeración y Climatización - Fase II “Plan de Gestión Para la Eliminación de los HCFC”*, Ministerio del Medio Ambiente de Chile, ONUDI & Multilateral Fund (2020).

La Tabla 1.3 nos ilustra que el R-507 es clasificado como un refrigerante A1 de acuerdo con su grupo de seguridad, el cual lo evalúa en términos de toxicidad e inflamabilidad.

**Tabla 1.3**

*Clasificación R-507 según Toxicidad e Inflamabilidad*

Grupos de Seguridad		
Toxicidad \ Inflamabilidad	Baja toxicidad	Alta toxicidad
Alta inflamabilidad	A3	B3
Inflamable	A2	B2
Baja inflamabilidad	A2L	B2L
No se propaga la llama	A1	B1

*Fuente: Adaptado de Manual Buenas Prácticas en Sistemas de Refrigeración y Climatización - Fase II “Plan de Gestión Para la Eliminación de los HCFC”, página 30, Ministerio del Medio Ambiente de Chile, ONUDI & Multilateral Fund (2020).*

#### **1.3.3.7. ACEITE**

Los aceites son esenciales porque lubrican las partes móviles del compresor y ayudan en el transporte del refrigerante a través del sistema. El R-507 como cualquier otro refrigerante halogenado tiene una alta miscibilidad con los aceites de tipo POE debido a su buena capacidad de lubricar a bajas temperaturas. Poseen una mejor estabilidad térmica en comparación a los aceites tipo minerales, pero requieren mayor cuidado en su manejo pues son 100 veces más higroscópicos (grado de absorción de la humedad ambiente) que el aceite mineral. Son inflamables sólo si exponen a altas temperaturas y su toxicidad es baja en condiciones normales de funcionamiento.

#### **1.3.3.8. CAÑERÍAS**

Las cañerías juegan un papel crucial para el transporte del fluido dentro del sistema y deben ser compatibles con el refrigerante y las condiciones de operación. El cobre es el material más utilizado en sistemas de refrigeración que usan R-507 debido a su costo, su buena resistencia a la corrosión y su alta conductividad térmica que facilita la transferencia de calor. De acuerdo con la clasificación de grosor de pared, la cañería utilizada es tipo L.

**CAPÍTULO 2:      APLICACIÓN DE METODOLOGÍA RCM**

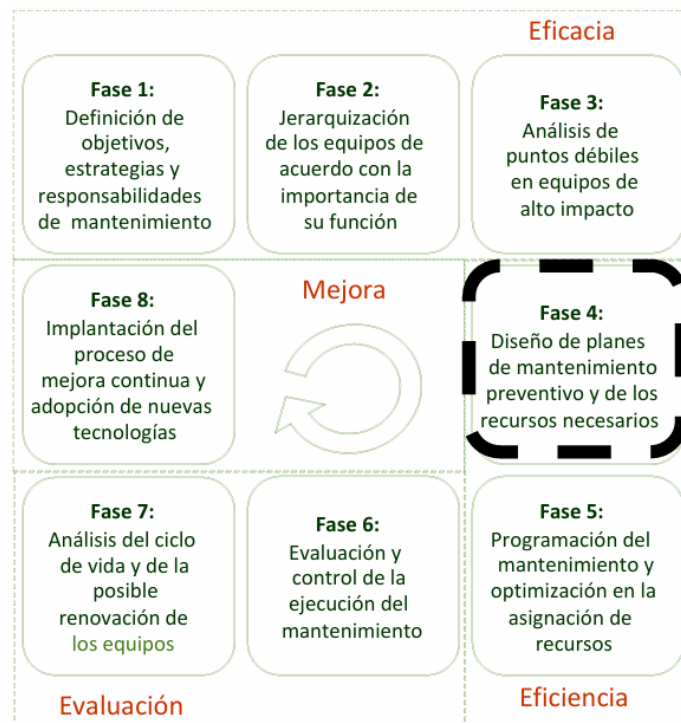
## 2.1 METODOLOGÍA

Como se menciona anteriormente, la metodología a utilizar es el RCM (Reliability Centered Maintenance) o MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Esta herramienta es una optimización al plan de mantenimiento que está basada en un procedimiento sistemático y sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional.

Según el modelo de gestión de mantenimiento (MGM) de la Figura 1.2, el RCM corresponde a la fase 4, “Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios”.

**Figura 2.1**

*Modelo de proceso de Gestión de Mantenimiento (MGM)*



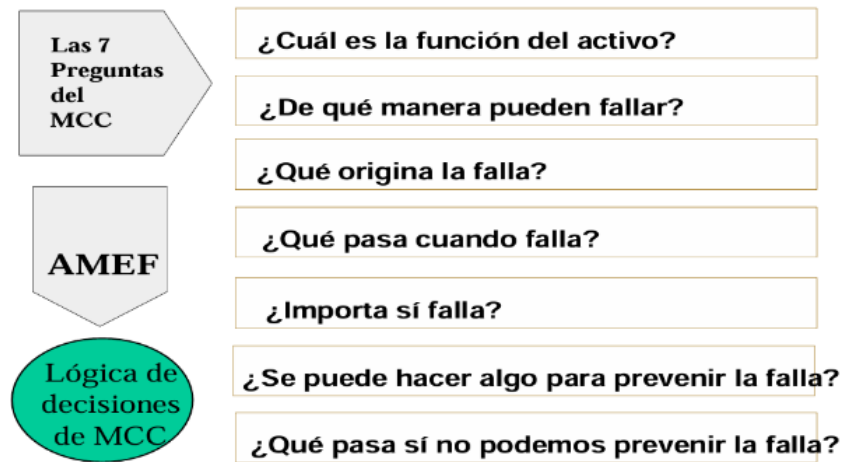
*Fuente: Tomada de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos - Desarrollo y aplicación práctica de una Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM), página 115, Parra, C., & Crespo, A. (2015).*

“En términos más amplios, el RCM se define como un proceso de gestión del mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la fiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de fallas de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones” (Parra & Crespo, 2015).

La metodología propone un procedimiento para identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las siguientes siete preguntas:

**Figura 2.2**

*Siete preguntas claves del RCM*



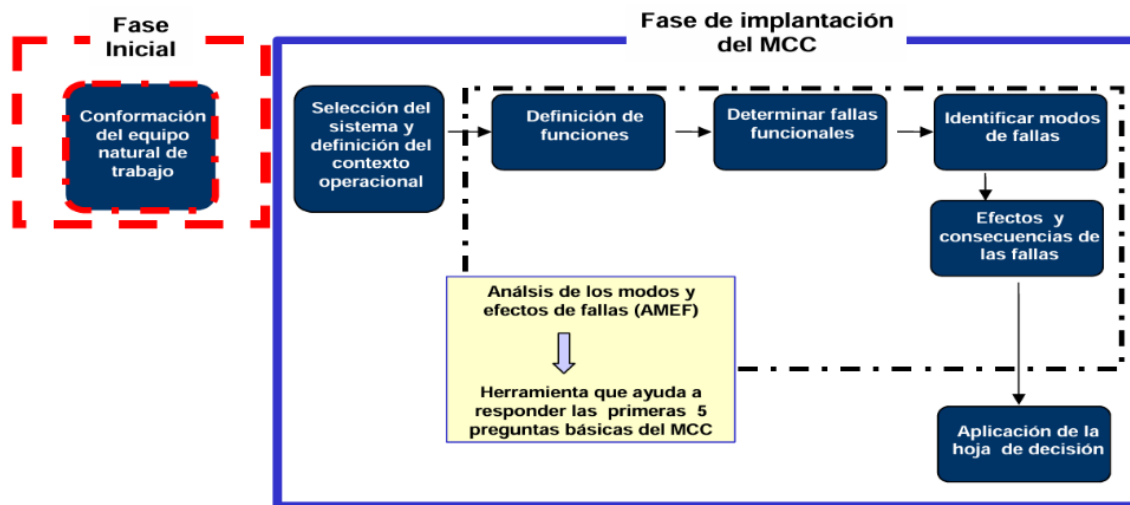
*Fuente: Tomada de Aplicación piloto de la metodología Mantenimiento Centrado en Fiabilidad / MCF (Reliability Centered Maintenance / RCM) en el Sistema de Generación Eléctrica: Motor Isotta VI312 ME 1800, página 3, Crespo, A., & Parra, C. (2008).*

## 2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE IMPLANTACIÓN DEL RCM

A continuación, se muestra el proceso de implantación de la técnica RCM a utilizar:

**Figura 2.3**

*Flujograma de implementación del RCM*



*Fuente: Tomada de Aplicación piloto de la metodología Mantenimiento Centrado en Fiabilidad / MCF (Reliability Centered Maintenance / RCM) en el Sistema de Generación Eléctrica: Motor Isotta VI312 ME 1800, página 3, Crespo, A., & Parra, C. (2008).*

Para comenzar con el análisis de las necesidades de mantenimiento, es fundamental conocer qué tipo de activos físicos existen y decidir cuáles son los que deben someterse al proceso de revisión.

## 2.1.2 PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

En los siguientes apartados se aplicará cada una de las etapas de acuerdo con el modelo propuesto en la Figura 2.3 de aplicación de la técnica de mantenimiento centrado en confiabilidad.

### 2.1.2.1 CONFORMACIÓN DE EQUIPO NATURAL DE TRABAJO EN EL PROCESO RCM

En esta primera etapa, es necesario asegurar que todos los puntos de vista estarán contemplados a la hora de hacer el estudio, de modo que es fundamental crear un equipo natural de trabajo constituido por personas con distintas funciones dentro de la organización, pero que a la vez estén relacionadas con el proceso a analizar. Con este grupo se desarrollará una mesa de trabajo durante un periodo de tiempo, en donde se discutirá efectivamente la situación presente, en una atmósfera relajada e informal donde los desacuerdos sean ampliamente debatidos con el fin de resolverlos. Además, no existen jerarquías en el grupo de trabajo, se escucha a cada uno y no hay miedo a hacer sugerencias

A continuación, se muestran las personas seleccionadas, su cargo y la descripción del área a la que pertenecen dentro de la organización:

**Tabla 2.1**

*Integrantes de equipo de trabajo para implementación de metodología RCM*

<i>Nombre</i>	<i>Área encargada</i>	<i>Cargo</i>	<i>Rol</i>
Alfredo Morello	Mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Facilitador
Sebastián Vargas	Administrativa	Gerente General	Ingeniero de Procesos
Carlos Pérez	Instalación	Supervisor de	Especialista
Mauricio Torrejón	Instalación	Técnico en Refrigeración	Operador
Juan López	Mantenimiento	Técnico en Refrigeración	Mantenedor
Juan de La Cruz	Mantenimiento	Técnico Eléctrico	Mantenedor

*Nota:* Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla anterior, cada una de las personas seleccionadas cumple sus funciones en áreas involucradas en el mantenimiento del sistema de refrigeración. Tenemos a los jefes y supervisores encargados de la planificación del área de instalación y mantenimiento, y también a los técnicos que operan comúnmente el equipo. Esta colaboración tiene como propósito aportar con una variedad de datos importantes para desarrollar un buen análisis.

## 2.1.2.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA Y DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

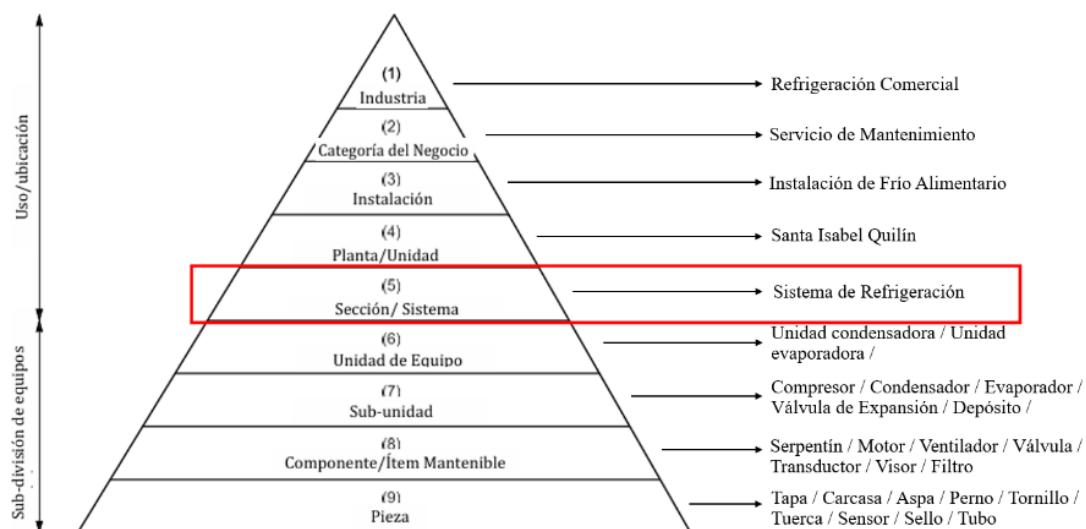
Posteriormente a haber reunido al grupo de trabajo, procede delimitar el sistema a estudiar, determinando su composición y los elementos de nivel inmediatamente inferior que lo componen, para luego proceder a jerarquizar de acuerdo con los criterios de mayor importancia y criticidad en el contexto operacional en el que operan.

### NIVEL DE DETALLE

Una guía recomendada para definir exitosamente una taxonomía es la Norma ISO 14224, la que nos permite definir los límites de contorno del sistema a evaluar y determinar los ítems mantenibles dentro de los subsistemas de los equipos.

**Figura 2.4**

*Taxonomía del Sistema de Refrigeración*



*Fuente: Adaptado de Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, página 30, ISO 14224 (2016).*

La mayor eficiencia y significancia de los resultados obtenidos por el RCM es a partir del análisis de los “sistemas” como nivel de detalle en la organización debido a que su identificación ofrece la información más detallada y precisa.

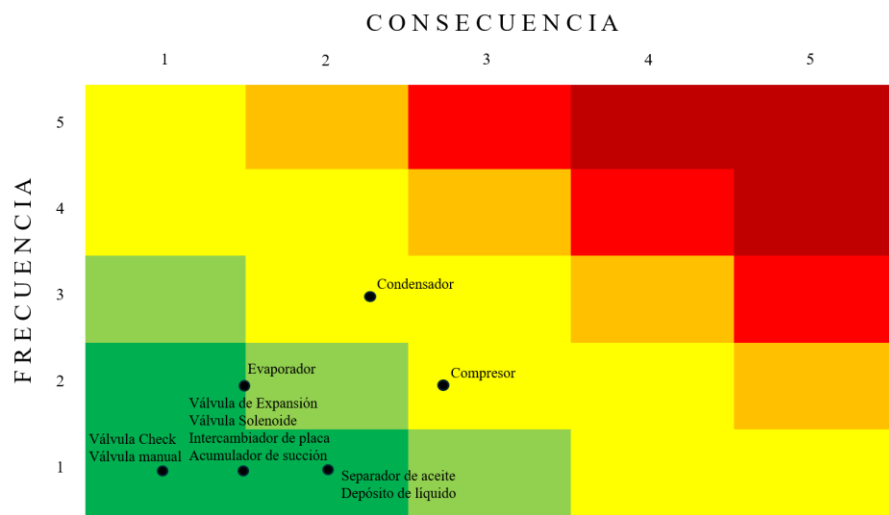
## PRIORIDAD DE CADA COMPONENTE

Un método de criticidad cualitativo muy utilizado dentro de las aplicaciones de RCM es el proceso de jerarquización de sistemas basado en una matriz que evalúa el factor “riesgo”. Este método integra el análisis de la probabilidad (frecuencia) de que se produzca una falla y las consecuencias (nivel de severidad) que pueden traer consigo las fallas de los sistemas a evaluar. Las consecuencias se pueden calcular matemáticamente como un producto entre las diferentes formas de impacto: seguridad y salud, medioambiente y producción.

El proceso de evaluación de cada factor se realiza a través de la asignación de un valor numérico que va desde el 1 al 5, donde 1 representa la condición más favorable y 5 la más desfavorable, tal como indica la Figura 2.5.

**Figura 2.5**

*Matriz de criticidad para componentes de Sistema de Refrigeración*



*Nota:* Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 2.5, la matriz de criticidad esclarece los activos más prioritarios dentro de la instalación y que están contenidos dentro de la unidad condensadora: compresor scroll y condensador de tubo aletado, principalmente justificados por el alto nivel de riesgo de producción que significaría la falla funcional de unos de estos componentes. La pérdida de la función requerida de una unidad evaporadora afectaría sólo a la cámara o mueble que lo contiene. Por el contrario, la falla de un compresor o condensador implicaría una disminución considerable de rendimiento en todas las unidades evaporadoras conectadas a este componente, lo que podría provocar en el peor de los casos altos costos de pérdidas de productos mermados que han perdido su cadena de frío. Esto es significativamente importante, no sólo por la caída de la rentabilidad de la organización sino también por las posibles sanciones que podrían existir por parte de la Seremi de Salud.

### **2.1.2.3 DESARROLLO DEL CONTEXTO OPERACIONAL**

Una vez identificados los sistemas críticos, la metodología RCM propone que se desarrolle el contexto operacional. Una guía recomendada para el desarrollo del contexto operacional es la Norma SAE JA 1012.

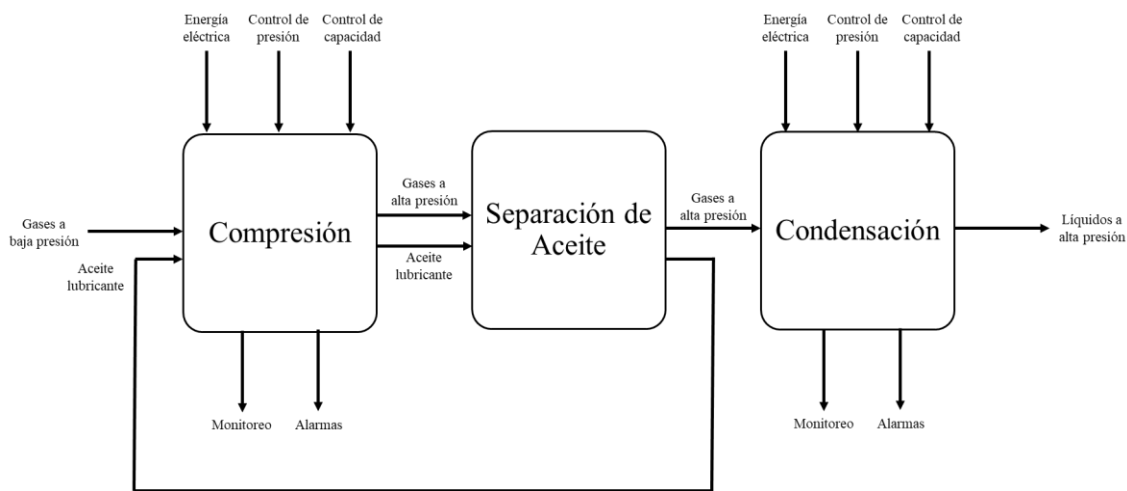
Como ambos activos críticos están contenidos en la unidad condensadora, existen algunas similitudes en su contexto operacional. La intensidad de las operaciones es de lunes a domingo durante todo el día, es decir, su operación es un proceso fluido en el que no hay detenciones y no requiere de un operador para funcionar; por el contrario, la presencia técnica de los operadores es sólo en servicios correctivos y períodos de mantenimiento. Dada la hermeticidad de un sistema de refrigeración, no todos los elementos del sistema se consideran ítems mantenibles. Esto quiere decir que para algunos de ellos no se destinan recursos en realizar actividades preventivas, sino que sólo son sustituidos cuando fallan.

El lugar de sus operaciones es en Santiago de Chile, en un clima templado. El estándar de calidad es garantizar el óptimo desempeño, seguridad y eficiencia energética del sistema. Los estándares ambientales están regulados por el tratado internacional denominado Protocolo de Montreal que está diseñado para proteger la capa de ozono de las sustancias que la agotan. Los estándares de seguridad son altos ya que en caso de cualquier falla se envían señales de advertencia

al panel del control de la unidad condensadora para tomar acciones al respecto. Son elementos que no tienen redundancia; cada una de las cuatro unidades posee dos compresores y dos condensadores para satisfacer su propio requerimiento térmico. En cuanto a los repuestos, se tiene una gran confiabilidad de suministros debido a que se cuenta con stock en caso de ser demandado. Además, se tienen proveedores establecidos y certificados como Epta, R&R, Inema o Intercal.

**Figura 2.6**

*Diagrama EPS para activos críticos*



*Nota:* Elaboración propia.

### **COMPRESOR SCROLL EMERSON COPELAND ZX45KCE-TFD-558**

Este activo tiene como propósito succionar el vapor de refrigerante y comprimirlo hasta su presión de condensación, entre 290 y 350 PSIG, para mantener una temperatura de condensación estables de 45°C. Esto lo realiza succionando el vapor de refrigerante proveniente del acumulador de succión, que asegura el ingreso de refrigerante en estado de vapor, a un caudal de 17,1 m<sup>3</sup>/h. Luego, lo comprime mediante la reducción de volumen de los espirales tipo scroll, incrementando tanto la presión como la temperatura y llevando al refrigerante desde la presión de evaporación hasta la presión de condensación. La capacidad nominal es de 45.000 BTU/h, funciona con una red trifásica de 380-420v/50Hz y tiene un COP de 2,4. El vapor a alta presión facilita su posterior

condensación y es impulsado desde el compresor hacia el separador de aceite. Este último componente tiene una capacidad de 2,5 L y cuenta con una cañería que retorna al depósito de aceite de la parte inferior del compresor. La gestión de aceite lo realiza un elemento de acople denominado OM3, el cual funciona con un sensor de nivel y una válvula solenoide de 24v/50Hz que permite el ingreso de aceite al compresor. Tiene la facultad de detener al compresor si el nivel de aceite cae por debajo del 25%.

## **CONDENSADOR DE TUBO ALETADO**

Este activo tiene como propósito condensar el vapor de refrigerante a una presión de 290  $\pm$ 30 PSIG. Esto lo ejecuta recibiendo el vapor proveniente del separador de aceite, para ceder al ambiente el calor absorbido por el refrigerante en los procesos de evaporación y compresión. El intercambio de calor es optimizado mediante la operación simultánea de dos ventiladores tipo axial de 220v/50Hz, con una potencia nominal de 950 W, moviendo un caudal de 19280 m<sup>3</sup>/h. Esta convección forzada es comandada por un control de capacidad electrónico que recibe señales de un transductor de presión, las analiza y actúa sobre un variador de frecuencia contenido en el motor, modificando la velocidad de giro que necesita el ventilador para satisfacer la demanda térmica. A mayor presión de refrigerante a la salida del condensador, mayor será la velocidad de giro del motor correspondiente a 850 rpm. A la salida del serpentín, el refrigerante líquido se dirige hacia el intercambiador de calor de subenfriado para disminuir aún más su temperatura.

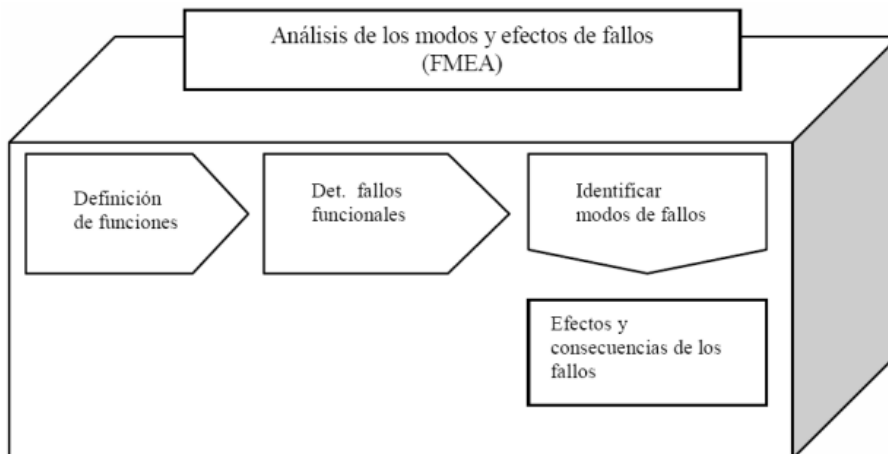
### **2.1.2.4 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE MODO Y EFECTOS DE FALLA PARA ACTIVOS CRÍTICOS (FMECA)**

El análisis FMECA es un método sistemático que permite estudiar todas las formas en los que puede fallar un activo dentro de un proceso, identificando las posibles consecuencias de estas fallas en función de la seguridad humana, medioambiente e impacto en la producción. A partir de este análisis, se obtiene la información necesaria para seleccionar adecuadamente las actividades de mantenimiento.

“El proceso de prevención de los modos de fallas tiene más que ver con la eliminación o reducción de las consecuencias que con la prevención misma de ellos, es decir, una actividad de prevención será eficiente sólo si elimina o minimiza la ocurrencia de las posibles consecuencias a prevenir dentro del contexto operacional” (Crespo y Parra, 2008). Es esto lo que diferencia al RCM a la forma tradicional de gestionar el mantenimiento. Cada falla funcional puede tener más de un modo de falla.

### Figura 2.7

Esquema de análisis de los modos y efectos de fallas



Fuente: Tomada de *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos - Desarrollo y aplicación práctica de una Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM)*, página 128, Parra, C., & Crespo, A. (2015).

De acuerdo con el análisis realizado, se identificó que la mayoría de los modos de falla asociados a los componentes críticos del sistema están relacionados con problemas eléctricos. En concreto, el 80% de estas fallas tienen su origen en factores eléctricos, como detenciones provocadas por elementos de seguridad, descalibración de dispositivos de control o quemado de motores y bobinas. En contraste, solo un 20% de los modos de falla analizados corresponden a problemas mecánicos, los cuales incluyen desgaste de componentes internos del compresor, obstrucción de componentes, contaminación o fugas de refrigerante.

Cabe destacar que durante el ciclo de compresión se experimentan diversas detenciones que no necesariamente significan una pérdida de la función requerida. Por ejemplo, cuando el compresor se detiene por alta presión de condensación, aparentemente deja de comprimir, pero es sólo momentáneo, ya que próximamente volverá a funcionar cuando la presión descienda algunos niveles. Sin embargo, cuando la presión vuelve a su rango y aun así el compresor no enciende, eso sí representa una falla funcional. En el análisis representado por las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4, detallaremos una amplia cantidad de modos de falla relacionado a este ítem.

**Tabla 2.2**

*Análisis FMECA de Compresor (1/3)*

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla
Compresor Scroll Emerson Copeland ZX45KCE-TFD-558	1	Succionar el vapor de refrigerante y comprimirlo hasta su presión de condensación (290-350 PSig)	1.1	FT: No comprime	1.1.1	Ausencia de señal de control de compresor	Evidente: Sí      Afecta SHA: No Efecto operacional: Reducción de la capacidad a la mitad Acción correctiva: Revisión de la causa
					1.1.2	Contactador de compresor sin acción de enclavamiento	Acción correctiva: Reemplazo de contactor
					1.1.3	Compresor quemado	Síntoma: Olor a quemado, humo Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema
					1.1.4	Lectura de nivel de aceite inapropiada en relación al proceso real	Síntoma: Nivel de aceite insuficiente Acción correctiva: Reemplazo OM3
					1.1.5	Válvula solenoide OM3 quemada	Síntoma: Nivel de aceite insuficiente, alarma OM3 Acción correctiva: Reemplazo de válvula solenoide de OM3
					1.1.6	Detención por presostato de baja presión	Señal: Alarma presostato de baja Acción correctiva: Revisión de la causa
					1.1.7	Detención por presostato de alta presión	Evidente: Sí      Afecta SHA: Sí Señal: Alarma presostato de alta Acción correctiva: Revisión de la causa
					1.1.8	Detención por termostato de descarga	Señal: Alarma de termostato de descarga Acción correctiva: Revisión de la causa
					1.1.9	Rotura en las piezas del scroll	Evidente: No      Afecta SHA: No Vibraciones anómalas Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema
					1.1.10	Rotura del eje de motor	Vibraciones anómalas Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema

*Nota:* Elaboración propia. Lo mismo aplica para las Tablas 2.3 y 2.4.

**Tabla 2.3**

*Análisis FMECA de Compresor (2/3)*

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla
Compresor Scroll Emerson Copeland ZX45KCE-TFD-558	1	Succionar el vapor de refrigerante y comprimirlo hasta su presión de condensación (290-350 PSig)	1.2	FP: Presión de descarga bajo del rango (<290 psig)	1.2.1	Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: Sí      Afecta SHA: No      Efecto operacional: Reducción de la capacidad Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión
					1.2.2	Regulación inapropiada de controlador	Acción correctiva: Modificación de parámetros de control
					1.2.3	Filtro de succión obstruido	Síntoma: Presión excesiva en entrada del filtro e insuficiente en la succión Acción correctiva: Reemplazo del filtro, vacío, restauración del sistema
					1.2.4	Carga insuficiente de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo insuficientes Acción correctiva: Carga de refrigerante al sistema
					1.2.5	Fuga de refrigerante	Evidente: Sí      Afecta SHA: Sí Síntoma: Olor a refrigerante, manchas de aceite Acción correctiva: Búsqueda de fuga, corrección, restauración del sistema
					1.2.6	Desgaste en las piezas del scroll	Evidente: No      Afecta SHA: No Síntoma: Ruido, vibraciones anómalas Acción correctiva: Optimizar las condiciones de operación
					1.2.7	Obstrucción en el acumulador de succión	Síntoma: Presión excesiva en entrada del acumulador e insuficiente en la succión Acción correctiva: Reemplazo de acumulador de succión

**Tabla 2.4**

*Análisis FMECA de Compresor (3/3)*

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla
Compresor Scroll Emerson Copeland ZX45KCE-TFD-558	1	Succionar el vapor de refrigerante y comprimirlo hasta su presión de condensación (290-350 PSig)	1.3	FP: Presión de descarga sobre el rango (>350 psig)	1.3.1	Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: Sí      Afecta SHA: No      Efecto operacional: Reducción de la capacidad Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión
					1.3.2	Regulación inapropiada de controlador	Acción correctiva: Modificación de parámetros
					1.3.3	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	Acción correctiva: Revisión de la causa
					1.3.4	Exceso de carga térmica	Evento externo a la unidad condensadora
					1.3.5	Obstrucción en el serpentín del condensador	Acción correctiva: Acondicionar serpentín
					1.3.6	Carga excesiva de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Recuperación de refrigerante del sistema
					1.3.7	Presencia de humedad o gases no condensables	Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga
					1.3.8	Obstrucción en el separador de aceite	Síntoma: Presión excesiva en entrada del separador e insuficiente en la entrada al condensador Acción correctiva: Reemplazo de separador de aceite

Por otra parte, la revisión de la Tabla 2.5, 2.6 y 2.7 del condensador arrojó varios modos de falla que se replican en el análisis del compresor. Esto se explica porque el sistema de refrigeración es un sistema cerrado donde las fallas de un componente traen consecuencias a los demás del circuito. Además, ambos están contenidos en la unidad condensadora y comandados por el mismo controlador.

**Tabla 2.5**

*Análisis FMECA de Condensador (1/3)*

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla
Condensador de tubo aletado	2	Ceder calor al ambiente para condensar el vapor de refrigerante comprimido (290 ±30 PSig)	2.1	FT: No produce condensación	2.1.1	Ausencia de señal de control de ventilador	Evidente: Sí      Afecta SHA: No      Efecto operacional: Reducción de la capacidad Acción correctiva: Revisión de la causa
					2.1.2	Contactador de ventilador sin acción de enclavamiento	Acción correctiva: Reemplazo de contactor
					2.1.3	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	Acción correctiva: Revisión de la causa
					2.1.4	Obstrucción en el serpentín	Síntoma: Temperatura excesiva en el condensador Acción correctiva: Acondicionar serpentín
					2.1.5	Carga excesiva de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Recuperación de refrigerante del sistema
					2.1.6	Presencia de humedad o gases no condensables	Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga
					2.1.7	Ventilador quemado	Evidente: Sí      Afecta SHA: Sí      Efecto operacional: Reducción de la capacidad Olor a quemado, humo

*Nota:* Elaboración propia. Lo mismo aplica para las Tablas 2.6 y 2.7.

**Tabla 2.6**

*Análisis FMECA de Condensador (2/3)*

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla			
Condensador de tubo aletado	2	Ceder calor al ambiente para condensar el vapor de refrigerante comprimido (290 ±30 PSig)	2.2	FP: Presión de condensación bajo el rango (<250 psig)	2.2.1	Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: Sí	Afecta SHA: No	Efecto operacional: Reducción de la capacidad	
							Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión			
					2.2.2	Velocidad de giro excesiva de ventiladores	Acción correctiva: Revisión de la causa			
					2.2.3	Compresión insuficiente	Ver 1.2			
					2.2.4	Carga insuficiente de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo insuficientes Acción correctiva: Carga de refrigerante al sistema			
					2.2.5	Obstrucción en el separador de aceite	Síntoma: Presión excesiva en la entrada del separador Acción correctiva: Reemplazo de separador de aceite			
					2.2.6	Fuga de refrigerante	Evidente: Sí	Afecta SHA: Sí	Síntoma: Olor a refrigerante, manchas de aceite Acción correctiva: Búsqueda de fuga, corrección, restauración del sistema	

**Tabla 2.7**

*Análisis FMECA de Condensador (3/3)*

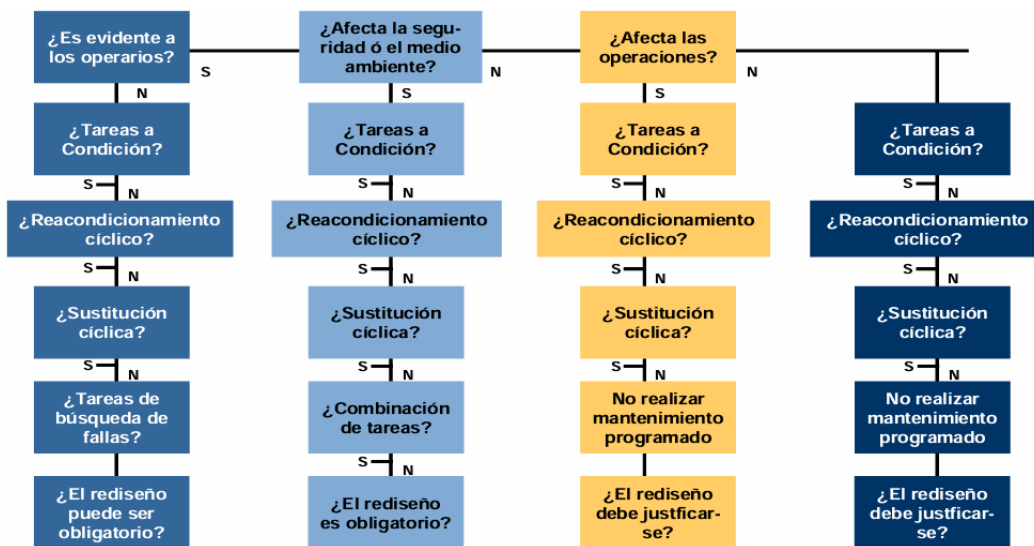
Condensador de tubo aletado	2	Ceder calor al ambiente para condensar el vapor de refrigerante comprimido (290 ±30 PSig)	2.3	FP: Presión de condensación sobre el rango (<330 psig)	2.3.1	Ausencia de señal de control de ventilador	Evidente: Sí	Afecta SHA: No	Efecto operacional: Reducción de la capacidad	
							Acción correctiva: Revisión de la causa			
					2.3.2	Lectura errónea de transductor de presión	Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión			
					2.3.3	Contactador de ventilador sin acción de enclavamiento	Acción correctiva: Reemplazo de contactor			
					2.3.4	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	Acción correctiva: Revisión de la causa			
					2.3.5	Exceso de carga térmica	Evento externo a la unidad condensadora			
					2.3.6	Compresión excesiva	Ver 1.2			
					2.3.7	Obstrucción en el serpentín	Síntoma: Temperatura excesiva en el condensador Acción correctiva: Acondicionar serpentín			
					2.3.8	Carga excesiva de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Recuperación de refrigerante del sistema			
					2.3.9	Presencia de humedad o gases no condensables	Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga			
					2.3.10	Obstrucción en el depósito de líquido	Síntoma: Presión excesiva en la entrada del depósito Acción correctiva: Reemplazo del depósito de líquido			
2.3.11	Ventilador quemado	Evidente: Sí	Afecta SHA: Sí	Efecto operacional: Reducción de la capacidad Olor a quemado, humo						

### 2.1.2.5 SELECCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Una vez realizado el FMECA, el equipo de trabajo deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de falla previamente identificado, mediante el árbol lógico de decisión del RCM ilustrado por la Figura 2.8.

**Figura 2.8**

*Árbol lógico de Decisión del RCM*



*Fuente: Tomada de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos - Desarrollo y aplicación práctica de una Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM), página 136, Parra, C., & Crespo, A. (2015).*

Después de seleccionar las actividades de mantenimiento a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la tarea a ejecutar para cada una con su respectiva frecuencia de ejecución. El RCM clasifica las actividades de mantenimiento en dos grandes grupos: las de actividades preventivas (proactivas) y las actividades correctivas, estas últimas, se ejecutarán sólo en el caso de no encontrar una actividad efectiva de mantenimiento preventivo.

Para una visión resumida y enfocada en las acciones tomadas, la Tabla 2.8 y 2.9 sintetiza las actividades de mantenimiento propuestas mediante la metodología RCM, indicando la frecuencia de aplicación recomendada para cada tarea.

**Tabla 2.8**

*Resumen Actividades de Mantenimiento propuestas por RCM (1/2)*

<i>Modo de Falla</i>	<i>Actividad de Mantenimiento</i>	<i>Acción a ejecutar</i>	<i>Frecuencia de Aplicación</i>
1.1.9 1.2.6	Tarea a condición	LUBRICACIÓN Monitorear variables de operación para analizar su comportamiento en el tiempo y anticipar posibles fallos en función de las condiciones de operación: - Nivel de aceite en visor (1/4 - lleno) - Presión de aceite (1 - 3bar) Si cualquiera de estos parámetros se encuentra fuera de rango, inspeccionar circuito de lubricación.	Diario Mensual
	Tarea a condición	Con el compresor apagado y frío se toma una muestra de aceite de aproximadamente 50ml en un recipiente con tapa para evitar contaminación, aflojando lentamente el tapón de drenaje para evitar salpicaduras. Usando un kit de prueba de acidez e inspección visual, evaluar bajo los siguientes parámetros: - Color y olor - Acidez - Contaminación con partículas metálicas y residuos El aceite debe ser reemplazado cuando se cumplan uno o más de estos criterios: - Color oscuro u olor a quemado - TAN superior a 0,05 mg KOH/g - Presencia de partículas metálicas	Semestral
1.1.10	Tarea a condición	ANÁLISIS DE VIBRACIONES Monitorear variables de operación para analizar su comportamiento en el tiempo y anticipar posibles fallos en función de las condiciones de operación. Con el compresor apagado, situar los sensores en carcasa, tuberías y pernos de base, uno a la vez. Encender el compresor y realizar mediciones en dirección radial, axial y tangencial. Registrar las mediciones en cada punto, analizando sus amplitudes y frecuencias de vibración. Comparar los valores con los recomendados del fabricante. Si se detectan picos anormales, programar una inspección mecánica.	Semestral
1.2.5 2.2.6	Tarea a condición	BÚSQUEDA DE FUGAS Comprobar sistemáticamente potenciales puntos de fuga, considerando como mínimo uniones, válvulas, partes del sistema sujeta a vibraciones, filtros y conexiones a elementos de seguridad y control. Las fugas se deben identificar de las siguientes formas: - Nivel de refrigerante en depósito de líquido - Inspección visual en busca de rastros de aceite - Soluciones espumosas en lugares con sospecha de fuga - Localizadores de fugas por ultrasonido y cámara termográfica En caso de detectarse fugas se deben reparar lo antes posible.	Mensual Mensual Mensual Anual
1.3.5 2.1.4 2.3.7	Reacondicionamiento cíclico	LAVADO DE SERPENTÍN Realizar sistemáticamente un acondicionamiento del serpentín con las siguientes tareas: - Eliminar el polvo y la suciedad superficial con un cepillo suave - Lavar con agua protegiendo elementos eléctricos para evitar que se mojen. Rociar detergente con un pulverizador y dejar actuar durante 5 a 10min. Enjuagar con una hidrolavadora cuidando el ángulo de impacto para evitar dañar las aletas de aluminio - Enderezamiento de aletas con un peine	Bimestral

*Nota:* Elaboración propia. Lo mismo aplica para la Tablas 2.9.



**CAPÍTULO 3:    EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN RCM**

### **3.1 ANÁLISIS DE IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN RCM**

La aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en el sistema de refrigeración comercial del supermercado Santa Isabel Quilín tiene un impacto significativo en la planificación y ejecución del mantenimiento. En los siguientes apartados, realizaremos una evaluación de la propuesta realizada.

#### **3.1.1 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE MODOS DE FALLA**

A continuación, se profundizará en los cálculos económicos de los modos de falla más críticos de los resultados del RCM, para evaluar su seriedad e impacto operacional.

##### **3.1.1.1 COSTOS DE FALLAS Y RIESGOS**

Los costos de fallas y riesgos se calcularon combinando la probabilidad de ocurrencia, el tiempo de intervención y distintos costos involucrados. Frente a cualquier falla, existen riesgos de pérdida de dinero para ambas empresas asociadas. Para Sustenta, el riesgo radica en la cantidad de mano de obra que necesitará para la intervención. En cambio, para Cencosud, el riesgo se basa principalmente en la cantidad de producto deteriorado por pérdida de la cadena de frío, además de costear el valor del repuesto. Para una comprensión más detallada del desarrollo del FMECA, se puede consultar los Anexos 5 y 6 donde se presenta el desarrollo de cada modo de falla.

A continuación, se presentarán los principales factores y costos involucrados en el riesgo de que los activos críticos presenten los modos de falla propuestos, evaluados en el período de tiempo de un año:

**Tabla 3.1***Evaluación de fallas y riesgos de Compresor*

#	Modo de Falla	Frecuencia (fallas/año)	MTTR (h)	Valor HH (CLP)	Valor Repuesto (CLP)	Pérdida de productos (CLP/h)	Riesgo Cuantitativo (CLP/año)
1.1.1	Ausencia de señal de control de compresor	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	\$127.938
1.1.2	Contactador de compresor sin acción de enclavamiento	0,1	0,8	\$4.440	\$68.430	\$85.508	\$14.039
1.1.3	Compresor quemado	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.203.413	\$780.829
1.1.4	Lectura de nivel de aceite inapropiada en relación al proceso real	0,15	2,4	\$4.440	\$344.000	\$271.426	\$150.912
1.1.5	Válvula solenoide OM3 quemada	0,12	1,2	\$4.440	\$113.450	\$130.074	\$32.984
1.1.6	Detención por presostato de baja presión	0,3	2,5	\$4.440	\$0	\$283.745	\$216.139
1.1.7	Detención por presostato de alta presión	3,2	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	\$810.036
1.1.8	Detención por termostato de descarga	1,6	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	\$303.366
1.1.9	Rotura en las piezas del scroll	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.203.413	\$780.829
1.1.10	Rotura del eje de motor	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.203.413	\$780.829
1.2.1	Lectura errónea de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$82.770	\$152.824	\$151.470
1.2.2	Regulación inapropiada de controlador	1,3	0,5	\$4.440	\$0	\$52.886	\$37.262
1.2.3	Filtro de succión obstruido	0,2	2,8	\$4.440	\$38.400	\$321.217	\$190.048
1.2.4	Carga insuficiente de refrigerante	0,25	2,5	\$4.440	\$640.000	\$283.745	\$340.116
1.2.5	Fuga de refrigerante	0,3	6,5	\$4.440	\$640.000	\$853.527	\$1.865.036
1.2.6	Desgaste en las piezas del scroll	0,1	3,5	\$4.440	\$0	\$411.742	\$145.664
1.2.7	Obstrucción en el acumulador de succión	0,05	5,7	\$4.440	\$328.800	\$726.599	\$224.786
1.3.1	Lectura errónea de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$5.570	\$152.824	\$112.870
1.3.2	Regulación inapropiada de controlador	1,3	0,5	\$4.440	\$0	\$52.886	\$37.262
1.3.3	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	0,25	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	\$47.401
1.3.4	Exceso de carga térmica	0	0	\$0	\$0	\$0	\$0
1.3.5	Obstrucción en el serpentín del condensador	2,5	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	\$632.840
1.3.6	Carga excesiva de refrigerante	0,05	2,5	\$4.440	\$0	\$283.745	\$36.023
1.3.7	Presencia de humedad o gases no condensables	0,1	8,5	\$4.440	\$115.200	\$1.203.413	\$1.038.195
1.3.8	Obstrucción en el separador de aceite	0,05	5,7	\$4.440	\$399.000	\$726.599	\$228.296

*Nota:* Elaboración propia.

**Tabla 3.2***Evaluación de fallas y riesgos de Condensador*

#	Modo de Falla	Frecuencia (fallas/año)	MTTR (h)	Valor HH (CLP)	Valor Repuesto (CLP)	Pérdida de productos (CLP/h)	Riesgo Cuantitativo (CLP/año)
2.1.1	Ausencia de señal de control de ventilador	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	\$127.938
2.1.2	Contactador de ventilador sin acción de enclavamiento	0,1	0,8	\$4.440	\$68.430	\$85.508	\$14.039
2.1.3	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	0,25	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	\$47.401
2.1.4	Obstrucción en el serpentín	2,5	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	\$632.840
2.1.5	Carga excesiva de refrigerante	0,05	2,5	\$4.440	\$0	\$283.745	\$36.023
2.1.6	Presencia de humedad o gases no condensables	0,1	8,5	\$4.440	\$115.200	\$1.203.413	\$1.038.195
2.1.7	Ventilador quemado	0,2	1,8	\$4.440	\$283.350	\$199.281	\$130.009
2.2.1	Lectura errónea de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$2.740	\$152.824	\$111.455
2.2.2	Velocidad de giro excesiva de ventiladores	0,25	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	\$47.401
2.2.3	Compresión insuficiente	0	0	\$0	\$0	\$0	\$0
2.2.4	Carga insuficiente de refrigerante	0,25	2,5	\$4.440	\$640.000	\$283.745	\$340.116
2.2.5	Obstrucción en el separador de aceite	0,05	5,7	\$4.440	\$399.000	\$726.599	\$228.296
2.2.6	Fuga de refrigerante	0,3	6,5	\$4.440	\$640.000	\$853.527	\$1.865.036
2.3.1	Ausencia de señal de control de ventilador	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	\$127.938
2.3.2	Lectura errónea de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$5.570	\$152.824	\$112.870
2.3.3	Contactador de ventilador sin acción de enclavamiento	0,1	0,8	\$4.440	\$68.430	\$85.508	\$14.039
2.3.4	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	0,25	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	\$47.401
2.3.5	Exceso de carga térmica	0	0	\$0	\$0	\$0	\$0
2.3.6	Compresión excesiva	0	0	\$0	\$0	\$0	\$0
2.3.7	Obstrucción en el serpentín	2,5	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	\$632.840
2.3.8	Carga excesiva de refrigerante	0,05	2,5	\$4.440	\$0	\$283.745	\$36.023
2.3.9	Presencia de humedad o gases no condensables	0,1	8,5	\$4.440	\$115.200	\$1.203.413	\$1.038.195
3.10	Obstrucción en el depósito de líquido	0,05	5,7	\$4.440	\$425.025	\$726.599	\$229.597
3.11	Ventilador quemado	0,2	1,8	\$4.440	\$283.350	\$199.281	\$130.009

*Nota:* Elaboración propia.

Los valores utilizados en el análisis económico fueron obtenidos a partir de tres fuentes principales: uno, de la experiencia del autor en el rubro de mantenimiento de sistemas de refrigeración; dos, interacciones habladas con técnicos de mantenimiento y especialistas en refrigeración comercial de supermercados; y tres, revisión de datos históricos proporcionados por supermercados con características operacionales similares.

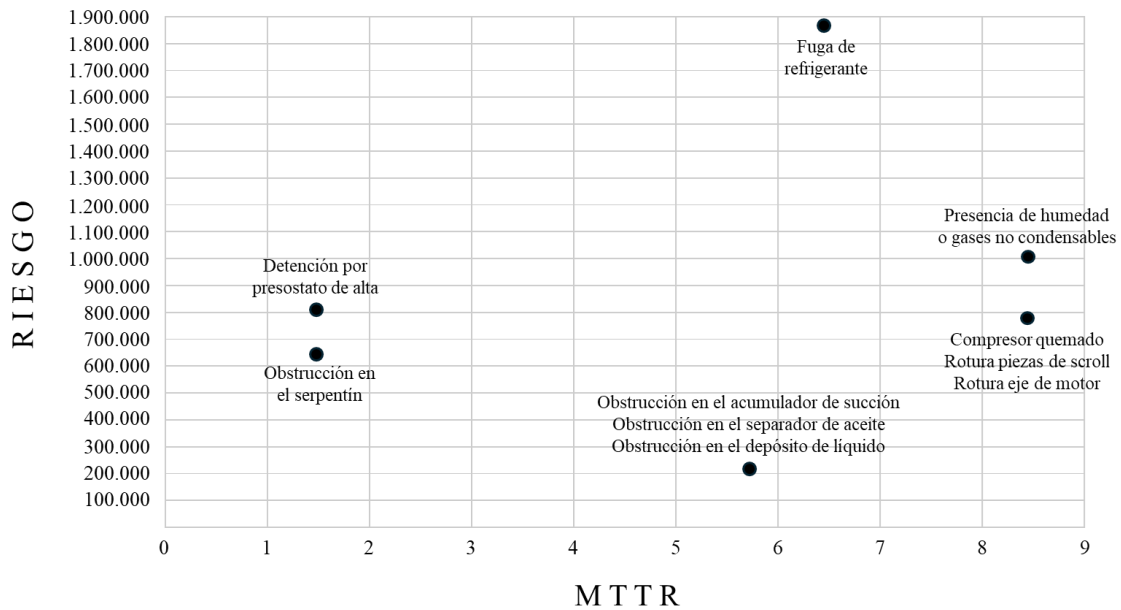
Para la estimación del “Valor HH”, se consideró un sueldo mensual de \$800.000 CLP correspondiente a la remuneración promedio de un técnico especializado en refrigeración según trabajadores del mismo rubro. Este cálculo se realizó dividiendo el sueldo mensual por la cantidad de horas laborales estándar en Chile (45 horas semanales), lo que resulta en un valor de \$4.440 CLP por hora. En este monto no se incluyen beneficios adicionales como costos de seguridad social, transporte o herramientas, los cuales pueden representar un porcentaje adicional dependiendo del tipo de contrato y empresa.

El “Valor Repuesto” se determinó a partir de cotizaciones directas realizadas con el fabricante Emerson Copeland y con proveedores oficiales de Sustenta, tales como Inema e Intercal. Estos valores corresponden a precios de mercado actualizados y consideran las especificaciones técnicas requeridas para el sistema de refrigeración analizado

A continuación, se presenta un gráfico de dispersión que resume los puntos identificados en el análisis.

**Figura 3.1**

*Evaluación cuantitativa de modos de fallas de componentes críticos*



*Nota:* Esta figura de elaboración propia no contempla todos los modos de falla propuestos, sino sólo los más costosos.

Como lo indica la Figura 3.1, podemos deducir que la “Fuga de refrigerante” y la “Presencia de humedad y gases condensables”, además de las fallas asociados al reemplazo del compresor, son los modos de fallas más críticos dadas sus extensas horas de intervención y altos costos relacionados a su corrección. Además, los modos de falla relacionados a obstrucción de componentes herméticos como separador de aceite, depósito de líquido y acumulador de succión destacan por sus altas horas de labores y medianos costos, pero carecen de probabilidad de ocurrencia. Adicionalmente, “Detención por presostato de alta presión”, y “Obstrucción en el serpentín” destacan por su mayor frecuencia durante el año, ambos ligados a la misma causa: deficiente intercambio de calor con el medio condensante en épocas de verano.

### **3.1.1.2 EXPLICACIÓN DE CÁLCULOS DE COSTOS**

A continuación, se presentará el origen de dos costos involucrados en el riesgo cuantitativo de cada modo de falla.

#### **PÉRDIDA DE PRODUCTOS**

Dado que no existe un técnico de refrigeración de planta, los modos de falla sólo se darán a conocer cuando exista un efecto de falla identificado por la tecnología de calidad del supermercado, la cual se percatará que el punto de frío no se encuentra a la temperatura requerida. Es aquí donde el supermercado adopta una estrategia preventiva de reubicación de productos en riesgo hacia cámaras que se encuentren en funcionamiento óptimo, disminuyendo considerablemente el riesgo de pérdida catastrófica. La columna “Pérdida de Productos” es el resultado estimativo de la siguiente fórmula:

$$P(t) = V * (e^{k*t} - 1)$$

Donde:

- $P(t)$  es la pérdida de mercancía que aumenta exponencialmente en función del tiempo.
- $V$  es el valor de los productos totales que pueden deteriorarse considerando la estrategia de reubicación del supermercado. Aunque no se dispone de una cifra estadística exacta, se ha estimado un valor optimista con una eficacia del 90% de eficacia, es decir,  $\$15.000.000 * 10\% = \$1.500.000$ .
- $k$  es el coeficiente de deterioro establecido en 0,0693 para que, en un transcurso de 10 horas (según la experiencia operativa del supermercado) de la identificación de la falla funcional, ocurra una pérdida total de los productos perecederos. Este factor se determinó mediante estimaciones, ajustando la ecuación de pérdida exponencial para que la pérdida total ocurra en 10 horas, según el escenario definido.
- $t$  es el tiempo expresado en horas transcurridas desde la detención.

## RIESGO CUANTITATIVO

El “Riesgo cuantitativo” es la suma total de los costos asociados a la ocurrencia de un modo de falla, tanto para Sustenta como Cencosud. Corresponde al resultado de la siguiente fórmula:

$$R = f * ((MTTR * (HH + P)) + VR)$$

Donde:

- $f$  es la frecuencia de fallas en un año.
- $MTTR$  es el tiempo promedio de reparación.
- $HH$  son las horas hombre destinadas a la ejecución del trabajo.
- $P$  es el costo de mercancía deteriorada por pérdida de la cadena de frío.
- $VR$  es el valor del repuesto utilizado.

### **3.1.1.3 COMPARACIÓN DE COSTOS CORRECTIVOS VS PREVENTIVOS**

Se ha realizado un estudio comparativo entre el impacto financiero de la ocurrencia de dicha falla en comparación con los costos asociados a la ejecución de acciones preventivas. Para esta comparación, se cuantificaron los posibles efectos financieros de una falla y los costos de las actividades preventivas necesarias para mitigar el riesgo de dicha falla, tomando en cuenta los recursos humanos, materiales y tecnológicos requeridos para su implementación.

Existen herramientas e instrumentos que Sustenta no contiene en su listado de recursos técnicos como el detector de ultrasonido, kit de análisis de aceite, cámara termográfica y analizador de vibraciones. Esto provoca una necesidad de arrendar el dispositivo para poder llevar a cabo las actividades de mantenimiento que los utilizan.

Al realizar la comparación de ambos costos, se observó que el presupuesto anual destinado a las actividades preventivas es considerablemente menor que los costos asociados a la corrección de una falla inesperada. La Tabla 3.3, nos ilustra los resultados de esta comparación. La columna “Riesgo vs Presupuesto” es la evaluación de ambos costos y sólo será verde si los costos preventivos son menores que el riesgo de una falla.

**Tabla 3.3**

*Comparación riesgo cuantitativo v/s presupuesto anual*

#	Modo de Falla	Riesgo Cuantitativo (CLP/año)	Acción a ejecutar	Presupuesto Anual (CLP/año)	Riesgo vs Presupuesto (CLP/año)
1.1.1	Ausencia de señal de control de compresor / ventilador	\$255.876	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$79.920	Preventivo
1.1.10	Rotura del eje de motor	\$780.829	Analizar vibraciones de operación. Si no está dentro del rango de operación, programar intervención mayor.	\$413.320	Preventivo
1.1.2	Contactador de compresor / ventilador	\$28.078	Reapretar terminales eléctricos.	\$10.656	Preventivo
2.1.2	2.3.3 sin acción de enclavamiento				
1.1.3	Compresor / ventilador quemado	\$910.838	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$26.640	Preventivo
2.1.7					
1.1.4	Lectura de nivel de aceite inapropiada en relación al proceso	\$150.912	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$26.640	Preventivo
1.1.5	Válvula solenoide OM3 quemada	\$32.984	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$10.656	Preventivo
1.1.6	1.1.7 Detención por presostato de alta / baja presión	\$1.026.175	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$62.640	Preventivo
	1.1.8 Detención por termostato de descarga	\$303.366	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$26.640	Preventivo
1.1.9	1.2.6 Desgaste / rotura en las piezas del scroll	\$926.493	Medir variables de operación y analizar calidad de aceite. De haber contaminación, reemplazar aceite.	\$17.320	Preventivo
1.2.1	1.3.1 Lectura errónea de transductor de presión	\$151.470	Medir variables de operación ajustar parámetros de control. Limpiar y reapretar terminales eléctricos.	\$8.880	Preventivo
2.2.1	2.3.2 presión				
1.2.2	1.3.2 Regulación inapropiada de controlador	\$37.262	Ajustar parámetros de control.	\$5.328	Preventivo
	1.2.3 Filtro de succión obstruido	\$190.048	Revisar caída de presión. De estar fuera de rango, reemplazar filtro.	\$26.640	Preventivo
1.2.4	1.3.6 Carga excesiva / insuficiente de refrigerante	\$376.139	Revisar presiones de trabajo. De estar fuera de rango, revisar la causa.	\$10.656	Preventivo
2.1.5	2.2.4 fuga de refrigerante	\$1.865.036	Inspeccionar fugas con diversas técnicas de búsqueda. De existir alguna, reparar lo antes posible.	\$411.100	Preventivo
	2.2.6				
1.2.7	1.3.8 Obstrucción en el acumulador de succión / separador de aceite /	\$687.490	Revisar caída de presión y análisis con pruebas no destructivas. De estar fuera de rango, programar reemplazo.	\$404.440	Preventivo
	2.2.5				
1.3.3	Velocidad de giro excesiva /	\$94.802	Medir variables de operación ajustar parámetros de control.	\$26.640	Preventivo
2.1.3	2.2.2 insuficiente de los ventiladores		Limpiar y reapretar terminales eléctricos.		
	1.3.5 Obstrucción en el serpentín	\$632.840	Lavar intercambiador de calor y peinar aletas.	\$71.280	Preventivo
2.1.4	2.3.7				
	1.3.7 Presencia de humedad o gases no condensables	\$1.038.195	Inspeccionar contaminantes y humedad en el sistema. De existir alguna, programar intervención.	\$8.880	Preventivo
2.1.6	2.3.9				
		<b>\$9.488.833</b>	<b>TOTAL</b>	<b>\$1.648.276</b>	

*Nota:* En esta tabla de elaboración propia se unificaron algunos costos de similar naturaleza para facilitar su interpretación.

**3.1.1.4 PROYECCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM**

Los costos involucrados en el estudio corresponden a tan sólo una unidad condensadora, por lo que para estimar los costos totales a largo plazo del supermercado habría que multiplicar por cuatro unidades totales. Mediante la proyección ilustrada en la Tabla 3.4, podemos apreciar el beneficio económico a la rentabilidad de las empresas asociadas.

**Tabla 3.4***Proyección de riesgo por fallas v/s presupuesto preventivo*

	<i>Costos (CLP/año)</i>		<i>Proyección (CLP)</i>		
	<i>Una unidad</i>	<i>Cuatro unidades</i>	<i>3 años</i>	<i>6 años</i>	<i>9 años</i>
<i>Riesgo por fallas</i>	\$9.488.833	\$37.955.331	\$113.865.994	\$227.731.988	\$341.597.982
<i>Presupuesto preventivo</i>	\$1.648.276	\$6.593.104	\$19.779.312	\$39.558.624	\$59.337.936

*Fuente:* Esta tabla de elaboración propia no se incluyen costos adicionales que puedan surgir en el contexto del sistema completo o en unidades adicionales, costos indirectos, de personal o de repuestos no contemplados en el análisis.

Cabe destacar que debido a la ausencia de un registro histórico de fallas que permita una evaluación precisa, los resultados obtenidos del análisis cuantitativo deben considerarse estimados. Sin embargo, estos valores sirven como una herramienta útil para proporcionar puntos de referencia que faciliten la toma de decisiones informadas. Aunque los resultados no sean completamente definitivos, representan una base más sólida sobre la cual construir estrategias de mantenimiento y gestión de riesgos, lo que resulta más ventajoso que la falta total de información.

### 3.1.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE MODOS DE FALLA

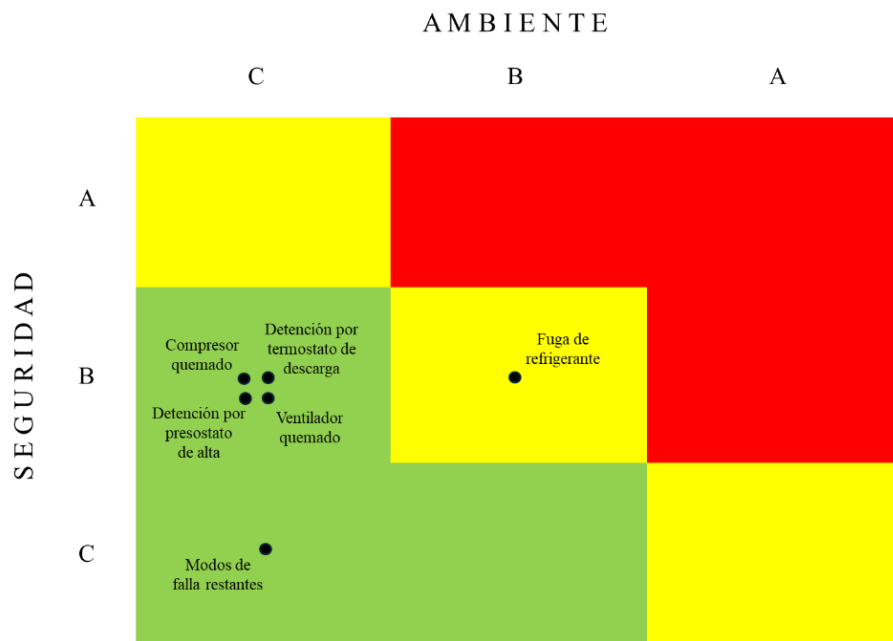
El análisis cualitativo de los resultados del RCM se enfoca en identificar los modos de falla más críticos en términos de impacto a la seguridad humana y medioambiental.

De esta evaluación se pudo concluir que la mayoría de las fallas no representan una amenaza considerable, salvo por la “Fuga de refrigerante” que se posiciona como las más severa. Esto se explica primeramente por la contribución al calentamiento global que genera el R-507 al ser liberado a la atmósfera. En segundo lugar, porque la inhalación de refrigerante tras una fuga en un espacio poco ventilado como una cámara frigorífica o sala de proceso donde concurren empleados del recinto, podría causar mareos, náuseas, confusión o asfixia al desplazar el oxígeno del ambiente. Además, el contacto con el líquido refrigerante podría causar irritaciones o quemaduras por congelación debido a su rápida evaporación.

Asimismo, existen modos de falla que, si bien no generan un impacto ambiental, sí representan un riesgo para la seguridad de los operarios. El primero es la “Detención por presostato de alta presión”, que puede provocar una pérdida de contención y la ruptura de tuberías o componentes. En segundo lugar, la “Detención por termostato de descarga” conlleva el peligro de quemaduras por contacto con superficies sobrecalentadas. Por último, el “Compresor quemado” o “Ventilador quemado” puede generar quemaduras, inhalación de humo o gases tóxicos y, debido al deterioro del aislamiento, exponer al operario a descargas eléctricas.

**Figura 3.2**

*Evaluación cualitativa de modos de fallas de componentes críticos*



*Nota:* Elaboración propia.

### 3.2 COMPARACIÓN CON ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PREVIA

Antes de la implementación de RCM, el mantenimiento del sistema de refrigeración se realizaba bajo un esquema reactivo y preventivo tradicional. A continuación, se presentan las principales diferencias:

### **3.2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO VS MANTENIMIENTO RCM**

El mantenimiento preventivo tradicional sigue un calendario fijo de revisiones y reemplazos, sin considerar el estado real de los equipos. Esto puede generar intervenciones innecesarias y costos adicionales. La Tabla 3.5 realiza una comparación de las actividades preventivas que realiza Sustenta con las actividades propuestas aplicando la metodología RCM. Podemos notar que no se contemplan medidas de análisis vibratorio para anticipar fallas en el compresor. Este tipo de análisis permitiría detectar desalineaciones, roturas de eje, desgaste en rodamientos y holguras mecánicas, previniendo averías que podrían derivar en paradas imprevistas del sistema de refrigeración.

Además, el uso de pruebas no destructivas con cámaras termográficas y detectores de ultrasonido representa una innovación significativa, ya que no solo permiten identificar sobrecalentamientos en el tablero eléctrico de control, sino que también posibilitan la inspección interna de dispositivos herméticos del sistema de refrigeración, facilitando la detección de obstrucciones o deterioro en sus componentes.

En cuanto a la frecuencia de aplicación, esta tampoco se alinea con la establecida previamente en el mantenimiento preventivo tradicional, ya que el análisis RCM se basa en la condición real de los equipos y no en intervalos fijos de tiempo. Esto permite una mayor flexibilidad y optimización de recursos, aplicando inspecciones con una periodicidad ajustada al nivel de criticidad y a la tasa de degradación de cada componente.

**Tabla 3.5**

*Comparación de actividades preventivas vs RCM*

<i>PREVENTIVO</i>		<i>RCM</i>	
<i>Acción a ejecutar</i>	<i>Frecuencia de Aplicación</i>	<i>Acción a ejecutar</i>	<i>Frecuencia de Aplicación</i>
<b>LUBRICACIÓN</b>			
Nivel de aceite	Mensual	Nivel de aceite	Diario
Presión de aceite	Mensual	Presión de aceite	Mensual
Análisis de calidad de aceite	Anual	Análisis de calidad de aceite	Semestral
<b>ANÁLISIS DE VIBRACIONES</b>			
		Medición en carcasa	Semestral
		Medición en tubería	Semestral
		Medición en pernos de base	Semestral
<b>BÚSQUEDA DE FUGAS</b>			
Nivel de refrigerante en depósito de líquido	Mensual	Nivel de refrigerante en depósito de líquido	Mensual
Inspección visual en busca de rastros de aceite	Mensual	Inspección visual en busca de rastros de aceite	Mensual
Solución espumosa en lugares con sospecha de fuga	Mensual	Solución espumosa en lugares con sospecha de fuga	Mensual
		Localizadores de fugas por ultrasonido y cámara termográfica	Anual
<b>LAVADO DE SERPENTÍN</b>			
Eliminar el polvo y la suciedad superficial con un cepillo	Mensual	Eliminar el polvo y la suciedad superficial con un cepillo	Bimestral
Lavado de serpentín	Mensual	Lavado de serpentín	Bimestral
		Enderezamiento de aletas	Bimestral
<b>TABLERO ELÉCTRICO</b>			
Medición de voltage	Mensual	Medición de voltage	Mensual
Medición de consumo eléctrico	Mensual	Medición de consumo eléctrico	Mensual
		Medición de señales de salida	Mensual
Medición de estado de componentes	Mensual	Medición de estado de componentes	Mensual
Inspección visual de puertas y cerraduras	Mensual	Inspección visual de puertas y cerraduras	Mensual
Soplado de gabinete	Mensual	Soplado de gabinete	Mensual
Calibración de elementos de control	Bimestral	Calibración de elementos de control	Mensual
		Ajuste de parámetros de control	Mensual
Reapriete de bornes y terminales eléctricos	Mensual	Reapriete de bornes y terminales eléctricos	Mensual
		Limpieza de contactos	Mensual
		Detección de anomalías con cámara termográfica	Anual
<b>PRESIONES DE TRABAJO</b>			
Medición de presión de succión	Mensual	Medición de presión de succión	Mensual
Medición de presión de descarga	Mensual	Medición de presión de descarga	Mensual
		Medición de presión de líquido	Mensual
<b>OBSTRUCCIÓN DE COMPONENTES</b>			
Caída de presión en filtro de succión	Mensual	Caída de presión en filtro de succión	Bimestral
		Caída de presión en acumulador de succión	Anual
Caída de presión en separador de aceite	Semestral	Caída de presión en separador de aceite	Anual
		Caída de presión en depósito de líquido	Anual
		Análisis con prueba de ultrasonido y termografía	Anual
<b>PRESENCIA DE CONTAMINANTES</b>			
		Revisión material higroscópico de visor de líquido	Trimestral
Análisis de aceite	Anual	Análisis de aceite	Semestral
Revisión de hielo en válvula de expansión	Mensual	Revisión de hielo en válvula de expansión	Trimestral
Revisión de medición en manómetros	Mensual	Revisión de medición en manómetros	Trimestral

*Nota:* Esta tabla de elaboración propia presenta en celdas destacadas las nuevas actividades de mantenimiento.

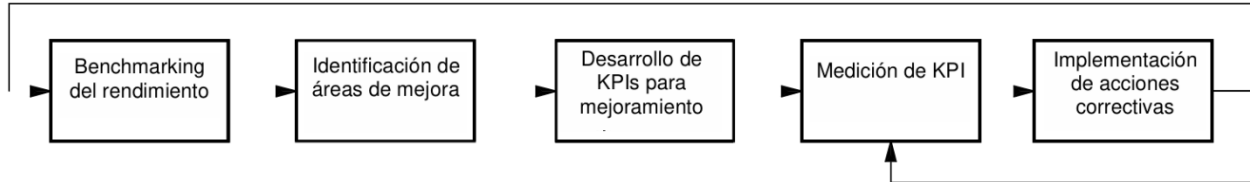
### 3.3 INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN RCM

Dado que no se cuenta con registros históricos para comparar directamente la confiabilidad y disponibilidad, se establecen indicadores estimativos para medir el éxito de la implementación de RCM en el sistema de refrigeración comercial.

Los KPI deben estar alineados a los objetivos de la organización que los utiliza y, por lo tanto, la organización tiene la libertad de definir los KPI de la forma que mejor contribuya al rendimiento mejorado de la organización. Para desarrollar estos indicadores, utilizaremos como referencia la normativa UNE 66175, que establece directrices para la gestión y evaluación de indicadores clave de desempeño.

#### Figura 3.3

*Proceso de desarrollo de KPIs según ISO 14224*



*Fuente: Adaptado de Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, página 238, ISO 14224 (2016).*

#### 3.3.1 INDICADORES DE MANTENIMIENTO

A continuación, se presentan los indicadores de desempeño para el mantenimiento:

## DISPONIBILIDAD OPERACIONAL

Es la capacidad de un equipo de estar operativo en un momento dado, tomando en cuenta tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo.

$$A_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde:

- $A_o$  es la disponibilidad del equipo que estamos evaluando.
- $MTBF$  es el tiempo promedio entre fallas.
- $MTTR$  es el tiempo promedio de reparación o de detención.

Es un indicador clave que permite evaluar la eficacia de estrategias de mantenimiento y optimizar la gestión de activos para minimizar tiempos de inactividad. Se espera que este valor sea lo más alto posible.

## CONFIABILIDAD

Muestra la probabilidad de que un equipo funcione sin fallar en base a un período de tiempo determinado.

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

Donde:

- $R(t)$  es la confiabilidad del equipo que estamos estudiando.
- $e$  es base del logaritmo natural.
- $t$  es el tiempo de operación en el que se realizará el pronóstico.
- $MTBF$  es el tiempo promedio entre fallas.

Es otro indicador clave que ayuda a identificar el rendimiento a largo plazo de los activos y la efectividad de las estrategias de mantenimiento. Un valor alto refleja un sistema bien mantenido y con un bajo riesgo de fallas.

### **ÍNDICE DE MANTENIMIENTO PLANIFICADO**

Mide la proporción de mantenimiento que se realiza de forma planificada en comparación con el mantenimiento correctivo.

$$\%MP = \left( \frac{H_{mp}}{H_{tm}} \right) * 100$$

Donde:

- $\%MP$  es el porcentaje de mantenimiento planificado.
- $H_{mp}$  es el tiempo dedicado a mantenimientos preventivos y programados.
- $H_{tm}$  son las horas totales de mantenimiento preventivo y correctivo.

Tiene el objetivo de mejorar la gestión de activos y reducir fallas inesperadas. Un valor alto indica una buena planificación y uno menor dependencia del mantenimiento correctivo.

### **3.3.2 INDICADORES DE COSTOS DE MANTENIMIENTO**

A continuación, se presentan los indicadores de desempeño para evaluar los costos de mantenimiento:

## **COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO**

Mide el costo total de mantenimiento, incluyendo el preventivo, correctivo, repuestos y materiales.

$$CT_m = CM_p + CM_c + C_r$$

Donde:

- $CT_m$  es el costo total de mantenimiento evaluado en un período de tiempo determinado.
- $CM_p$  es el costo que fue destinado a mantenimiento preventivo.
- $CM_c$  es el costo que fue destinado a mantenimiento correctivo.
- $C_r$  es el costo de repuestos y materiales en cada situación correctiva.

Busca evaluar la eficiencia en la asignación de recursos para el mantenimiento. No incluye los costos asociados al tiempo inactivo o pérdidas de producción. Un valor bajo de este indicador sugiere que el costo total de mantenimiento está optimizado.

## **REDUCCIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

Mide la disminución de costos asociados a reparaciones de emergencia y fallas inesperadas.

$$RC = \left( \frac{CM_{c1} - CM_{c2}}{CM_{c2}} \right) * 100$$

Donde:

- $RC$  es la reducción de costos correctivos.
- $CM_{c1}$  son los costos de mantenimiento en el período de tiempo anterior.
- $CM_{c2}$  son los costos de mantenimiento en el período de tiempo actual.

Este indicador refleja la efectividad de las estrategias de mantenimiento preventivo a medida que avanza el tiempo. Un valor positivo indica una reducción efectiva en los costos de mantenimiento correctivo, en cambio un valor negativo, sugiere que los costos han aumentado.

## **RETORNO DE INVERSIÓN**

Mide el retorno económico obtenido por cada unidad monetaria invertida en el RCM, comparando los costos de implementación con los beneficios obtenidos en reducción de fallas y mejora de la eficiencia operativa.

$$ROI = \left( \frac{A_t}{C_i} \right) * 100$$

Donde:

- *ROI* es el retorno de la inversión.
- *At* son los ahorros totales generados por la reducción de fallas, mantenimientos correctivos, tiempos de inactividad y por el aumento de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.
- *Ci* es la suma de todos los costos de implementación de la metodología RCM, como capacitaciones, evaluación de criticidad, FMECA y adquisición de instrumentos de medición.

Este indicador evalúa el impacto económico y justifica la inversión realizada en la implementación. Un valor alto significa que la implementación ha generado más beneficios que la inversión realizada y un valor bajo que no ha generado los beneficios esperados.

### **3.4 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN**

Para consolidar la implementación de RCM y maximizar sus beneficios, se han identificado los siguientes aspectos clave:

#### **3.4.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA**

La implementación del RCM en el sistema de refrigeración requiere la evaluación de la viabilidad técnica de los procedimientos, herramientas y conocimientos del personal. Se han identificado los siguientes puntos esenciales:

- Se recomienda la capacitación continua del personal en principios de RCM para mejorar la aplicación de la metodología.
- Los técnicos deben recibir instrucciones y formación en el uso de instrumentos de monitoreo como cámaras termográficas, análisis de vibraciones y ultrasonido.
- La adquisición de equipos de diagnóstico avanzados facilitaría la identificación temprana de fallas y el mantenimiento proactivo.
- Se debe garantizar la disponibilidad de piezas de repuesto críticas para minimizar tiempos de inactividad.
- Es fundamental establecer una cultura de mantenimiento basada en datos y la toma de decisiones informadas.

#### **3.4.2 FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

La viabilidad económica del RCM se basa en el análisis costo - beneficio y el impacto financiero a largo plazo. A continuación, se detallan los aspectos clave:

- La inversión inicial en capacitación y herramientas de diagnóstico se justifica con los ahorros en mantenimiento correctivo y consumo energético.

- Al reducir las intervenciones correctivas, se disminuirán los costos de reparación y reemplazo de componentes críticos.
- Se estima que el retorno de inversión de la metodología RCM se alcance en un periodo de 12 a 24 meses, dependiendo del nivel de implementación.
- A medida que se avance en la optimización del mantenimiento, se incrementarán los beneficios financieros y operativos.

### **3.5 ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN**

Para garantizar el éxito del RCM en el sistema de refrigeración del supermercado, se ha diseñado una estrategia de implementación progresiva en tres fases:

#### **FASE 1: IMPLEMENTACIÓN EN LOS COMPONENTES MÁS CRÍTICOS**

Primeramente, se llevará a cabo la ejecución con los componentes más prioritarios del sistema: compresor y condensador, debido a su impacto en el rendimiento del sistema y los costos asociados. En paralelo a esto, se adquirirá el equipamiento necesario para la medición y diagnóstico de estos componentes. También se tomará registro del desempeño antes de la implementación para cuantificar mejoras futuras mediante los indicadores de desempeño (KPIs) propuestos.

#### **FASE 2: EXPANSIÓN PROGRESIVA A OTROS EQUIPOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

Una vez optimizados los componentes críticos, se extenderá la metodología RCM a evaporadores, válvulas de expansión y otros elementos clave. A medida que la implementación

avanza, se ajustarán los procedimientos de mantenimiento en función de los datos obtenidos en la fase inicial, se realizarán compras progresivas de nuevas herramientas e instrumentos y se capacitará al personal técnico sobre las nuevas adquisiciones y la aplicación del RCM a los equipos nuevos.

### **FASE 3: EVALUACIÓN CONTINUA Y AJUSTE DEL PLAN DE MANTENIMIENTO**

Se realizará un monitoreo constante del desempeño del sistema y la efectividad del RCM. Basados en los resultados obtenidos, se aplicarán ajustes periódicos a la estrategia de mantenimiento. También se establecerá un programa de revisión, evaluación y actualización de la efectividad de los KPIs. Por último, se considerará la necesidad de nuevas herramientas de diagnóstico avanzadas para fortalecer el mantenimiento predictivo.

#### **3.6 RECOMENDACIONES**

A continuación, se recomiendan las siguientes actividades:

- Establecer un cronograma detallado para la ejecución de cada fase de implementación, asignando responsables y recursos para cada actividad dentro del plan de trabajo.
- Estructurar un sistema de captura, monitoreo y análisis de las principales variables de condición (análisis de presión, temperatura, amperaje, vibraciones, calidad de aceite), desde el inicio de la implementación, para recopilar datos confiables y desarrollar registros que permitan evaluar tendencias.
- Evaluar el mantenimiento preventivo previo, asegurando una transición ordenada, con el propósito de mantener prácticas útiles y eliminar procedimientos ineficientes.
- Priorizar la aplicación del RCM en los equipos más críticos: compresor y condensador, para luego desplegar la metodología de manera progresiva, ampliándola a evaporadores, dispositivos de expansión, válvulas, depósitos y otros elementos importantes.

- Fomentar una cultura de mantenimiento proactivo dentro del equipo de trabajo, capacitando a los técnicos en metodología RCM y uso de instrumentos de medición.
- Estudiar la posibilidad de contar con un técnico de planta encargado del monitoreo y mantenimiento del sistema.
- Incorporar herramientas digitales como cámara termográfica y analizadores de ultrasonido y vibraciones para la toma de variables de operación y facilitar en análisis futuro.
- Definir indicadores clave de desempeño (KPIs) para medir la efectividad del RCM, fabricando un cuadro de mando y evaluando periódicamente los datos recopilados para ajustar la estrategia de mantenimiento.
- Estudiar la posibilidad de implementar un software de monitoreo en tiempo real para supervisar el estado actual del sistema de refrigeración.
- Garantizar la disponibilidad de repuestos clave para minimizar tiempos de inactividad.
- Establecer reuniones cada 4 meses (cuatrimestrales) para evaluar el progreso de la implementación RCM. En estas reuniones, es importante que participen el personal relacionado con el mantenimiento del sistema de refrigeración, como supervisores, ingenieros y directivos.

## CONCLUSIÓN

La aplicación de la metodología RCM en el sistema de refrigeración del supermercado Santa Isabel Quilín ha demostrado ser eficaz para optimizar la gestión del mantenimiento. La aplicación de RCM ha permitido identificar y abordar sistemáticamente los modos de falla potenciales en los componentes críticos, como el compresor y el condensador, así como formular estrategias para minimizar riesgos. Esto reduce significativamente la probabilidad de fallas inesperadas, los costos asociados y el impacto ambiental, además de maximizar la disponibilidad del sistema.

El análisis cuantitativo reveló que la aplicación de RCM podría generar diferencias económicas significativas a favor de la organización. A corto plazo (tres años), se podrían evitar costos de hasta \$94.086.682 CLP, mientras que a largo plazo (nueve años), la diferencia podría alcanzar los \$282.260.046 CLP. Estos valores reflejan el impacto positivo de una gestión de mantenimiento basada en confiabilidad.

A diferencia de otros estudios en el rubro, este trabajo no solo aplica RCM, sino que también incorpora un análisis económico detallado. Esto permite evaluar no solo la criticidad de las fallas, sino también su impacto financiero, facilitando una toma de decisiones más efectiva y rentable. Además, se destaca la aplicación de estrategias preventivas específicas dentro del contexto operativo de un supermercado, lo que refuerza su aplicabilidad en escenarios reales y proporciona una referencia útil para futuras implementaciones en el sector.

Además de los beneficios económicos y operativos, RCM fortalece la cultura organizacional al involucrar activamente a los distintos equipos de trabajo en la mejora continua del mantenimiento.

Finalmente, el éxito de RCM no se limita a su implementación inicial, sino que requiere un compromiso continuo por parte de la organización. La metodología no traerá consigo resultados inmediatos, sino que debe ser visualizada como un proceso de mejora a largo plazo y con visión de futuro, donde la capacitación del personal, el monitoreo constante de los indicadores de rendimiento y la adaptación a las necesidades operativas serán claves para garantizar su efectividad y sostenibilidad en el tiempo.

## REFERENCIAS

- CENCOSUD. (2023). *Reporte de Resultados 2022*. CENCOSUD.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (Séptima edición ed.). (S. S. Virgilio González y Pozo, Trad.) México, D.F., México: Mc Graw Hill.
- Crespo, A., & Parra, C. (2008). *Aplicación piloto de la metodología Mantenimiento Centrado en Fiabilidad / MCF (Reliability Centered Maintenance / RCM) en el Sistema de Generación Eléctrica: Motor Isotta VI312 ME 1800*. Sevilla: INGEMAN.
- Danfoss. (2013). *Display EKA 163 / EKA 164*.
- Danfoss. (2020). *Guía del Usuario: Control de Evaporadores AK-C55*.
- Danfoss. (2023). *Válvula de Expansión Electrónica tipo AKV 10P y AKV 10PS*.
- Dossat, R. J. (1991). *Principios de Refrigeración*. CECSA.
- Emerson, & Copeland. (2009). *ZX Scroll Compressor - Product Manual*.
- Emerson, & Copeland. (2019). *Unidades Condensadoras ZX 12/16/20 HP*.
- Emerson, & Copeland. (2022). *Large ZX Condensing Unit - User Manual*.
- Gasservel. (2018). *Ficha Técnica R-507*.
- Intercal. (2019). *Línea de Evaporadores Retail*.
- ISO. (2016). *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)*. Norma.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile, ONUDI, & Multilateral Fund. (2020). *Manual Buenas Prácticas en Sistemas de Refrigeración y Climatización* (Vol. Proyecto Fase II “Plan de Gestión Para la Eliminación de los HCFC” (HPMP)). (L. A. Germán P. Fuentes Durán, Ed.) Chile.
- Parra, C., & Crespo, A. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos - Desarrollo y aplicación práctica de una Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM)* (Segunda Edición ed.). (INGEMAN, Ed.) Sevilla, España.

Proquiel Químicos. (s.f.). *Hoja de Seguridad R-507*.

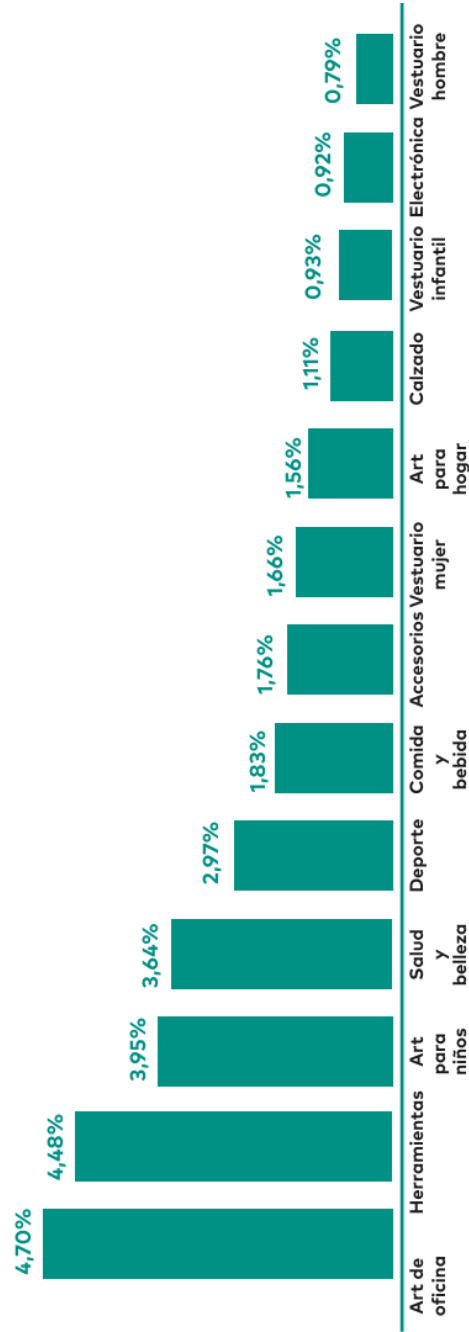
SAE. (2002). *SAE JA1012 - Una guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

UNE. (2003). *UNE 66175: Guía para la implantación de sistemas de indicadores*.

Universidad Adolfo Ibáñez, ALTO, & CCS. (2023). *Estudio de Mermas en el Retail 2023*. Cámara de Comercio de Santiago (CCS), Escuela de Negocios, Santiago de Chile.

## ANEXOS

### Anexo 1: Gráfico Porcentaje de Pérdida para Supermercados año 2022



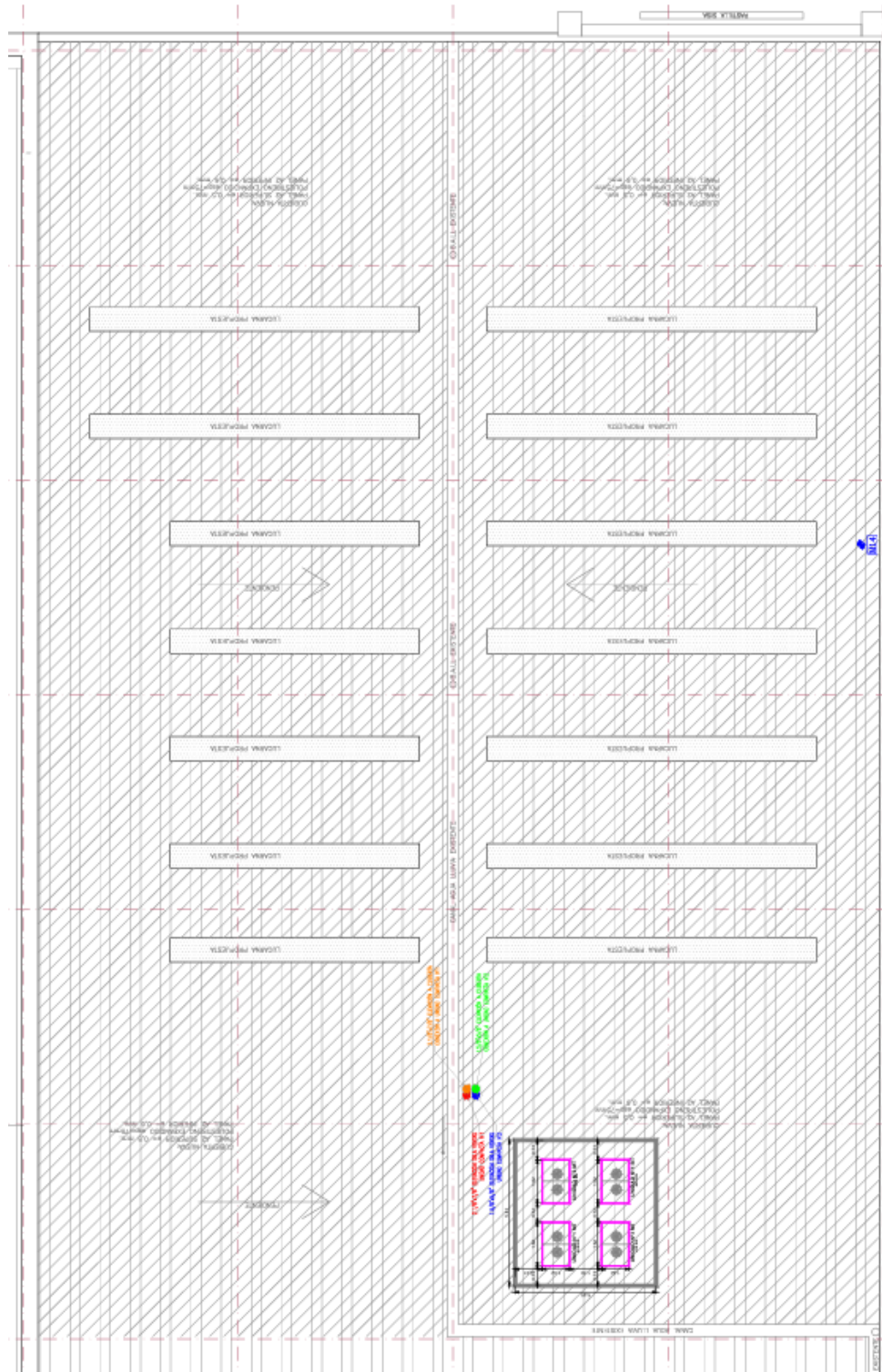
**Gráfico 16b**  
Porcentaje de pérdida por categoría año 2022 para Supermercados

Fuente: V Estudio de Mermas

Fuente: Tomado de *Estudio de Mermas en el Retail*, página 40, Universidad Adolfo Ibáñez, ALTO & CCS (2023).

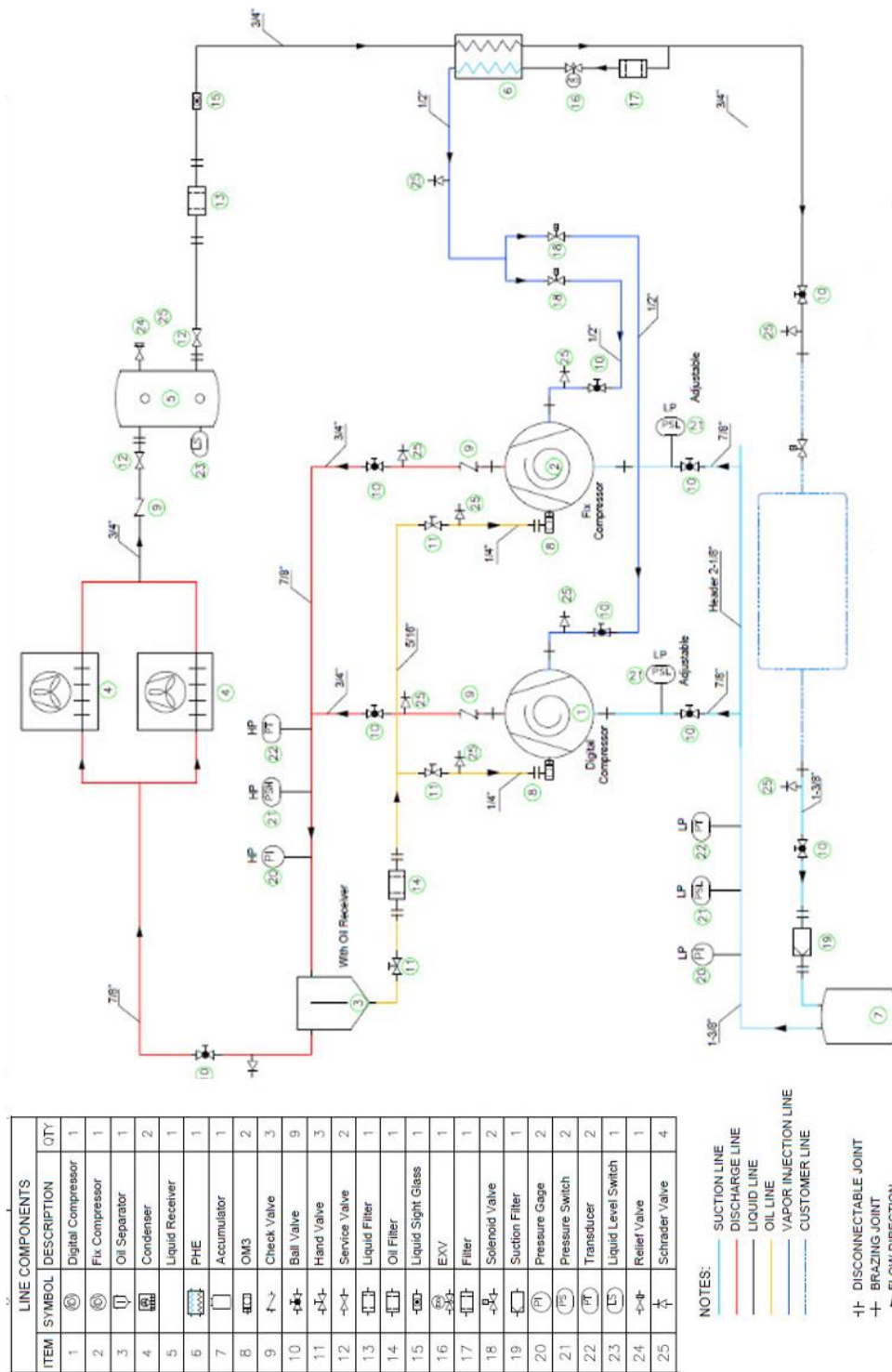


### Anexo 3: Layout Frío Alimentario – Planta Cubierta – Unidades Condensadoras



Fuente: Documento interno de Sustenta (2022).

## Anexo 4: Diagrama de Flujo Unidad Condensadora Emerson Copeland ZXD120BE



Fuente: Tomada de Unidades Condensadoras ZX 12/16/20 HP, página 35, Emerson Copeland (2019).

## Anexo 5: Desarrollo de FMECA de Compresor

Item	# Función Requerida	# Falla Funcional	# Modo de Falla	Efecto de Falla	Frecuencia (falla/año)	MTR (h)	Valor III (CLP)	Valor Repuesto (CLP)	Pérdida de Producción (CLP/año)	Seguridad Humana	Ambiental	Riesgo Cuantitativo (CLP/año)	Riesgo Cualitativo			
Compresor Scroll Emerson Copeland ZN45KCE-ITD-558	1 Succionar el vapor de refrigerante y comprimirlo hasta su presión de condensación (290-350 PSIG)	1.1 FFP: No comprime	1.1.1 Ausencia de señal de control de compresor	Evidente: SI Afecta SFA: No Acción correctiva: Revisión de la causa	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	C	C	\$127.938	CC			
			1.1.2 Conexión de compresor sin acción de enclavamiento	Acción correctiva: Reemplazo de conmutador	0,1	0,8	\$4.440	\$68.430	\$85.508	C	C	C	\$14.039	CC		
			1.1.3 Compresor quemado	Síntoma: Olor a quemado, humo Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.208.413	B	C	C	C	\$780.829	BC	
			1.1.4 Lectura de nivel de aceite inapropiada en relación al proceso real	Síntoma: Nivel de aceite insuficiente Acción correctiva: Reemplazo OM3	0,15	2,4	\$4.440	\$344.000	\$271.426	C	C	C	C	\$150.912	CC	
			1.1.5 Válvula solenoides OM3 quemada	Síntoma: Nivel de aceite insuficiente, alarma OM3 Acción correctiva: Reemplazo de válvula solenoides OM3	0,12	1,2	\$4.440	\$113.450	\$130.074	C	C	C	C	\$32.984	CC	
			1.1.6 Detección por presostato de baja presión	Señal: Alarma presostato de baja presión Acción correctiva: Revisión de la causa	0,3	2,5	\$4.440	\$0	\$28.745	C	C	C	C	\$216.139	CC	
			1.1.7 Detección por presostato de alta presión	Evidente: SI Afecta SFA: SI Señal: Alarma presostato de alta presión Acción correctiva: Revisión de la causa	3,2	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	B	C	C	C	\$810.036	BC	
			1.1.8 Detección por termostato de descarga	Señal: Alarma de termostato de descarga Acción correctiva: Revisión de la causa	1,6	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	B	C	C	C	\$303.366	BC	
			1.1.9 Rotura en las piezas del scroll	Evidente: No Afecta SFA: No Vibraciones anómalas Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.208.413	C	C	C	C	C	\$780.829	CC
			1.1.10 Rotura del eje de motor	Vibraciones anómalas Acción correctiva: Reemplazo de compresor, vacío, restauración del sistema	0,065	8,5	\$4.440	\$1.746.000	\$1.208.413	C	C	C	C	C	\$780.829	CC
			1.2 FFP: Presión de descarga bajo del rango (280-350 psig)	1.2.1 FFP: Presión de descarga bajo del rango (280-350 psig)	1.2.1 Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: SI Afecta SFA: No Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$82.770	\$152.324	C	C	C	\$151.470	CC
1.2.2 Regulación inapropiada de controlador	Acción correctiva: Modificación de parámetros de control	1,3			0,5	\$4.440	\$0	\$52.886	C	C	C	C	\$37.262	CC		
1.2.3 Filtro de succión obstruido	Síntoma: Presión excesiva en entrada del filtro e insuficiente en la succión Acción correctiva: Reemplazo del filtro, vacío, restauración del sistema	0,2			2,8	\$4.440	\$38.400	\$39.217	C	C	C	C	\$190.048	CC		
1.2.4 Carga insuficiente de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo insuficientes Acción correctiva: Carga de refrigerante al sistema	0,25			2,5	\$4.440	\$640.000	\$283.745	C	C	C	C	\$340.116	CC		
1.2.5 Fuga de refrigerante	Evidente: SI Afecta SFA: SI Síntoma: Olor a refrigerante, manchas de aceite Acción correctiva: Búsqueda de fuga, corrección, restauración del sistema	0,3			6,5	\$4.440	\$640.000	\$853.527	B	B	C	C	\$1.865.036	BB		
1.2.6 Desgaste en las piezas del scroll	Evidente: No Afecta SFA: No Síntoma: Ruido, vibraciones anómalas Acción correctiva: Optimizar las condiciones de operación	0,1			3,5	\$4.440	\$0	\$411.742	C	C	C	C	\$145.664	CC		
1.2.7 Obstrucción en el acumulador de succión	Síntoma: Presión excesiva en entrada del acumulador e insuficiente en la succión Acción correctiva: Reemplazo de acumulador de succión	0,05			5,7	\$4.440	\$328.800	\$726.599	C	C	C	C	\$224.786	CC		
1.3 FFP: Presión de descarga sobre el rango (350-380 psig)	1.3.1 FFP: Presión de descarga sobre el rango (350-380 psig)	1.3.1 Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: SI Afecta SFA: No Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$5.570	\$152.324	C	C	C	\$12.870	CC			
		1.3.2 Regulación inapropiada de controlador	Acción correctiva: Modificación de parámetros	1,3	0,5	\$4.440	\$0	\$52.886	C	C	C	C	\$37.262	CC		
		1.3.3 Velocidad de giro excesiva de ventilador	Acción correctiva: Revisión de la causa	0,25	1,3	\$4.440	\$0	\$141.409	C	C	C	C	\$47.401	CC		
		1.3.4 Exceso de carga térmica	Evento externo a la unidad condensadora Acción correctiva: Acondicionar serpentín	0	0	\$0	\$0	\$0	-	-	-	-	\$0	-		
		1.3.5 Obstrucción en el serpentín del condensador	Acción correctiva: Acondicionar serpentín	2,5	1,5	\$4.440	\$0	\$164.317	C	C	C	C	\$632.840	CC		
		1.3.6 Carga excesiva de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Reemplazo de refrigerante del sistema	0,05	2,5	\$4.440	\$0	\$283.745	C	C	C	C	\$360.023	CC		
		1.3.7 Presencia de burbujas o gases no condensables	Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga	0,1	8,5	\$4.440	\$115.200	\$1.208.413	C	C	C	C	\$1.038.195	CC		
		1.3.8 Obstrucción en el separador de aceite	Síntoma: Presión excesiva en entrada del separador e insuficiente en la entrada al condensador Acción correctiva: Reemplazo de separador de aceite	0,05	5,7	\$4.440	\$399.000	\$726.599	C	C	C	C	\$228.296	CC		

## Anexo 6: Desarrollo de propuesta RCM de Compresor

Item	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	Número de Personas	H/H operación	Tarifa Especialidad	Insumos, Materiales o Servicios	Presupuesto Anual	Tipo Anual vs Riesgo (CL/Frío)	
Compresor Scroll Emerson Copeland ZX55KCE-FTD-558	1.1	FT: No comprime	1.1.1	Ausencia de señal de control de compresor	1	Combinación de tareas	Revisar el suministro eléctrico, señales en los bornes de salida. Ajustar parámetros de control. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	1.5	\$4,440	\$0	\$79,920	Preventivo	
			1.1.2	Contacto de compresor sin acción de enclavamiento	1	Reacondicionamiento cíclico	Reparar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$10,656	Preventivo
			1.1.3	Compresor quemado	1	Combinación de tareas	Revisar suministro eléctrico y consumo en cada línea de energía. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo
			1.1.4	Lectura de nivel de aceite inapropiada en relación al proceso real	1	Combinación de tareas	Revisar volaje y señales de salida de sensor de nivel de aceite. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo
			1.1.5	Válvula solenoides OM3 quemada	1	Combinación de tareas	Revisar volaje de alimentación. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$10,656	Preventivo
			1.1.6	Detección por presostato de baja presión	1	Combinación de tareas	Revisar suministro de energía. Limpiar contactos y reemplazar terminales eléctricos en presostato de baja	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$3,000	\$62,640	Preventivo
			1.1.7	Detección por presostato de alta presión	1	Combinación de tareas	Revisar suministro de energía. Limpiar contactos y reemplazar terminales eléctricos en presostato de alta	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$3,000	\$62,640	Preventivo
			1.1.8	Detección por termostato de descarga	1	Combinación de tareas	Revisar volaje y señales de salida de sensor de temperatura. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo
			1.1.9	Rotura en las piezas del scroll	1	Tarea a condición	Analizar calidad de aceite. Si no cumple las condiciones, reemplazar	Semestral	2	1	1.5	1.5	\$4,440	\$2,000	\$17,320	Preventivo
			1.1.10	Rotura del eje de motor	1	Tarea a condición	Analizar vibraciones de operación. Si no está dentro de rango de operación, alinear y balancear	Semestral	2	1	1.5	1.5	\$4,440	\$200,000	\$413,320	Preventivo
1.2	FP: Presión de descarga bajo del rango (<290 psig)	1.2.1	Lectura errónea de transductor de presión	1	Combinación de tareas	Revisar volaje y señales de salida. Reemplazar terminales eléctricos	Trimestral	4	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo	
		1.2.2	Regulación inapropiada de controlador	1	Reacondicionamiento cíclico	Ajustar parámetros de control	Bimestral	6	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$5,328	Preventivo	
		1.2.3	Filtro de succión obstruido	1	Tarea a condición	Revisar caída de presión. Si esta diferencia supera los 10 psi, reemplazar el filtro	Bimestral	6	1	1	1	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo	
		1.2.4	Carga insuficiente de refrigerante	1	Tarea a condición	Revisar presiones de trabajo	Mensual	12	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$10,656	Preventivo	
		1.2.5	Fuga de refrigerante	1	Tarea a condición	Inspeccionar fugas con técnicas de ultrasonido y termografía infrarroja	Annual	1	1	2.5	2.5	\$4,440	\$400,000	\$411,100	Preventivo	
		1.2.6	Desgaste en las piezas del scroll	1	Tarea a condición	Analizar calidad de aceite. Si no cumple las condiciones, reemplazar	Semestral	2	1	1.5	1.5	\$4,440	\$2,000	\$17,320	Preventivo	
		1.2.7	Obstrucción en el acumulador de succión	1	Tarea a condición	Revisar temperaturas y presiones de entrada y salida. Analizar con ultrasonido y termografía	Annual	1	1	1	1	\$4,440	\$400,000	\$404,440	Correctivo	
		1.3	FP: Presión de descarga sobre el rango (>350 psig)	1	Combinación de tareas	Revisar volaje y señales de salida. Reemplazar terminales eléctricos	Trimestral	4	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo	
1.3	FP: Presión de descarga sobre el rango (>350 psig)	1.3.1	Lectura errónea de transductor de presión	1	Reacondicionamiento cíclico	Ajustar parámetros de control	Bimestral	6	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$5,328	Preventivo	
		1.3.2	Regulación inapropiada de controlador	1	Combinación de tareas	Revisar parámetros de control y señales de salida de variador de frecuencia. Reemplazar terminales eléctricos	Mensual	12	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo	
		1.3.3	Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	\$0	-	-
		1.3.4	Exceso de carga térmica	1	Reacondicionamiento cíclico	Lavar y remover obstrucciones. Peinar aletas	Bimestral	6	1	2	2	\$4,440	\$3,000	\$71,280	Preventivo	
		1.3.5	Obstrucción en el serpentín del condensador	1	Tarea a condición	Revisar presiones de trabajo	Mensual	12	1	0.2	0.2	\$4,440	\$0	\$10,656	Preventivo	
		1.3.6	Carga excesiva de refrigerante	1	Tarea a condición	Revisar visores de líquido. Si indican presencia de humedad, reemplazo de filtros y purga del sistema	Trimestral	4	1	0.5	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo	
		1.3.7	Presencia de humedad o gases no condensables	1	Tarea a condición	Revisar temperaturas y presiones de entrada y salida. Analizar con ultrasonido y termografía	Annual	1	1	1	1	\$4,440	\$400,000	\$404,440	Correctivo	
		1.3.8	Obstrucción en el separador de aceite	1	Tarea a condición	-	-	-	-	-	-	-	-	-	\$0	-

## Anexo 7: Desarrollo de FMECA de Condensador

Item	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto de Falla	Frecuencia (falla/año)	MTR (h)	Valor HI (CLP)	Valor Riesgo (CLP)	Pérdida de productos (CLP/año)	Seguridad Humana	Riesgo Ambiental	Riesgo Cuantitativo (CLP/año)	Riesgo Cualitativo	Gráfico																				
Condensador de tubo abalado	2	Cooler calor para condensar el vapor de refrigerante comprimido (290 L30 PSig)	2.1	FT: No produce condensación	#	2.1.1 Ausencia de señal de control de ventilador	Evidente: SI Acción correctiva: Revisión de la causa	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	C	C	-	\$127.938	CC	1																			
																			2.1.2 Conector de ventilador sin acople	Acción correctiva: Reemplazo de conector																	
																			2.1.3 Velocidad de giro insuficiente de ventiladores	Acción correctiva: Revisión de la causa																	
																			2.1.4 Obstrucción en el serpentín	Síntoma: Temperatura excesiva en el condensador Acción correctiva: Acondicionar serpentín																	
																			2.1.5 Carga excesiva de refrigerante	Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Recuperación de refrigerante del sistema																	
																			2.1.6 Presencia de humedad o gases no condensables	Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga																	
																			2.1.7 Ventilador quemado	Evidente: SI Acción correctiva: Reemplazo de ventilador																	
																			2.2	FP: Presión de condensación bajo el rango (<250 psig)	#	2.2.1 Lectura errónea de transductor de presión	Evidente: SI Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión	0,5	1,4	\$4.440	\$2.740	\$152.824	C	C	-	C	-	\$111.455	CC	1	
																			2.2.2 Velocidad de giro excesiva de ventiladores																		Acción correctiva: Revisión de la causa
																			2.2.3 Compresión insuficiente																		Ver 1.2
																			2.2.4 Carga insuficiente de refrigerante																		Síntoma: Presiones de trabajo insuficientes Acción correctiva: Carga de refrigerante al sistema
2.2.5 Obstrucción en el separador de aceite	Síntoma: Presión excesiva en la entrada del separador Acción correctiva: Reemplazo de separador de aceite																																				
2.2.6 Fuga de refrigerante	Evidente: SI Acción correctiva: Búsqueda de fuga, corrección, restauración del sistema																																				
2.3	FP: Presión de condensación sobre el rango (>330 psig)	#	2.3.1 Ausencia de señal de control de ventilador	Evidente: SI Acción correctiva: Revisión de la causa	0,5	1,5	\$4.440	\$2.740	\$164.317	C	C	-	C	-	\$127.938	CC	1																				
2.3.2 Lectura errónea de transductor de presión																		Acción correctiva: Reemplazo de transductor de presión																			
2.3.3 Conector de ventilador sin acople																		Acción correctiva: Reemplazo de conector																			
2.3.4 Velocidad de giro insuficiente de ventiladores																		Acción correctiva: Revisión de la causa																			
2.3.5 Exceso de carga térmica																		Evento externo a la unidad condensadora																			
2.3.6 Compresión excesiva																		Ver 1.2																			
2.3.7 Obstrucción en el serpentín																		Síntoma: Temperatura excesiva en el condensador Acción correctiva: Acondicionar serpentín																			
2.3.8 Carga excesiva de refrigerante																		Síntoma: Presiones de trabajo excesivas Acción correctiva: Recuperación de refrigerante del sistema																			
2.3.9 Presencia de humedad o gases no condensables																		Síntoma: Mediciones irregulares de manómetros, cambio de color de material higroscópico visor de líquido Acción correctiva: Cambio de filtros, purga																			
3.0																		Obstrucción en el depósito de líquido	#	3.1.0 Obstrucción en el depósito de líquido	Evidente: SI Acción correctiva: Reemplazo de depósito de líquido	0,05	5,7	\$4.440	\$425.025	\$726.599	C	C	-	C	-	\$229.597	CC	1			
3.1.1 Ventilador quemado																																			Evidente: SI Acción correctiva: Reemplazo de ventilador		

## Anexo 8: Desarrollo de propuesta RCM de Condensador

Ítem	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	Frecuencia Anual	Número de Personas	III operación	Tarifa Especialidad	Insumos, Materiales o Servicios	Presupuesto Anual	Ppto. Anual vs Presupuesto Anual (C/LPando)							
Condensador de tubo alado	2.1	Ceder calor al tubo alado para condensar el vapor de refrigerante comprimido (290 ±30 PSIG)	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	12	1	1.5	\$4,440	\$0	\$79,920	Preventivo							
										12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo							
										12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo							
										6	1	2	\$4,440	\$3,000	\$71,280	Preventivo							
										12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo							
										4	1	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo							
										12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo							
	2.2	FPF: Presión de condensación bajo el rango (<250 psig)	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	#	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	Frecuencia Anual	4	1	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo							
										12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo							
										-	-	-	-	-	\$0	-							
										12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo							
2.3	FPF: Presión de condensación sobre el rango (>330 psig)	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	#	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	Frecuencia Anual	1	1	1	\$4,440	\$400,000	\$404,440	Correctivo								
									1	1	2.5	\$4,440	\$400,000	\$411,000	Preventivo								
									12	1	1.5	\$4,440	\$0	\$79,920	Preventivo								
									4	1	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo								
									12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo								
									12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo								
									-	-	-	-	-	\$0	-								
Condensador de tubo alado	#	Función Requerida	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Actividad de Mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de Aplicación	Frecuencia Anual	Número de Personas	III operación	Tarifa Especialidad	Insumos, Materiales o Servicios	Presupuesto Anual	Ppto. Anual vs Presupuesto Anual (C/LPando)							
																	6	1	2	\$4,440	\$3,000	\$71,280	Preventivo
																	12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo
																	4	1	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo
																	1	1	1	\$4,440	\$400,000	\$404,440	Correctivo
																	12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo
																	-	-	-	-	-	\$0	-
																	-	-	-	-	-	\$0	-
																	6	1	2	\$4,440	\$3,000	\$71,280	Preventivo
																	12	1	0.2	\$4,440	\$0	\$10,666	Preventivo
																	4	1	0.5	\$4,440	\$0	\$8,880	Preventivo
1	1	1	\$4,440	\$400,000	\$404,440	Correctivo																	
12	1	0.5	\$4,440	\$0	\$26,640	Preventivo																	

## Anexo 9: Actividades de mantenimiento en centrales frigoríficas – Sustenta

CENTRAL ALTA / MEDIA Y BAJA TEMPERATURA		Ejecución por Año Calendario
1	Revisión y registro presiones central AT/MT/BT (Succión, descarga por Compresor)	12
2	Revisión y registro Temperatura succión y Descarga por Compresor + temperatura carter	12
3	Tablero Eléctrico y borneras (Ajuste Contactos, Limpieza, Verificación contactos)	12
4	Verificación de niveles refrigerante y aceite (Registro Histórico, incluir Búsqueda Fugas)	12
5	Control Filtros línea Líquido (Caída de Presión)	12
6	Control Filtros de Succión (Caída Presión)	12
7	Verificación y Registro Temperatura Carter por compresor	12
8	Verificación y registro de consumos eléctricos por Compresor	12
9	Verificación y Registro Presión y Diferencial Presión Bomba Aceite por Compresor	12
10	Limpieza del cuadro eléctrico de las centrales (con aire seco)	12
11	Limpieza de central y compresores	12
12	Control Vibraciones (Anti Vibratorios, Soportes y sujeciones, Capilares, Tuercas)	12
13	Control de elementos de seguridad, presostatos, aceites y resistencias de carter.	12
14	Revisión y limpieza bornes caja de conexión compresores	12
15	Revisión de protecciones eléctricas y electrónicas	12
16	Control reglaje relés térmicos, disyuntores, Guarda motores del Cuadro eléctrico.	12
17	Verificación y control de Temperatura de Sobrecalentamiento	12
18	Determinación Temperatura Sub-Enfriamiento Total	12
19	Relación de Presión de los Compresores	12
20	Revisión y Registro de Presión Etapa Intermedio	12
21	Nivel de Aceite en Compresores y Reservorio	12
22	Reapriete de contactos en elementos eléctrico del Tablero de Fuerza y Control	12
23	Determinación y registro de temperatura Ambiente/ evaporación y Condensación	12
24	Revisar y Registrar consumo eléctrico por compresor en tablero eléctrico.	12
25	Revisar y Registrar tiempo de Relay de Conmutación (Partida Descargada)	12
26	Revisión y chequeo enlace informático con la central (Si Corresponde)	6
27	Comprobar rendimientos compresores	6
28	Calibración de Presostatos (Alta, Baja, Diferenciales de Aceite)	6
29	Revisión y limpieza de separadores de aceite	2
30	Control de Acidez Aceite (Kits de Acidez) Proporcionado por Cliente	1
31	Cambio Aceite (Mano de obra y Repuestos)	1
32	Cambio Filtros Succión y Líquido	1
33	Medición Bobinas del Compresor (Megger)	1

Fuente: Documento interno de Sustenta (2020).

## Anexo 10: Actividades de mantenimiento en condensadores – Sustenta



<b>Condensador / Gas Cooler</b>		Ejecución por Año Calendario
1	Revisión de tableros eléctricos y comandos electrónicos	12
2	Registro consumos eléctricos ventiladores	12
3	Revisión Contactores y protecciones eléctricas	12
4	Inspección válvulas y llaves del sistema	12
5	Inspección ocular parte mecánicas, estructurales	12
6	Revisión de tuberías, detección y control de filtraciones	12
7	Limpieza con presión de agua a condensadores	12
8	Control anclajes y Fijaciones, realizar reaprietes	12
9	Temperatura a la entrada del Condensador	12
10	Temperatura a la salida del Condensador	12
11	Tratamiento fenólico (Locales ubicados en ambientes Salinos)	1
12	Pintar Estructura soporte Condensadores	1

*Fuente:* Documento interno de Sustenta (2020).