

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE SAN JOAQUIN – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL
SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE LA EMBAJADA DE ESTADOS UNIDOS EN
CHILE MEDIANTE ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y FMECA**

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

Alumno:

Sr. Germán Ignacio Sánchez Araya.

Profesor Guía:

Mg. Ing. Pablo Duque Ramírez.



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 de un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de climatización de la Embajada de Estados Unidos en Chile mediante análisis de criticidad y FMECA**

Nombre del candidato(a): **Germán Ignacio Sánchez Araya**

Carrera / Grado: **Ingeniería en Mantenimiento Industrial**

Campus: **San Joaquín** Departamento: **Mecánica**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Andrés Duque Ramírez, 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 (marcar una opción)

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 (**marcar una opción**):

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: 01-06-2026

Firma: _____



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/06/2026

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

KEYWORDS: MANTENIMIENTO PREVENTIVO, CHILLER, FAN COIL, UMA, FMECA.

El presente trabajo de título se desarrolló en el departamento de Facilities de la Embajada de Estados Unidos en Chile y tuvo como objetivo principal la elaboración de una propuesta de plan de mantenimiento preventivo para el sistema de climatización. Este sistema fue instalado originalmente a comienzos de la década de 1990 y constituye un activo crítico para las operaciones del edificio.

Durante los últimos 12 meses analizados, se registraron un total de 34 fallas, distribuidas entre chillers (6 fallas), unidades manejadoras de aire (8 fallas) y fan coils (20 fallas). Representando aproximadamente el 59% del total de fallas, los fan coils fueron identificados como el equipo más crítico del sistema, además de presentar los mayores tiempos acumulados de reparación y costos asociados.

Para abordar esta problemática, se realizó un diagnóstico inicial al sistema de climatización, basado en el levantamiento de un historial de fallas y en la aplicación de criterios descritos en la norma ISO 14224 para la clasificación y análisis de eventos. A partir de esta información, se desarrolló un análisis de criticidad basado en riesgo, junto con la realización de un gráfico de dispersión jackknife, herramientas que permitieron identificar el equipo crítico del sistema.

Una vez determinado el equipo crítico, se aplicó un Análisis del Modo, Efecto y Criticidad de la Falla (FMECA) a los fan coils, esto con el fin de determinar y priorizar los modos de falla más relevantes. Este análisis evidenció que los filtros de aire saturados, rodamientos gripados, controladores sin energía y motores quemados correspondían a los modos de falla más críticos, debido a la alta frecuencia y tiempos de reparación elevados, los cuales reflejaban una consecuencia negativa en el rendimiento del equipo. En conjunto, estos modos de falla representaron aproximadamente el 55% de las fallas registradas en los fan coils.

Con base en los resultados obtenidos, se diseñó una propuesta actualizada de plan de mantenimiento preventivo direccionado a reducir la frecuencia de los modos de falla críticos y optimizar el uso de recursos. La propuesta integró actividades preventivas, predictivas y acciones de mejora, definiendo frecuencias de intervención acordes a las condiciones reales de operación del edificio. A partir del análisis, se estimó que la implementación del plan podría reducir la frecuencia de fallas en aproximadamente un 40%, considerando que las tareas propuestas actúan directamente sobre los modos de falla de mayor ocurrencia identificados en el FMECA.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 4	
DIAGNÓSTICO INICIAL AL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE EQUIPO CRÍTICO	4
1.1 MARCO TEÓRICO	5
1.1.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO	5
1.1.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD	6
1.1.3 ANÁLISIS FMECA	6
1.1.4 NORMA ISO 14224	7
1.1.5 RELACIÓN ENTRE FMECA Y ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	7
1.2 RESEÑA DE LA INSTITUCIÓN	8
1.3 CONTEXTO OPERACIONAL	9
1.3.1 CHILERS	10
1.3.2 UNIDADES MANEJADORAS DE AIRE (UMA)	12
1.3.3 FAN COILS (FC)	14
1.4 LEVANTAMIENTOS DE FALLA	16
1.4.1 PANORAMA GENERAL	16
1.4.2 FALLAS EN CHILLERS	17
1.4.3 FALLAS EN UNIDADES MANEJADORAS DE AIRE	18
1.4.4 FALLAS EN FAN COILS	19
1.4.5 ANÁLISIS FINAL Y CONCLUSIÓN	19
1.5 ANÁLISIS DE CRITICIDAD	20
1.5.1 GRÁFICO DE DISPERSION JACKKNIFE	24

CAPÍTULO 2 26

DESCRIPCIÓN DE EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS MEDIANTE FMECA	26
2.1 ANÁLISIS DE EQUIPO CRÍTICO.....	27
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	27
2.1.3 CONDICIONES OPERATIVAS	30
2.2 ANÁLISIS DE MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA ..	30
2.3 TAXONOMÍA SEGÚN LA NORMA ISO 14224.....	31
2.4 DATOS ESPECIFICOS DEL EQUIPO.....	32
2.5 FUNCIÓN DEL EQUIPO.....	32
2.6 FALLA FUNCIONAL.....	33
2.7 MODOS DE FALLA	33
a. El equipo no entrega aire frío.....	33
b. Equipo no enciende.....	34
c. No existe flujo de aire.	34
2.8 EFECTO DEL MODO DE FALLA.....	34
2.9 ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO.....	35
a. Cuantificación del riesgo:	35
b. Cualificación del riesgo:.....	35
2.10 FMECA.....	36
2.11 MODO DE FALLA CRÍTICO.....	39

CAPÍTULO 3 40

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO	40
3.1 FUNDAMENTOS PARA LA PROPUESTA	41
3.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS	41
3.3 OBJETIVO DE LA PROPUESTA	42

3.4 DISEÑO DE LA PROPUESTA.....	43
1. Mantenimiento preventivo:	43
2. Mantenimiento predictivo:	43
3. Acciones de mejoras:	43
3.5 FRECUENCIA DEL MANTENIMIENTO	43
3.6 PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO ...	44
3.6.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DEL PLAN DE	
MANTENIMIENTO	46
3.6.2 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE FRECUENCIAS DE	
MANTENIMIENTO	47
3.6.3 LIMITACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN	
48	
3.7 IMPACTO ESPERADO DE LA PROPUESTA.....	49
3.8 BENEFICIOS DEL NUEVO PLAN DE MANTENIMIENTO	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXOS.....	57
ANEXO A: AMEF.....	57
ANEXO B: FALLAS REGISTRADAS EN CHILLERS.....	58
ANEXO C: FALLAS REGISTRADAS EN UMA.....	58
ANEXO D: FALLAS REGISTRADAS EN FAN COILS.....	58
ANEXO E: DATOS PARA JACKKNIFE	59
ANEXO F: INFORMACIÓN TÉCNICA CHILLER.....	60
ANEXO G: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S1.....	61
ANEXO H: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S2.....	62
ANEXO I: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S3.....	63

ANEXO J: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S4	64
ANEXO K: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S5	65
ANEXO L: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S6	66
ANEXO M: PLANILLA MANTENIMIENTO MENSUAL	67
ANEXO N: PLANILLA MANTENIMIENTO TRIMESTRAL	68
ANEXO O: PLANILLA MANTENIMIENTO SEMESTRAL	69

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Expresión de Criticidad / Riesgo.	20
Ecuación 1.2 Expresión de Consecuencia de Fallas.....	20
Ecuación 2.1 Expresión de riesgo cuantitativo.....	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista aérea Embajada EE. UU.	8
Figura 1.2 Sistema de agua fría	11
Figura 1.3 Distribución de UMA por espacio	14
Figura 1.4 proporción de fallas por tipo de equipo	16
Figura 1.5 Costos de reparación por tipo de equipo.....	17
Figura 1.6 Matriz de criticidad.	23
Figura 2.1 Niveles taxonómicos según norma ISO 14224:2016; aplicado al caso de estudio.....	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Datos técnicos de UMA	13
Tabla 1.2 Frecuencia de fallas.	21
Tabla 1.3 Costos de Mantenimiento.....	21

Tabla 1.4 Flexibilidad Operacional.	21
Tabla 1.5 Impacto Operacional.	22
Tabla 1.6 Impacto SHA.....	22
Tabla 1.7 Evaluación de criticidad en máquinas.	23
Tabla 2.1 Listado de equipos Fan Coils	28
Tabla 2.2 Condiciones de operación Fan Coils	30
Tabla 3.1 Plan preventivo propuesto	46

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 Selección de equipo crítico	25
Gráfico 2.1 Matriz de Riesgo Semicuantitativa	38
Gráfico 3.1 Matriz de Riesgo Semicuantitativa disminuyendo frecuencia de falla en un 40%.....	52

SIGLAS

CH15SA:	Mantenimiento Correctiva Chillers.
AH19SA:	Mantenimiento Correctiva UMA.
FC01QU:	Mantenimiento Correctiva FC.
UMA:	Unidad Manejadora de Aire.
FC:	Fan Coil.
MTTR:	Tiempo medio de reparación.
USD:	United State Dollar.
ISO:	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization).
HH:	Hora Hombre.
FMECA:	Análisis del Modo, Efecto y Criticidad de la Falla (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis).
TON:	Tonelada de Refrigeración.

BTU/H: British Thermal Units per Hour (Unidades Térmicas Británicas por Hora)

HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning.

CFM: Cubic Feet per Minute (Pie Cubico por Minuto).

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sistemas de climatización tienen un rol fundamental dentro de las operaciones en distintos tipos de instalaciones, tanto a nivel industrial como institucional, siendo esenciales para garantizar un nivel óptimo de confort y continuidad operacional.

En el presente caso, la embajada de Estados Unidos en Chile cuenta con un sistema de climatización instalado en el año 1991. Este sistema no solo cumple un rol fundamental para mantener las condiciones ambientales óptimas dentro de oficinas y espacios comunes, de igual manera es necesario en las salas de informática tales como, Sala de servidores, sala de comunicaciones y closets de comunicaciones, dentro de los cuales una variación en su temperatura o humedad podría afectar gravemente la continuidad de los servicios operativos, principalmente la transferencia de datos entre Chile y Estados Unidos, ocasionando pérdidas de información que hasta en casos puede ser confidencial.

Con el paso de los años, los equipos principales - como los chillers y las unidades manejadoras de aire - han recibido diversas intervenciones y modificaciones. Sin embargo, las unidades lo importante para prevenir, conocidos como los equipos terminales, no han sido parte de estas intervenciones. En varias oportunidades se optó por reparaciones puntuales que resolvían la urgencia, pero no atacaban la raíz del problema, sumado a un espacio reducido para trabajar y un plan de mantenimiento deficiente. Dentro de los últimos 12 meses se evidenciaron 34 fallas en el sistema, de las cuales 20 son asociadas a los fan coils, generando un costo de reparación de \$8.910 USD (costo de repuestos y HH), con un MTTR de 7,3 horas.

Por estas razones, el presente trabajo de título tiene como objetivo proponer un plan de mantenimiento preventivo actualizado a los estándares actuales. Para ello, se utilizarán metodologías de gestión de activos; se levantará información de fallas, se definirán criterios de criticidad y se priorizarán los equipos que más impactan el sistema y su continuidad operativa, fundamentado en la norma ISO 14224.

Metodológicamente, se propone utilizar un diagrama de dispersión logarítmica y un análisis FMECA para identificar los equipos críticos del sistema y los modos de falla más relevantes del sistema, con esto se plantearán estrategias de mantenimiento preventivo que ayuden a

mitigarlos desde su raíz, debido a que los modos de falla identificados presentan una alta recurrencia, patrones conocidos y están asociados a tareas básicas de inspección, limpieza y ajuste. Se proyecta aumentar la disponibilidad del sistema, reducir el tiempo invertido en reparaciones correctivas y utilizar de mejor manera los recursos, tanto materiales como humanos.

La propuesta estima una reducción del 40% en la frecuencia de fallas de los modos críticos identificados. Asimismo, se espera que la aplicación sistemática de las actividades de mantenimiento propuestas contribuya a mejorar la confiabilidad del sistema de climatización y a optimizar el uso de recursos destinados al mantenimiento.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de climatización de la Embajada de Estados Unidos en Chile, mediante el uso de análisis de criticidad y FMECA, orientado a reducir la frecuencia de fallas en los equipos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Priorizar los equipos esenciales del sistema de climatización mediante un análisis de criticidad basado en riesgo, considerando frecuencia de fallas e impacto en la continuidad operacional, con el fin de identificar los equipos críticos que serán objeto de análisis FMECA.
- Analizar los modos de falla críticos del sistema mediante la metodología FMECA, evaluando sus causas y consecuencias sobre la disponibilidad del sistema de climatización, con el fin de determinar los modos de falla críticos como base para el diseño del plan de mantenimiento
- Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo orientado a reducir la frecuencia de los modos de falla críticos del sistema, prolongar la vida útil de los fan coils y optimizar el uso de recursos de mantenimiento.

CAPÍTULO 1

**DIAGNÓSTICO INICIAL AL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN Y PRIORIZACIÓN
DE EQUIPO CRÍTICO**

1.1 MARCO TEÓRICO

La gestión del mantenimiento corresponde al conjunto de actividades orientadas a garantizar la disponibilidad, confiabilidad y vida útil de los activos físicos, mediante la planificación, ejecución y control de intervenciones técnicas. En sistemas HVAC, una adecuada gestión del mantenimiento resulta fundamental, debido a su impacto directo en la continuidad operacional, el confort y el funcionamiento de áreas críticas como salas de servidores y comunicaciones.

Dentro de este contexto, el mantenimiento ha evolucionado desde enfoques reactivos hacia estrategias más avanzadas, basadas en la anticipación de fallas y en el análisis sistemático del comportamiento de los equipos.

1.1.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO

Dentro de los tipos de mantenimiento, tenemos tres principales:

- a) **Mantenimiento correctivo:** Corresponde a las acciones realizadas posterior a la ocurrencia de una falla, el objetivo es restablecer la función del equipo. Si bien este enfoque permite resolver fallas de forma inmediata, presenta desventajas importantes, tales como la detención no planificada de los sistemas, mayores costos operacionales y riesgo de daño a componentes.

- b) **Mantenimiento preventivo:** Se basa en la ejecución de tareas programadas en intervalos de tiempo ya definidos, con el objetivo de reducir la probabilidad de falla o desgaste prematuro del equipo. Estas tareas incluyen limpieza, inspección, ajuste y reemplazo periódico de componentes.

- c) **Mantenimiento predictivo:** Consiste en la evaluación del estado del equipo mediante monitoreo de variables operacionales, tales como temperatura, vibración, corriente

eléctrica o flujo de aire. Su objetivo es detectar condiciones anormales antes de que se produzca la falla funcional, permitiendo intervenir el equipo en un momento óptimo y programado.

1.1.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Es la herramienta utilizada para priorizar los activos en función del riesgo que presenten para la operación. Este riesgo se determina generalmente como una combinación entre la frecuencia de falla y las consecuencias asociadas, tales como impacto operacional, costo de mantenimiento y efectos en la seguridad o medioambiente.

1.1.3 ANÁLISIS FMECA

El análisis de Modo, Efecto y Criticidad de la Falla es una metodología sistemática que permite identificar los modos de falla de un sistema, evaluar sus causas y consecuencias, y determinar su nivel de criticidad.

El proceso FMECA incluye:

- Identificar funciones del equipo
- Determinación de fallas funcionales
- Identificación de modos de falla
- Evaluación de efectos de falla
- Análisis de criticidad

Esta herramienta nos permite priorizar los modos de falla más relevantes y poder establecer acciones de mantenimiento orientadas a mitigar su causa raíz.

1.1.4 NORMA ISO 14224

La norma ISO 14224 establece lineamientos para la recopilación y estructuración de datos de confiabilidad y mantenimiento en equipos industriales. Su principal objetivo es estandarizar la información relacionada con fallas, facilitando el análisis. Entre sus principales aportes se encuentra la definición de taxonomías de equipos, clasificación de fallas y criterios para el registro de eventos, lo que permite construir bases de datos confiables para la toma de decisiones.

1.1.5 RELACIÓN ENTRE FMECA Y ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

El análisis FMECA permite identificar los modos de falla críticos que afectan a la operación de un sistema, proporcionando toda la base para la selección de estrategias de mantenimiento adecuadas.

Dependiendo de las características de los modos de falla identificados, se puede definir distintas estrategias:

- Modos de falla recurrentes y predecibles → mantenimiento preventivo
- Modos de falla asociados a degradación medible → mantenimiento predictivo
- Modos de falla aleatorios o de bajo impacto → mantenimiento correctivo

De esta manera, la integración del análisis FMECA con la definición de estrategias de mantenimiento permite optimizar el sistema.

1.2 RESEÑA DE LA INSTITUCIÓN

La Embajada de Estados Unidos tiene una data histórica que comienza en el año 1824 con las primeras relaciones diplomáticas con Chile, a lo largo de los más de 200 años de relaciones han pasado 55 embajadores, los cuales se han encargado de mantener firme el vínculo entre estas dos naciones, logrando una de las mayores alianzas que existen entre EE. UU. y un país Sudamericano. Las primeras operaciones en tierra local datan del año 1939 con la compra por parte del gobierno norteamericano del “Palacio Bruna” ubicado en la calle Merced frente al parque forestal, las funciones en este lugar fueron llevadas a cabo entre los años 1939 – 1994.

Actualmente todas las operaciones de la embajada tanto Cancillería como Consulado se encuentran en la comuna de Las Condes, en el edificio inaugurado en el año 1993, cuyas primeras operaciones comenzaron en julio de 1994. Este nuevo edificio fue diseñado por la oficina de arquitectos Leonard Parker Associates de Minneapolis.

El objetivo del diseño fue representar una imagen simbólica de la democracia que representa Estados Unidos, al construir un edificio de 11.300 metros cuadrados, con una alta calidad, requerimientos de seguridad y condiciones antisísmicas, cuenta con 6 pisos y 1 subterráneo.

En la figura 1.1 se puede apreciar una vista aérea del edificio de la Embajada



Figura 1.1 Vista aérea Embajada EE. UU.

Fuente: <https://cl.usembassy.gov>

1.3 CONTEXTO OPERACIONAL

Hoy en día existen sistemas de climatización armados en serie los cuales su funcionamiento dependen de 2 o más equipos, estos estarán siempre propensos a sufrir paradas inesperadas que puedan afectar el sistema completo si no existe la opción de equipos redundantes, los mayores esfuerzos deben estar en un correcto mantenimiento preventivo para alargar al máximo la disponibilidad y vida útil de los mismos.

Dentro de la embajada, el sistema constituye un componente esencial para la operación del edificio, garantizando el confort del personal y la estabilidad de áreas críticas como salas de comunicaciones y servidores que controlan información clasificada. El sistema está compuesto por un conjunto comandado por dos Chillers Airstack de 1.854.000 BTU/H cada uno, operando con refrigerante R-407C en configuración paralela. Estos equipos producen el agua fría que circula hacia las UMA (Unidades Manejadoras de Aire) ubicadas en las salas mecánicas y hacia los fan coils distribuidos en los diferentes niveles del edificio.

El sistema suministra el agua a 7°C promedio y un retorno de 12°C, logrando un ambiente de oficinas cercano a los 23°C y una humedad que varía entre 45% - 55%. Los fan coils operan las 24 horas del día, mientras que el resto del sistema funciona 17 horas diario.

La gestión de mantenimiento es responsabilidad del Departamento de Facilities, que ejecuta las actividades preventivas y correctivas con personal técnico interno. Si bien existe un plan de mantenimiento, este no ha sido actualizado en los últimos años, lo que ha generado una tendencia a las intervenciones reactivas. En promedio, el sistema presenta alrededor de 34 fallas anuales, destacando las asociadas a presostatos de alta presión, correas dañadas, serpentines sucios, filtros saturados y rodamientos desgastados.

Considerando su impacto en la continuidad operativa y en el confort térmico del personal, el sistema de climatización se clasifica como un activo de alta criticidad, siendo indispensable para asegurar la disponibilidad de las instalaciones y el correcto funcionamiento de los servicios diplomáticos.

1.3.1 CHILERS

El sistema de enfriamiento principal está compuesto por dos Chillers en configuración paralela marca AIRSTACK identificados como Santiago #1 y Santiago #2, poseen una capacidad nominal de 1.854.000 BTU/H cada uno, estos equipos operan con refrigerante ecológico R-407C.

Ambos están diseñados bajo el concepto modular, lo que permite un funcionamiento eficiente según la demanda térmica del edificio. Cada uno cuenta con 6 módulos ASP-30A, y cada módulo contiene dos compresores tipo scroll. Lo que da un total de doce compresores por unidad. Gracias al sistema modular, es posible que cada módulo trabaje de forma escalonada, manteniendo el rango del agua fría solo con la energía necesaria.

La función principal de los Chillers es enfriar agua a una temperatura de 7 °C, la cual circula a través de un circuito cerrado hacia las unidades manejadoras de aire (UMA) y los fan coils (FC) distribuidos en los distintos sectores del edificio. El proceso de enfriamiento se hace mediante un circuito de refrigeración el cual absorbe el calor del agua en el evaporador y lo libera al ambiente con el condensador enfriado por aire.

En paralelo con los chillers, el edificio cuenta con un equipo recuperador de calor denominado Heat Recovery / Santiago #3 cuya función principal es la calefacción, pero que de igual manera debido a su principio de funcionamiento se puede aprovechar su “agua fría residual” para aportar al sistema. Su funcionamiento se basa en un sistema de refrigeración con evaporador y condensador enfriados por agua, lo cual por consecuencia genera agua fría/caliente en ambos extremos de las etapas. En la figura 1.2 se presenta un diagrama del sistema de agua fría donde se observa la conexión de los Chillers (En rojo) y el Heat Recovery (En verde).

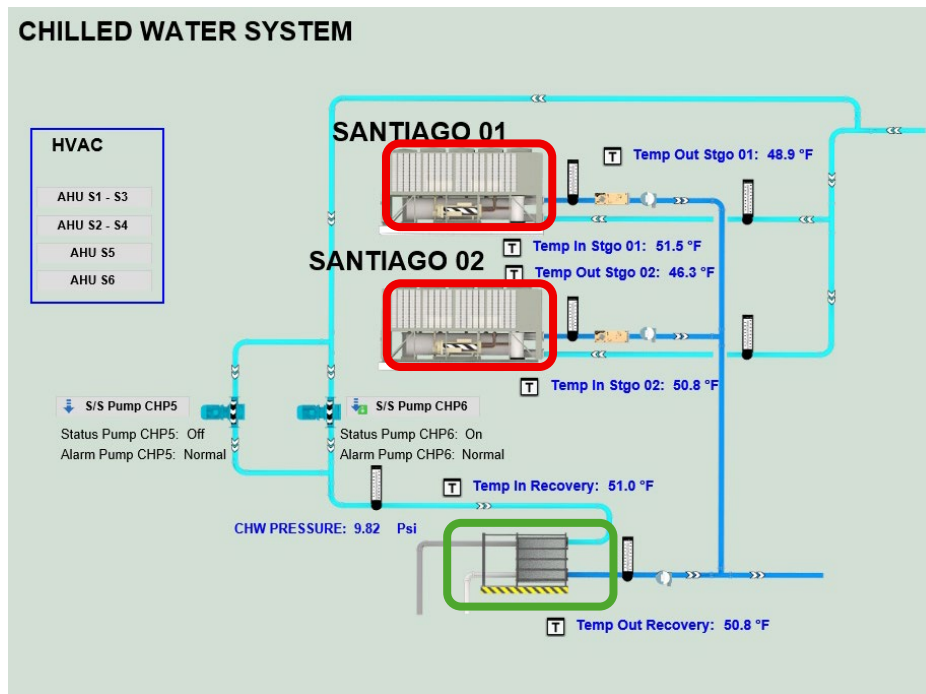


Figura 1.2 Sistema de agua fría

Fuente: Obtenida en software de control de Embajada

El mantenimiento de los Chillers está a cargo del personal técnico del Departamento de Facilities, quienes realizan inspecciones y mantenimientos preventivos aproximadamente cada seis meses, condicionados por la disponibilidad de un escolta para acceder al área de los equipos ya que es un área clasificada.

Las tareas típicas incluyen limpieza de filtros de agua, serpentines y tableros eléctricos, revisión de presostatos, verificación de fugas y presiones de succión y descarga, control de parámetros eléctricos a compresores y ventiladores, pruebas de arranque.

A pesar de que el sistema ha mantenido un rendimiento aceptable, se han identificado fallas recurrentes asociadas a presostatos de alta presión, principalmente debido a deficiencias en la limpieza de los condensadores y a la falta de mantenimiento programado en períodos regulares, esto por lo ya mencionado, la falta de un escolta para acceder al área.

Estas fallas representan uno de los modos de falla críticos dentro del sistema, dado su impacto directo en la disponibilidad del circuito de agua fría y la continuidad operativa del edificio.

1.3.2 UNIDADES MANEJADORAS DE AIRE (UMA)

El sistema cuenta con seis UMA las cuales funcionan en serie con ambos Chillers recibiendo el agua proveniente de ellos a 7°C y retornándola a 12°C una vez completado el proceso de intercambio térmico. Operan 17 horas diarias.

Cada una está compuesta de un intercambiador de calor tipo serpentín y un ventilador centrífugo, con el cual se impulsa aire a través del serpentín produciéndose la transferencia térmica, aire, que es distribuido hacia las distintas zonas del edificio mediante ductos.

Para controlar la temperatura del aire impulsado, se utiliza un sistema de control con una válvula de tres vías comandada de un actuador proporcional, el cual regula el flujo de agua hacia el serpentín según sea de requerimiento del edificio.

Este sistema se encuentra integrado a un software de control TRANE, que permite operar las manejadoras en modo automático o manual, facilitando la regulación centralizada de temperaturas dentro del edificio, el cual se rige a los distintos parámetros seteados junto con la monitorización en vivo con los múltiples sensores distribuidos dentro del edificio.

Las unidades cuentan con un sistema de filtrado muy eficaz gracias a sus dos etapas, primeramente, con filtros electrostáticos y, en segundo lugar, filtros de bolsa con una alta retención de partículas.

A continuación, se encuentra la tabla 1.1 con los datos técnicos de las UMA.

UMA	CAPACIDAD BTU/H	CAUDAL CFM	MOTOR HP	TIPO DE AGUA	COBERTURA
S1	301.534	11400	25	FRIA/CALIENTE	SECTOR OESTE
S2	309.554	14450	25	FRIA	SECTOR CENTRAL
S3	314.531	16965	25	FRIA	SECTOR SUR
S4	169.655	6534	20	FRIA/CALIENTE	SECTOR NORORIENTE
S5	112.528	4900	10	FRIA/CALIENTE	CAFETERÍA/COCINA
S6	192.541	6786	7.5	FRIA/CALIENTE	CONSULADO PÚBLICO

Tabla 1.1 Datos técnicos de UMA

Fuente: elaboración propia

El mantenimiento de las Unidades Manejadoras se realiza de manera preventiva cada tres meses, esto condicionado a la disponibilidad de realizar trabajos los fines de semana, ya que se debe apagar completamente el sistema para intervenirlo. Dentro de las labores se incluye limpieza de serpentines, cambio de filtros, revisión/cambio de correas, engrase de rodamientos, inspección de válvulas y control de actuadores.

Dentro de los síntomas más recurrentes se encuentran:

- Ruidos excesivos
- Vibraciones
- Bajo flujo de aire
- Alta temperatura de salida o inyección

Este sistema presenta un diseño bien distribuido para la cobertura del edificio, sin redundancias, lo que hace esencial la disponibilidad de cada una. Se depende fuertemente de la ejecución de las labores de mantenimiento preventivo dentro de los plazos correspondientes para evitar fallas en serie que afecten múltiples zonas.

A continuación, se presenta la figura 1.3 con una demostración de las zonas de cobertura de las manejadoras.



Figura 1.3 Distribución de UMA por espacio

Fuente: Obtenida en software de control de Embajada

1.3.3 FAN COILS (FC)

El sistema de fan coils cuenta con un total de 29 unidades distribuidas en distintos sectores del edificio, son responsables de acondicionar el aire en un modo más localizado dentro de algunas oficinas, salas de reuniones y salas técnicas. Estos reciben el agua fría directamente desde los Chillers, manteniendo un nivel de confort cercano a los 23°C. En algunos sectores

operan de igual manera con agua caliente, permitiendo el uso tanto para climatización como calefacción según la época del año.

Funcionan 24 horas al día ya que no están integrados en el software Trane, por lo que su control se basa en un termostato local con funciones automáticas por temperatura o manual según requerimiento. Su principio de funcionamiento es similar al de las UMA, solo que, en menores proporciones, equipado con un intercambiador de calor y un ventilador interno el cual fuerza el aire a través del serpentín, el cual es previamente tratado mediante un filtro de papel en la parte posterior del equipo.

El flujo de agua es controlado con una válvula de 2 vías motorizada comandada por el termostato con el principio on/off.

Sus síntomas recurrentes son:

- Vibraciones
- Ruidos
- Filtraciones de agua
- Bajo flujo de aire

Su mantenimiento es cada 3 meses, condicionado por la disponibilidad de la oficina. También en muchos casos el acceso está restringido completa o parcialmente debido a la descontrolada e irregular instalación de artefactos ajenos (escalerillas eléctricas, luces, sistemas de incendio) haciendo complicado realizar la tarea de mantenimiento.

1.4 LEVANTAMIENTOS DE FALLA

La clasificación de las fallas y modos de falla fue realizada siguiendo la norma ISO 14224, que nos recomienda el registro de cada evento considerando su función afectada, modo de falla, efecto y tiempo de reparación (MTTR). Con esto se generó una base de datos uniforme para los futuros análisis del sistema HVAC.

Para analizar el comportamiento del sistema, se obtuvieron todas las incidencias reportadas dentro de los últimos 12 meses, fue un trabajo de recopilación de información mediante las planillas de reporte CH15SA (Chillers), AH19SA (UMA) y FC01QU (Fan coils), todo esto se complementó con observaciones y antecedentes del personal técnico encargado de los equipos.

1.4.1 PANORAMA GENERAL

Durante los doce meses analizados se registraron 34 fallas, las cuales se presentan distribuidas de manera desigual entre los distintos equipos. Los FC son los que concentran la mayor cantidad de fallas con un 58,82%, seguido por las UMA con un 23,53% y finalmente los Chillers con un 17,65%. (Figura 1.4)

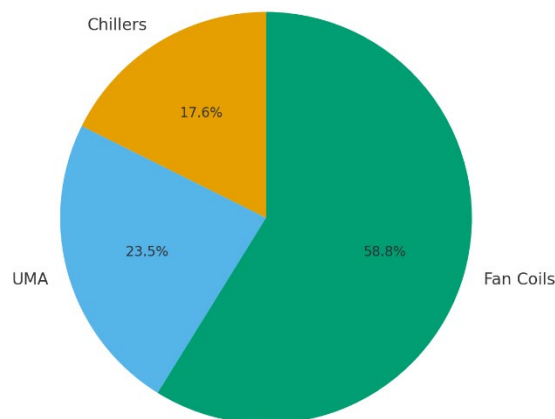


Figura 1.4 proporción de fallas por tipo de equipo

Fuente: elaboración propia en base a datos obtenidos

Esto nos muestra que siendo los FC los equipos con más horas de funcionamiento (24/7), son los más propensos a presentar un problema, mientras que los chillers, aunque son menos propensos, su impacto en el sistema es mayor debido a que comprometen la entrega de agua fría.

El tiempo total invertido en reparaciones llegó a 207 horas con un MTTR promedio de 6,1 horas considerando todos los equipos. Los costos asociados ascendieron a USD 18.810, siendo los Chillers los de mayor impacto económico por incidencia, esto seguido de los fan coils, que en suman el mayor costo acumulado. (Figura 1.5)

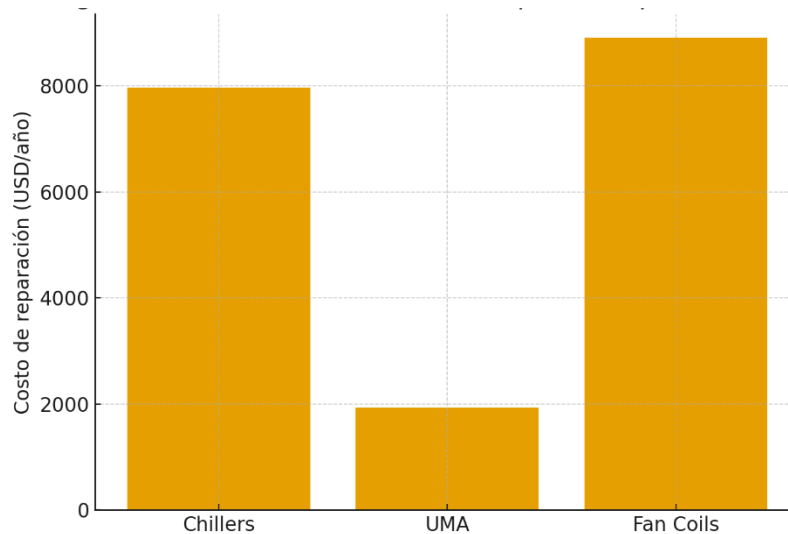


Figura 1.5 Costos de reparación por tipo de equipo

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos

1.4.2 FALLAS EN CHILLERS

Los dos Chillers muestran un comportamiento relativamente estable, aunque estos registraron 6 eventos. La recopilación de información indicó que la mayoría de estas incidencias se debieron a una falta de mantenimiento preventivo dentro del rango requerido. Se registraron seis fallas con un tiempo total de reparación de 43 horas y un costo estimado de USD 7.970.

Las principales fallas detectadas fueron:

- Alta presión en descarga
- Pérdida de capacidad de enfriamiento
- Paradas totales de compresor
- vibración excesiva

Las fallas nombradas generaron paradas parciales del sistema, reduciendo por algunas horas la capacidad total de enfriamiento. El MTTR fue de 7,2 horas, lo cual nos indica una complejidad media, principalmente asociada a las restricciones de acceso al área donde se ubican los chillers y la necesidad de un escolta para realizar las labores de reparación.

1.4.3 FALLAS EN UNIDADES MANEJADORAS DE AIRE

Las seis manejadoras de aire registraron 8 fallas con tiempo total de reparación de 19 horas y un costo de USD 1.930.

Las fallas más comunes registradas fueron:

- Flujo de aire insuficiente
- vibración excesiva
- Motores detenidos
- Filtraciones de agua

El MTTR fue de 2,4 horas, teniendo esto en cuenta se evidencia que la mayoría de los mantenimientos correctivos fueron simples, aunque la frecuencia indica la necesidad de realizar un mejor mantenimiento preventivo general en las UMA. A pesar de la baja incidencia, la pérdida del caudal de aire repercute dentro de las oficinas afectando principalmente el confort de la comunidad.

1.4.4 FALLAS EN FAN COILS

El sistema de fan coils, compuesto de 29 unidades distribuidas en todo el edificio, presentó 20 fallas con un tiempo total de reparación de 145 horas y un costo de USD 8.910.

Las fallas más comunes registradas fueron:

- Bajo caudal de aire
- Pérdida en capacidad de enfriamiento
- Ruidos y vibraciones
- Goteo de agua

El MTTR alcanzó las 7,3 horas por evento, pese a ser los equipos más pequeños del sistema, al tener una alta complejidad de acceso en algunos casos se suma el trabajo de desarme para ciertos componentes anexos, como paneles eléctricos y de cielo americano.

Aunque el impacto de estas fallas es individual, representan una carga operativa mayor para el personal de mantenimiento, por lo que este sistema se perfila como uno de los más problemáticos y con mayor potencial de una mejora en su plan preventivo.

1.4.5 ANÁLISIS FINAL Y CONCLUSIÓN

Si analizamos el sistema globalmente, esta evidencia claramente lo siguiente:

- Los Chillers son críticos por su importancia principal, cualquier falla compromete el suministro de agua fría para el resto de los equipos.
- Las UMA presentan una criticidad intermedia, con fallas repetitivas pero controlables.
- Los Fan coils son críticos debido a la frecuencia acumulada, concentrando un poco menos del 60% de las paradas.

Si observamos los patrones podemos deducir que la causa común más grande es un deficiente mantenimiento preventivo (Limpieza, ajuste y calibración). Seguido de esto, la antigüedad

de algunos equipos empieza a notarse (25 años o superior). Por otro lado, tenemos las limitaciones en acceso y planificación,

Esta información recopilada servirá como base para el siguiente punto que es determinar el equipo crítico con un gráfico de dispersión logarítmico Jackknife.

1.5 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Con el objetivo de Priorizar los equipos críticos del sistema (Chillers, UMA o FC) se realizó el siguiente análisis de criticidad en base a costos de mantenimientos recopilados en los registros de las órdenes del sistema interno de la Embajada.

La criticidad fue calculada a través de la ecuación 1.1 que se encuentra a continuación.

$$Riesgo = Frecuencia\ de\ fallos\ x\ Consecuencia\ de\ Fallas$$

Ecuación 1.1 Expresión de Criticidad / Riesgo.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

La consecuencia de fallas se calculó con la siguiente ecuación 1.2.

$$Consecuencia = [(IO\ x\ FO) + CM + SHA]$$

Ecuación 1.2 Expresión de Consecuencia de Fallas.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

Las categorías de la frecuencia de fallas se presentan en la tabla 1.2.

Frecuencia de Fallas	
FF > 15 [Fallas/Año]	4
$10 \leq \text{FF} \leq 15$ [Fallas/Año]	3
$5 \leq \text{FF} \leq 10$ [Fallas/Año]	2
$\text{FF} \leq 5$ [Fallas/Año]	1

Tabla 1.2 Frecuencia de fallas.

Fuente: Elaboración propia.

Las categorías de los costos de mantenimiento se presentan en la tabla 1.3.

Costos de Mantenimiento	
$\text{CM} \geq 8.001$ [USD]	3
3.001 [USD] $\leq \text{CM} < 8.000$ [USD]	2
$\text{CM} < 3.000$ [USD]	1

Tabla 1.3 Costos de Mantenimiento.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

Las categorías de la flexibilidad operacional se presentan en la tabla 1.4.

Flexibilidad Operacional	
La reparación dura más de 12 horas.	4
La reparación dura entre 4 a 12 horas.	3
La reparación dura hasta 4 horas.	1

Tabla 1.4 Flexibilidad Operacional.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

Las categorías de impacto operacional se presentan en la tabla 1.5.

Impacto Operacional	
Parada inmediata de toda la producción	10
Disminuye la producción en un 50%	6
Disminuye la producción en un 25%	3
No genera ningún efecto sobre la operación y producción.	1

Tabla 1.5 Impacto Operacional.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

Las categorías de Impacto SHA se presentan en la tabla 1.6.

Impacto SHA	
Alto impacto en la seguridad humana/ambiente.	7
Afecta las instalaciones causando severos daños.	5
Provoca daños menores (accidentes e incidentes), impacto ambiental bajo.	3
Provoca molestias mínimas en las instalaciones y ambiente.	1

Tabla 1.6 Impacto SHA.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

La matriz de criticidad en la figura 1.6 consta de una cuadrícula de 4x5 y consta de 3 sectores los cuales se detallan a continuación:

- Verde: baja criticidad.
- Amarillo: mediana criticidad.
- Rojo: alta criticidad.

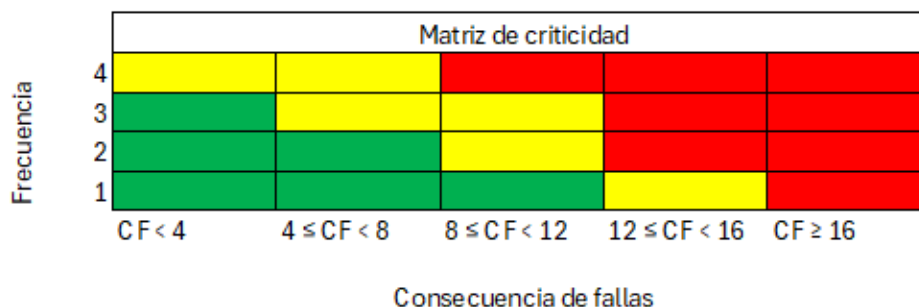


Figura 1.6 Matriz de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

Las escalas utilizadas para la evaluación de los criterios de criticidad fueron adoptadas a partir de la metodología proporcionada por el profesor guía y utilizadas como base para el presente análisis. La diferencia en los rangos de evaluación responde a la naturaleza de cada criterio, asignándose una mayor escala a aquellos factores con mayor impacto sobre la continuidad operacional y seguridad. De esta forma, la matriz busca reflejar de manera más representativa la influencia relativa de cada criterio en la criticidad global de los equipos evaluados.

Al evaluar los factores para ambas máquinas, se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla 1.7.

Máquinas	Frecuencia	IO	FO	CM	SHA	TOTAL
Chillers	2	6	3	2	3	46
UMA	2	3	1	1	3	14
FC	4	1	3	3	3	36

Tabla 1.7 Evaluación de criticidad en máquinas.

Fuente: Elaboración propia.

Gracias al análisis de criticidad realizado al sistema, podemos concluir, que los Chillers y los FC son los equipos más críticos, en base a su frecuencia de falla y costo de reparación. Con esta información podemos mejorar el enfoque en aplicar un mejor mantenimiento preventivo en ambas máquinas.

1.5.1 GRÁFICO DE DISPERSION JACKKNIFE

El análisis de criticidad tuvo por finalidad encontrar los equipos del sistema de climatización que generan un mayor riesgo para la operación, se consideró tanto la frecuencia de fallas como su impacto económico para la embajada. Para todo esto se aplicó el gráfico de dispersión logarítmica Jackknife, el cual nos permite ver de forma gráfica la relación entre la frecuencia de fallas y el correspondiente costo asociado al mantenimiento correctivo.

El gráfico se divide en cuatro cuadrantes por las medianas de ambas variables, identificando los equipos con mayor frecuencia y costo, lo que nos asocia el equipo crítico. En el gráfico 1.1, se puede observar el comportamiento comparativo entre los 3 equipos.

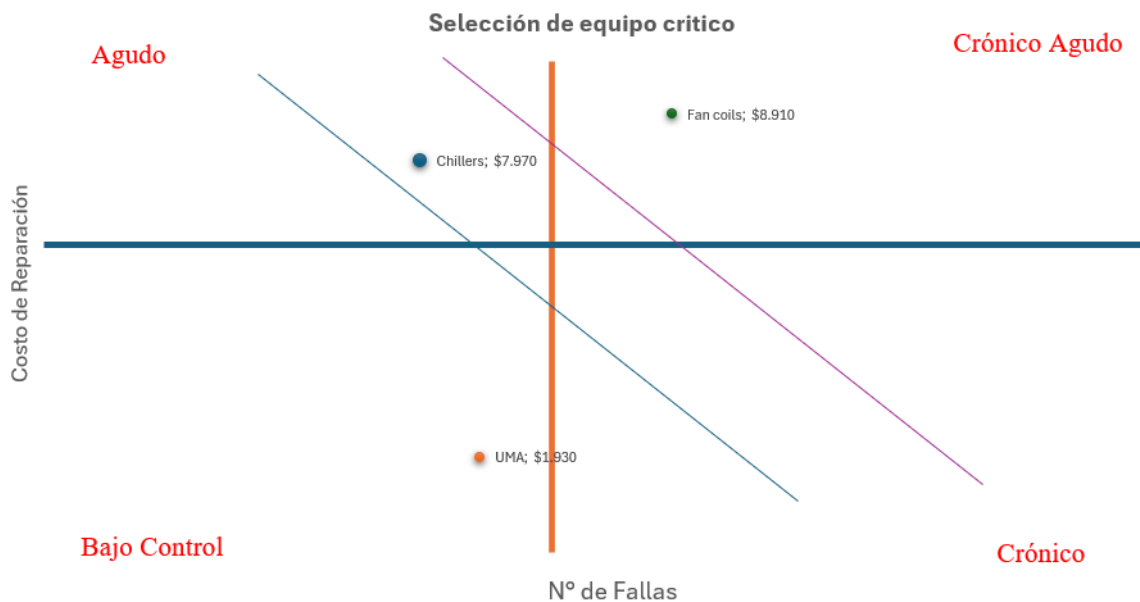


Gráfico 1.1 Selección de equipo crítico

Fuente: elaboración propia

Si bien la matriz de criticidad identificó a los chillers como los equipos con mayor nivel de criticidad, debido al alto impacto operacional que generaría una falla o detención de estos, el análisis mediante el gráfico Jackknife permitió observar una problemática diferente dentro del sistema. Los fan coils concentraron la mayor cantidad de fallas registradas durante el período analizado, además de acumular una parte importante de las horas de mantenimiento correctivo y los costos asociados a dichas intervenciones.

Por esta razón, aunque los chillers representan el mayor riesgo desde el punto de vista de las consecuencias operacionales, los fan coils constituyen el principal foco de mejora desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento. La alta recurrencia de fallas observada en estos equipos evidencia una oportunidad significativa para reducir la carga correctiva del sistema mediante la implementación de estrategias de mantenimiento más efectivas. En consecuencia, se determinó enfocar el análisis FMECA y la propuesta de mantenimiento en los fan coils, debido a que es en ellos donde se concentra la mayor cantidad de eventos de falla y, por lo tanto, el mayor potencial de mejora.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS MEDIANTE FMECA

2.1 ANÁLISIS DE EQUIPO CRÍTICO

Luego de haber analizado el sistema de climatización con todos los datos reunidos, se pudo verificar mediante el análisis de criticidad y el gráfico Jackknife que los equipos críticos son los fan coils. Con toda esta información obtenida se buscó la raíz de los problemas, y esto comenzó con una descripción de los equipos críticos.

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El funcionamiento de los fan coils se basa en un intercambiador de calor tipo tubo-aleta, y un ventilador centrífugo. El principio operativo consiste en el intercambio de calor, el cual ocurre dentro del serpentín mediante el agua fría/caliente que circula a través de él y el aire que es impulsado a través de este, gracias a esto se genera una transferencia de calor entre el agua del circuito y el aire.

Cada uno de los fan coil es una unidad autónoma, la cual es controlada solo por un termostato local, con esto se permite tener un mejor control de la temperatura dentro de esa oficina la cual en todos los casos está seteada a 23°C y solo los técnicos autorizados pueden modificar.

En la actualidad se cuenta con 29 fan coils distribuidos en los pisos -1, 2, 3 y 4. Operan 24 horas al día debido a que los termostatos actuales no tienen control de horario. Debido a la cantidad de equipos y su antigüedad, los fan coil representan el subconjunto más crítico del sistema de climatización.

En la tabla 2.1 se encuentra el listado de equipos junto a su capacidad, valor y ubicación.

Equipo	Capacidad BTU/H	Valor (USD)	Ubicación (Sala)
Fan coil #1	24850	\$ 3.000	55
Fan coil #2	22541	\$ 2.850	33
Fan coil #5	15200	\$ 1.700	41
Fan coil #6	52979	\$ 7.000	146
Fan coil #7	52979	\$ 7.000	146
Fan coil #8	42578	\$ 6.100	146B
Fan coil #9	42578	\$ 6.100	148
Fan coil #11	18741	\$ 2.500	122
Fan coil #12	18741	\$ 2.500	122
Fan coil #14	37800	\$ 5.780	304
Fan coil #15	30410	\$ 4.000	305
Fan coil #16	30410	\$ 4.000	306
Fan coil #17	37800	\$ 5.780	306
Fan coil #18	15420	\$ 1.780	340
Fan coil #19	26455	\$ 3.330	337
Fan coil #19A	26455	\$ 3.330	337
Fan coil #21	32112	\$ 4.250	425
Fan coil #23	25411	\$ 3.210	R02
Fan coil #24	27898	\$ 3.560	328
Fan coil #25	18455	\$ 2.450	328D
Fan coil #26 Casette	18000	\$ 2.400	328D
Fan coil #26A Casette	18000	\$ 2.400	328D
Fan coil #27	21547	\$ 2.740	440
Fan coil #28	32111	\$ 4.250	440B
Fan coil #29	24102	\$ 3.000	309
Fan coil #30	17456	\$ 2.400	309C
Fan coil #31	14587	\$ 1.600	309
Fan coil #32	25111	\$ 3.110	440A
Fan coil #33	22487	\$ 2.850	53
Fan coil #34	18456	\$ 2.450	45

Tabla 2.1 Listado de equipos fan Coils

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL FAN COIL

Cada unidad se compone de los siguientes elementos:

- **Serpentín tubo-aleta:** Elemento intercambiador de calor donde por dentro del tubo circula agua fría o caliente. Fabricado en cobre con aletas de aluminio las cuales aumentan la superficie de contacto con el aire haciendo más eficiente la transferencia de calor.
- **Ventilador centrífugo:** Aspira el aire y lo impulsa a través del serpentín, en la Embajada existen con eje acoplado al motor y con polea – correas.
- **Motor eléctrico:** De corriente alterna, la potencia varía dependiendo del quipo.
- **Bandeja de condensado:** Reúne el agua que se genera por la condensación en el serpentín.
- **Filtro de aire:** Filtro que retiene las partículas en suspensión, generalmente de papel.
- **Válvula de control:** Es la encargada de regular el flujo de agua hacia el equipo, se acciona mediante señales enviadas por el termostato.
- **Termostato:** Controlador del equipo, se acciona dependiendo de la temperatura ambiente en la sala, generalmente seteado a 23°C.

2.1.3 CONDICIONES OPERATIVAS

En la tabla 2.2 se encuentran las condiciones operativas de los fan coils.

Parámetro	Valor
Temperatura de agua de entrada	8/9 °C
Temperatura de agua en retorno	12/13 °C
Temperatura de inyección de aire	12°C
Temperatura de retorno de aire	21/22°C
Voltaje	220 V AC
Horas de operación	24 H
Frecuencia de mantenimiento actual	Cada 3 meses según disponibilidad
Fallas recurrentes	Sin flujo de aire – no enfría

Tabla 2.2 Condiciones de operación Fan Coils

Fuente: Elaboración propia.

2.2 ANÁLISIS DE MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA

El análisis del Modo, Efecto y Criticidad de Falla (FMECA) es una herramienta de análisis del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), que a través de la jerarquización de los ítems mantenibles de un activo que desempeña una función específica, facilita la identificación de su modo de falla con el fin de conseguir una clasificación cuantitativa y cualitativa, evaluar el impacto y revelar los modos de falla críticos a través de un análisis semicuantitativo. Tras haber identificado los modos de fallo críticos, estos serán priorizados en función de su impacto económico y frecuencia de fallos, lo cual es un gran apoyo para la toma de decisiones a fin de identificar oportunidades de mejoras que logren optimizar el rendimiento de los equipos.

2.3 TAXONOMÍA SEGÚN LA NORMA ISO 14224

La norma ISO 14224: 2016, define la taxonomía como la clasificación sistemática de equipos o sistemas basándose en características afines para la agrupación en niveles. Esta clasificación, facilita la ubicación del activo de interés dentro de una organización, contribuyendo de esta forma para la definición de sus funciones para luego definir las fallas funcionales que impactan en la confiabilidad del subsistema de estudio en base a los ítems mantenibles del activo.

En la figura 2.1 se visualiza la taxonomía, donde el nivel máximo es la Embajada y el nivel mínimo son las partes del equipo mantenibles.



Figura 2.1 Niveles taxonómicos según norma ISO 14224:2016; aplicado al caso de estudio

Fuente: Elaboración propia.

2.4 DATOS ESPECIFICOS DEL EQUIPO

Para cada activo, que se pretenda inspeccionar o analizar, es imprescindible reunir información fundamental del proceso para precisar los detalles que tendrán impacto en la toma de decisiones frente a la gestión del activo. La norma ISO 14224:2016, sugiere un listado de datos específicos para cada clase de equipo, entre los cuales no se encuentra el equipo en estudio. Sin embargo, en la sección 2.1.1 es presentada esta información.

2.5 FUNCIÓN DEL EQUIPO

Tomando como referencia la información presentada en la sección 2.1.1 y 2.1.3, es posible definir la función principal y secundaria de los fan Coils, las cuales serán claves a la hora de ejecutar el FMECA.

Función Primaria

Lograr enfriar una oficina a 22°C con un flujo de aire de 50 CFM.

Función Secundaria

Mantener el aire renovado en las oficinas.

Cabe señalar que los fan coils analizados cuentan con una toma de aire exterior conectada directamente al equipo, por lo que además de climatizar, participan en el proceso de renovación de aire de las oficinas.

2.6 FALLA FUNCIONAL

Una falla funcional es aquella que pone al activo en un estado, total o parcial, de incapacidad de cumplir la función primaria de la naturaleza del equipo bajo los parámetros definidos por su contexto operacional. De esta manera, las fallas funcionales para el caso de análisis serán las siguientes.

- Equipo no entrega aire frío
- No existe circulación de aire
- Equipo no funciona

Cabe destacar que las fallas funcionales nombradas anteriormente se contemplarán con el mismo nivel de importancia para razones del FMECA. A partir de esto, se desliga que cualquier falla de estas condiciones es capaz de poner fuera de servicio al equipo.

2.7 MODOS DE FALLA

Un modo de falla es definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico. Con base en las fallas funcionales nombradas anteriormente, se contemplarán los modos de fallo que influyan directamente en la ocurrencia de cada falla funcional.

a. El equipo no entrega aire frío.

- Válvula defectuosa mecánicamente (1.1.1)
- Sistema de agua con aire (1.1.2)
- Válvula sin energía (1.1.3)

- Filtro de aire saturado (1.1.4)

b. Equipo no enciende.

- Controlador sin energía (1.2.1)
- Motor quemado (1.2.2)
- Contactor defectuoso (1.2.3)

c. No existe flujo de aire.

- Serpentin bloqueado (2.1.1)
- Rodamiento gripado (2.1.2)
- Correa cortada (2.1.3)

2.8 EFECTO DEL MODO DE FALLA

El efecto del modo de falla se refiere a lo que sucede al producirse cada modo de falla, es decir, los efectos de la falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla.

Para definir los efectos de los modos de falla, se consideraron los siguientes criterios:

- Evidencia: alude a si la falla es detectable de manera directa, puede ser un SÍ o un NO.
- SHA: se refiere a si la ocurrencia del modo de falla afecta de manera directa a la seguridad y salud de las personas o al medio ambiente, puede ser un SÍ o un NO.
- Efecto operacional (síntomas): hace referencia a la manera en que la falla se hace presente en el comportamiento u operación del equipo. Se deben describir síntomas.
- Acción correctiva: asociada a la tarea de mantenimiento necesaria a ejecutar para restaurar la función del activo.

2.9 ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO

Al realizar un análisis de riesgo de los potenciales modos de fallos, es de suma importancia contar con la información de frecuencia y consecuencias por cada modo de falla, ya que ambos factores son determinantes en la obtención del riesgo cuantitativo. La frecuencia fue generada a partir de recopilación de antecedentes dentro de las fichas de mantenimiento y reportes archivados, de igual manera la consecuencia.

a. Cuantificación del riesgo:

La cuantificación del riesgo considerará factores, tales como: costos directos por falla [USD/falla], el cual es un costo asociado a la mano de obra por HH de un técnico de la embajada, más el costo de los repuestos utilizados por cada modo de falla. El factor del impacto en la producción en el caso de la embajada no será considerado debido a que no es un lugar donde se produce un producto.

Considerando lo anterior, el riesgo cuantitativo quedará definido por la ecuación 2.1.

$$Riesgo\ Cuantitativo = FF * (MTTR * IMP\ PROD + Costo\ Directo\ por\ Falla)$$

Ecuación 2.1 Expresión de riesgo cuantitativo.

Fuente: Presentación de Pablo Duque – Ingeniería de Mantenimiento.

b. Cualificación del riesgo:

Para evaluar el impacto en la seguridad y medio ambiente de cada modo de falla, se realizará de manera cualitativa, considerando que a cada nivel de impacto se le asignará una letra (A, B o C), y al concatenar ambas letras se obtendrá el riesgo cuantitativo, asignando un número que será visualizado por cada modo de falla en el gráfico.

A continuación, se detallan los 3 niveles de impacto:

- Clasificación A: Alto impacto en ambiente o seguridad por el evento de modo de falla.
- Clasificación B: Mediano impacto en ambiente o seguridad por el evento de modo de falla.
- Clasificación C: Bajo impacto en ambiente o seguridad por el evento de modo de falla.

Al concatenar el impacto de seguridad y medio ambiente se pueden dar los siguientes niveles de riesgo:

- Clasificación A-A: Riesgo Máximo.
- Clasificación A-C, A-B o B-A: Riesgo Medio.
- Clasificación B-C o C-C: Riesgo Mínimo.

2.10 FMECA

Los valores presentados en la tabla 2.3 fueron utilizados para construir el gráfico de riesgo cuantitativo mostrado en el gráfico 2.1

Modo de falla	Frecuencia anual	Costo por evento [USD]	Riesgo anual [USD/año]
Filtro saturado	5	582	2910
Rodamiento gripado	1	1100	1100
Controlador sin energía	3	260	780
Motor quemado	2	585	1170

Tabla 2.3

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el modo de falla más crítico, se presenta el siguiente Gráfico de Cuantificación de Riesgo Cualitativo (gráfico 2.1), el cual en su eje Y contempla el riesgo cuantitativo [USD/año], y en su eje X contempla el riesgo cualitativo (impacto en seguridad y medio ambiente).

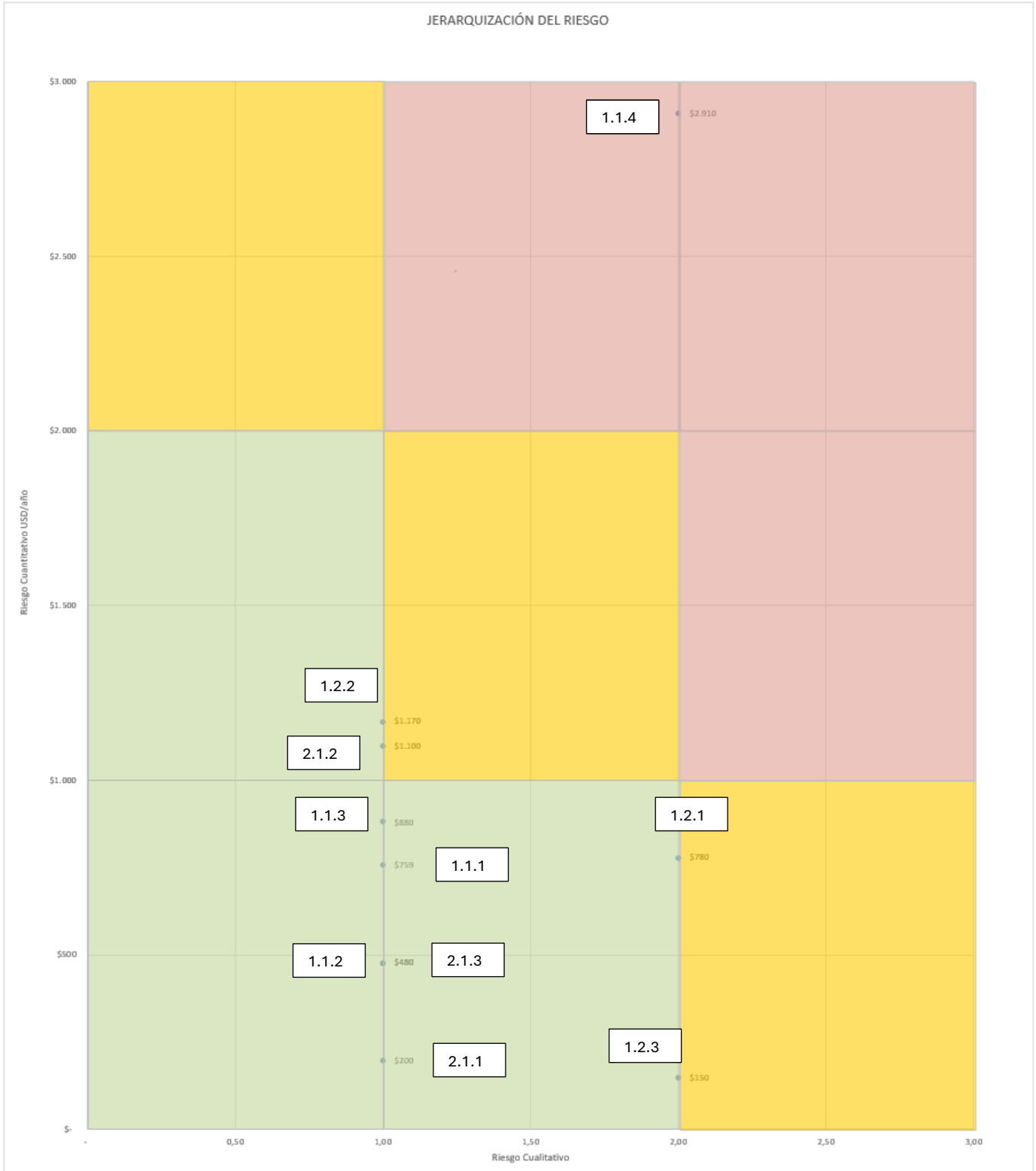


Gráfico 2.1 Matriz de Riesgo Semicuantitativa

Fuente: Elaboración propia.

A través de lo visualizado en la matriz de riesgo, el modo de falla 1.1.4 (Filtro de aire saturado) es el más crítico, ya que se encuentra en la zona de alto riesgo; esto es debido a que su riesgo cuantitativo (alta frecuencia de fallos, altos tiempos de reparación y elevados costos de fallas), sumado a su impacto en seguridad y medio ambiente (en caso de la ocurrencia de la falla) genera grandes consecuencias en la embajada (\$2.910 [USD/año]).

Esta es una tarea básica y relativamente sencilla, por lo que es de suma relevancia tomar acciones sobre este modo de falla para lograr encontrar una solución que disminuya su frecuencia de fallas. De igual manera se considerarán los otros modos de fallo cercanos a críticos (1.2.1; 1.2.2; 2.1.2), con tal de tomar en consideración las fallas que más se repiten para incluir en el plan de mantenimiento una rutina que las pueda mitigar de igual manera.

2.11 MODO DE FALLA CRÍTICO

El modo de falla crítico en el subsistema de fan coils, son los filtros saturados. Esto es de una complejidad media, pero con una consecuencia alta, ya que puede afectar el rendimiento del equipo a largo plazo, y si esto se repite durante varias ocasiones este daño acorta la vida útil del equipo rápidamente.

Un filtro saturado genera una baja en el flujo de aire lo que provoca que el motor del ventilador tenga que forzarse más para hacer circular el aire, además genera un aumento en el consumo eléctrico y al no tener un correcto flujo genera el sobrecalentamiento del motor, ya que su sistema del enfriamiento es a través del mismo aire que circula por el equipo.

Este modo de falla puede ser muy costoso, para prevenir este tipo de fallas es necesario actuar antes de tiempo o en el tiempo correcto para realizar el mantenimiento preventivo lo cual considera un correcto funcionamiento y un alargamiento de la vida útil del equipo.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO

3.1 FUNDAMENTOS PARA LA PROPUESTA

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de criticidad y la posterior aplicación del FMECA al equipo crítico del sistema – conocidos como fan coils – se determinó que la mayor parte de las fallas son ocasionadas en su origen por un defectuoso mantenimiento preventivo actual, principalmente en las tareas más básicas como limpieza, inspección y reposición de componentes mecánicos.

Con toda esta información, en este capítulo se desarrolló una propuesta de mantenimiento preventivo, la cual está orientada específicamente a reducir la frecuencia de los modos de falla más relevantes tales como, filtro de aire saturado, serpentín obstruido, correas cortadas y rodamientos dañados, mejorar la disponibilidad del sistema y disminuir el tiempo que se ocupa en mantenimientos correctivos.

La presente propuesta se construye como un plan único y consolidado, el cual está alineada con las bases analizadas del FMECA en el capítulo anterior, basado en buenas prácticas de mantenimiento definidas por la norma ISO 14224 y las metodologías del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

3.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

La reducción proyectada de las fallas en un 40% se fundamenta en el análisis del comportamiento histórico del sistema de climatización. Durante el periodo analizado se registraron 34 fallas, de las cuales un 59% correspondieron a los fan coils, identificándolos como el subsistema más crítico.

A través del análisis FMECA se determinaron los modos de falla críticos que concentran la mayor frecuencia de ocurrencia y costo asociado, entre los que destacan principalmente los filtros de aire saturados (1.1.4), fallas en motores (1.2.2), controladores (1.2.1) y rodamientos (2.1.2). Estos modos de falla presentan características de recurrencia y están asociados a tareas básicas de mantenimiento como limpieza, inspección, ajuste y monitoreo.

Los modos de falla críticos identificados mediante el análisis FMECA concentraron 11 de las 20 fallas registradas en los fan coils, representando aproximadamente un 55% del total. Considerando que las actividades propuestas actúan directamente sobre dichos modos de falla, existe un potencial significativo de mejora asociado a su mitigación. Sin embargo, debido a que la propuesta no fue implementada durante el período de estudio y a que no resulta técnicamente correcto asumir la eliminación total de estas fallas, se adoptó una reducción proyectada del 40% como escenario conservador para estimar el impacto potencial del plan de mantenimiento.

Adicionalmente, esta reducción se vería reflejada en la disminución de las horas destinadas a mantenimiento correctivo, pasando aproximadamente de 145 a 107 horas anuales, lo que representa una mejora significativa en la utilización de los recursos.

Por esta razón, se considera técnicamente razonable proyectar una reducción significativa en la recurrencia de fallas, manteniendo el carácter estimativo de los resultados, dado que la propuesta fue desarrollada a nivel de diseño y no fue implementada ni validada operacionalmente durante este periodo de estudio.

3.3 OBJETIVO DE LA PROPUESTA

En este capítulo se trabajó con el objetivo de diseñar un plan de mantenimiento preventivo optimizado para los fan coils, el cual permitiría:

- Reducir la ocurrencia de los modos de falla críticos identificados en el FMECA.
- Establecer una frecuencia adecuada de intervención acorde a la operación real del edificio.
- Disminuir las horas destinadas a mantenimiento correctivo.
- Aumentar la disponibilidad del sistema HVAC.
- Disminuir los costos asociados a las fallas recurrentes.

3.4 DISEÑO DE LA PROPUESTA

La propuesta está compuesta por tres puntos clave para su aplicación:

1. Mantenimiento preventivo:

Son las actividades programadas de limpieza, inspección visual y verificación funcional, las cuales están destinadas a evitar la excesiva acumulación de polvo, suciedad y desgaste prematuro.

2. Mantenimiento predictivo:

Son las actividades de medición de temperatura en la salida y retorno de aire, amperaje de motor, estado del flujo de aire y vibración perceptible. Estas actividades podrían permitir anticipar fallas futuras que se puedan presentar.

3. Acciones de mejoras:

Recomendaciones puntuales para normalizar los repuestos, actualizaciones a los ítems más antiguos como válvulas y ventiladores, y mejoras en los accesos a los equipos. Todo esto orientado a disminuir los modos de falla ya identificados.

3.5 FRECUENCIA DEL MANTENIMIENTO

La frecuencia del mantenimiento se pudo definir tomando en consideración los siguientes elementos principales:

- Modos de falla críticos identificados en el FMECA
- Operación 24/7 de los fan coils
- Evidencia de fallas identificadas en el capítulo 1

Con la base de los antecedentes nombrados, se pudo establecer una frecuencia de mantenimiento trimestral como intervalo mínimo para asegurar la confiabilidad de los equipos, a esto se le suma un complemento de tareas mensuales de inspección operacional, especialmente en los cuales se hayan encontrado fallas repetitivas.

Adicionalmente a esto se considerará una mantención anual la cual estará enfocada en la revisión profunda de los componentes mayores como válvulas de control, drenajes, partes mecánicas, estado del motor y transmisión.

Lo que se buscó con esta combinación de tareas fue:

- Reducción de las fallas más recurrentes
- Aumentar la disponibilidad de los equipos
- Equilibrar la carga de trabajo del personal
- Disminuir los tiempos de intervención a los equipos

3.6 PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En la siguiente tabla 3.1 se detallará el plan de mantenimiento preventivo para los fan coils, las actividades propuestas en el plan de mantenimiento fueron definidas a partir de los resultados obtenidos en el análisis FMECA. Cada tarea fue orientada a intervenir directamente los modos de falla identificados como críticos, con el objetivo de reducir su frecuencia de ocurrencia y mitigar las consecuencias asociadas. De esta manera, existe una relación directa entre los modos de falla priorizados, el riesgo identificado y las actividades de mantenimiento incorporadas en la propuesta. Esta tabla es un resumen de los documentos propuestos FC-MEN, FC-TRI y FC-SEM, los cuales están adjuntos en anexos.

Componente	Tarea de mantenimiento	Frecuencia	Recursos	Objetivo
Filtro de aire	Retiro y limpieza / reposición	Mensual	Aspiradora, repuestos	Evitar saturación y caída de presión; mitigar pérdida de capacidad térmica
Serpentín tubo–aleta	Limpieza superficial y desinfección; lavado profundo anual	Trimestral	Cepillos suaves, detergente neutro, hidrolavadora baja presión	Reducir obstrucción de flujo y mejorar intercambio térmico
Ventilador centrífugo	Revisión de aspas, limpieza y ajuste de fijaciones	Trimestral	Herramientas manuales	Prevenir desbalance, ruido y sobreconsumo eléctrico
Correas y poleas	Revisión visual, tensión, alineación; reemplazo preventivo si es necesario	Trimestral	Juego de llaves, tensiómetro	Evitar pérdida de caudal de aire por cortes o deslizamientos
Rodamientos	Inspección sonora y vibración perceptible; lubricación si aplica	Trimestral	Estetoscopio mecánico / grasa	Reducir vibraciones, evitar falla del motor
Motor eléctrico	Revisión de amperaje, bornes, temperatura; limpieza de ventilación	Semestral	Amperímetro, termómetro infrarrojo	Prevenir sobrecarga, proteger la vida útil del motor

Componente	Tarea de mantenimiento	Frecuencia	Recursos	Objetivo
Válvula de control y actuador	Verificación de carrera, estanqueidad y respuesta	Semestral	Multímetro, herramientas	Mejorar control térmico y evitar inestabilidad de temperatura
Bandeja de condensados	Limpieza y desinfección; verificación de drenaje	Trimestral	Cepillo, agua, paños	Evitar filtraciones, goteo y proliferación de hongos
Control/termoestado	Verificación de calibración y respuesta	Trimestral	Termómetro	Asegurar regulación estable del recinto

Tabla 3.1 Plan preventivo propuesto

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

La definición de las tareas y frecuencias de mantenimiento propuestas se fundamenta directamente en los resultados obtenidos en el análisis FMECA, en el cual se identificaron los modos de falla más críticos del sistema, caracterizados por su alta frecuencia de ocurrencia y su impacto en la operación.

En particular, el modo de falla asociado a la saturación de filtros de aire fue identificado como el más crítico, debido a su alta recurrencia y su efecto directo en la disminución del flujo de aire, lo que genera un aumento en la carga de trabajo del motor y una reducción en la capacidad de enfriamiento del equipo. En este contexto, se establece una frecuencia mensual de limpieza y reposición de filtros, con el fin de prevenir la acumulación de partículas y mantener condiciones óptimas de operación.

De manera similar, la limpieza periódica de los serpentines se justifica debido a que la obstrucción por suciedad reduce la eficiencia del intercambio térmico, aumentando el consumo energético y disminuyendo el rendimiento del sistema. La frecuencia trimestral permite mantener un equilibrio entre eficiencia operativa y carga de trabajo del personal.

En el caso de los componentes mecánicos, tales como correas, rodamientos y ventiladores, las tareas de inspección, ajuste y lubricación se orientan a prevenir fallas asociadas a desgaste progresivo, tales como desalineación, vibraciones y sobrecargas en el motor. Estas fallas, si no son abordadas oportunamente, pueden derivar en fallas mayores con mayor costo y tiempo de reparación.

Finalmente, la verificación de válvulas de control y sistemas eléctricos se incorpora con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento del sistema de regulación térmica, evitando inestabilidades en la temperatura y fallas funcionales del equipo.

3.6.2 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO

La determinación de las frecuencias de mantenimiento se realizó considerando los siguientes criterios técnicos:

- Criticidad de los modos de falla: Se priorizaron intervenciones más frecuentes en aquellos componentes asociados a modos de falla de alta frecuencia e impacto, identificados en el análisis FMECA.
- Condiciones de operación: Los fan coils operan de forma continua (24 horas al día), lo que incrementa la tasa de desgaste de sus componentes y justifica la necesidad de intervenciones periódicas más exigentes.
- Historial de fallas: Se consideraron los datos recopilados en el levantamiento de fallas, identificando patrones recurrentes que permiten definir intervalos de mantenimiento adecuados.

- Facilidad de intervención: Se priorizaron tareas preventivas en componentes de fácil acceso y bajo costo de intervención, permitiendo reducir la ocurrencia de fallas sin afectar significativamente la operación.
- Equilibrio operativo: Se buscó establecer una frecuencia que permita reducir fallas sin sobrecargar al personal de mantenimiento, asegurando una implementación viable del plan.

En la siguiente figura 3.1 se puede apreciar una proyección del cronograma anual y sus respectivos mantenimientos; mensual, trimestral y anual.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MANTENIMIENTO	MENSUAL	MENSUAL	TRIMESTRAL	MENSUAL	MENSUAL	SEMESTRAL	MENSUAL	MENSUAL	TRIMESTRAL	MENSUAL	MENSUAL	SEMESTRAL
FILTRO DE AIRE												
SERPENTIN												
VENTILADOR												
CORREA/POLEA												
RODAMIENTO												
MOTOR												
VALVULA CONTROL												
BANDEJA CONDENSADO												
TERMOSTATO												

Figura 3.1 Cronograma de mantenimiento anual

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 LIMITACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

La implementación del plan de mantenimiento propuesto puede verse condicionada por diversos factores operacionales propios del contexto de la Embajada. Entre las principales limitaciones se encuentran:

- Acceso a equipos: En muchos casos, el acceso a los fan coils se encuentra restringido debido a la disposición de instalaciones eléctricas, sistemas de iluminación, sistemas de incendio, sistemas de altavoz u otros elementos que dificultan la intervención.
- Disponibilidad de personal: La ejecución del plan depende de la disponibilidad del personal técnico, lo que puede afectar el cumplimiento de las frecuencias establecidas.

- Coordinación operativa: Dado que los equipos se encuentran en áreas de uso continuo y clasificadas, es necesario coordinar las intervenciones con el personal encargado del área para evitar afectar la operación.

A pesar de estas limitaciones, el plan ha sido diseñado considerando la realidad operacional del sistema, por lo que su implementación es factible mediante una adecuada planificación y gestión de recursos.

3.7 IMPACTO ESPERADO DE LA PROPUESTA

La implementación del plan de mantenimiento propuesto, busco corregir de manera directa los modos de falla en los cuales se concentraba la mayor criticidad del sistema, los siguientes impactos fueron esperados:

1. Reducción de la frecuencia de fallas

La limpieza más seguida de filtros y serpentines, junto con la regularidad en el ajuste de las correas y los rodamientos, las fallas clasificadas como crónico-agudas podrían disminuirse en aproximadamente un 40%, esto en el número total de fallas anuales en los fan coils. El porcentaje de disminución de fallas fue proyectado considerando que los modos de falla críticos representan un 55% de las fallas en los fan coils. No obstante, debido a que la propuesta no fue implementada y a que no es razonable asumir la eliminación total de dichos modos de falla, se adoptó una reducción proyectada del 40% como escenario conservador para la evaluación de los beneficios potenciales de la propuesta.

2. Disminución del mantenimiento correctivo

En la propuesta se considera estandarizar las tareas y los repuestos, consiguiendo reducir el MTTR, aproximadamente en un 26% de las HH utilizadas en las reparaciones, permitiendo una mejor asignación de los recursos humanos del personal de mantenimiento.

3. Ahorro económico

Al evitar fallas repetitivas como filtros saturados, serpentines sucios, correas cortadas y rodamientos desgastados, se proyecta una baja en los gastos anuales dedicados a mantenimiento correctivo los cuales son los de mayor costos para la Embajada, todo esto según la tendencia de costos en el capítulo 1.

3.8 BENEFICIOS DEL NUEVO PLAN DE MANTENIMIENTO

Con todo lo anteriormente nombrado, se proyecta que este nuevo plan de mantenimiento genere una reducción de los modo de falla y las HH destinadas a mantenimientos correctivos, como consecuencia de esto es esperable de igual manera una reducción de los costos asociados a estas fallas anuales.

Se estima una reducción desde 145 horas a aproximadamente 107 horas anuales, 38 horas que se podrían destinar a otras labores que se habían dejado de lado, como las actualizaciones a otros activos menos críticos, actividades que demandan menos tiempo pero que de igual manera deben que realizarse.

También es importante destacar que, gracias a esta nueva modalidad de intervención preventiva, los equipos podrían estar menos tiempo detenido por lo que se generaría un mejor confort para los integrantes de la comunidad, esto significa un mejor ambiente y una mejor recepción del departamento de mantenimiento.

Realizando un análisis comparativo, considerando el gráfico 2.1 desarrollado en el FMECA del capítulo 2, con esta nueva propuesta se estima disminuir un 40% la frecuencia de fallas anuales para los modos de falla críticos en los fan coils, a continuación, se detalla la variación de los modos de falla crítico en el riesgo cuantitativo de cada uno de ellos:

- Filtro saturado (1.1.4): disminución del riesgo cuantitativo a: \$1.746 [USD/año].
- Controlador sin energía (1.2.1): disminución del riesgo cuantitativo a: \$468 [USD/año].

- Motor quemado (1.2.2): disminución del riesgo cuantitativo a: \$702 [USD/año].
- Rodamiento gripado (2.1.2): disminución del riesgo cuantitativo a: \$660 [USD/año].

A continuación, el gráfico 3.1 donde se realiza la comparación entre el escenario antiguo y el nuevo con el plan de mantenimiento propuesto.

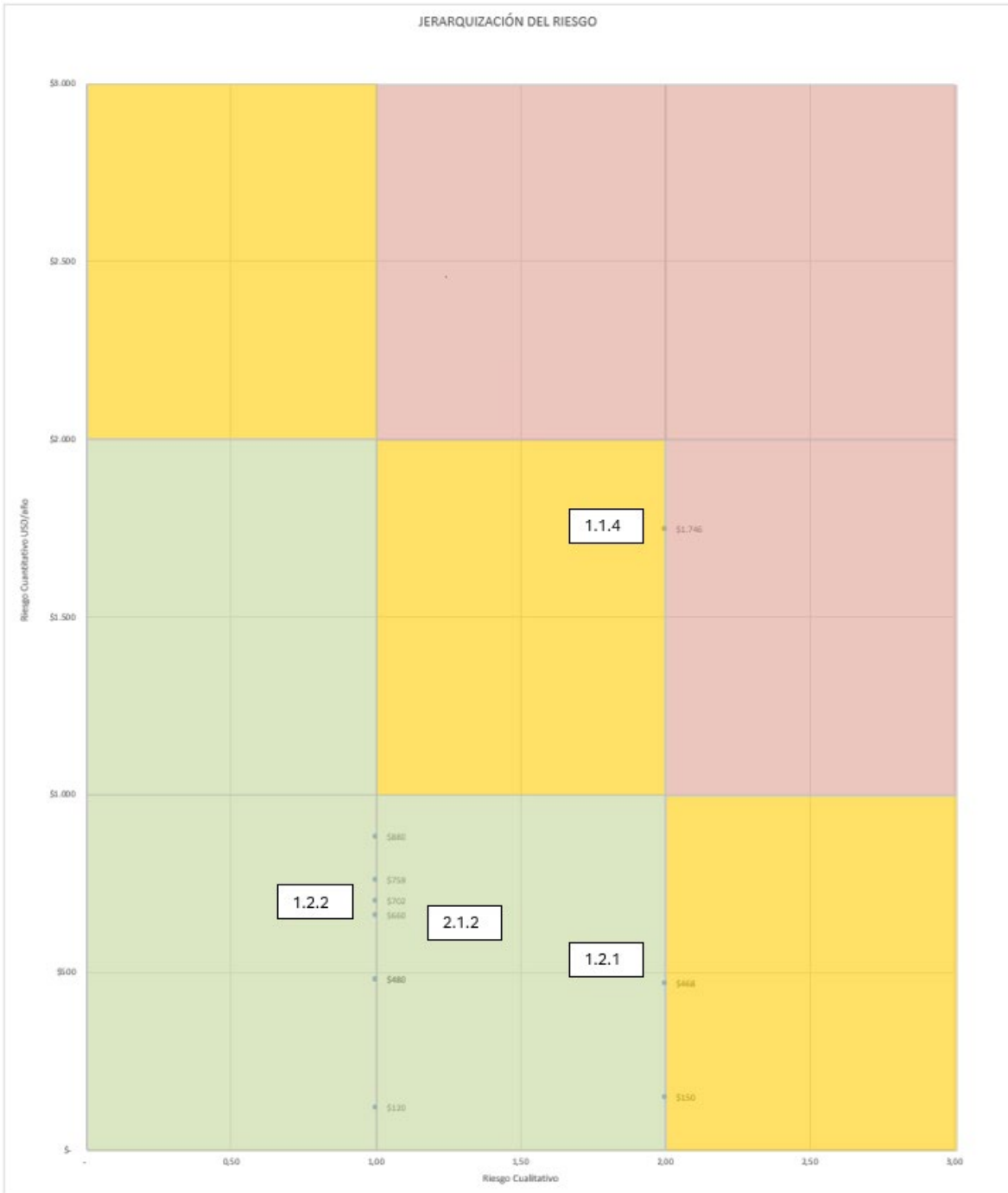


Gráfico 3.1 Matriz de Riesgo Semicuantitativa disminuyendo frecuencia de falla en un 40%.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando esta mejora, se proyecta disminuir el riesgo cuantitativo de los modos de falla críticos de \$5.960 [USD/año] a \$3.036 [USD/año], resultando en una reducción de \$2.924 [USD/año]. Esta disminución representa un impacto directo en los costos asociados al mantenimiento correctivo, respaldando la viabilidad técnica de la implementación del plan de mantenimiento propuesto.

Desde el punto de vista operativo, esta reducción no solo se traduce en un ahorro económico, sino también en una menor necesidad de intervenciones correctivas. Esto permite aumentar la disponibilidad de los equipos y reducir las detenciones no programadas, contribuyendo a mantener condiciones más estables de confort dentro del edificio. A su vez, se genera una menor carga de trabajo para el personal de mantenimiento, permitiendo una mejor organización de sus actividades.

Por otra parte, los recursos liberados producto de la disminución en fallas pueden ser destinados a iniciativas de mejora continua, como la renovación de componentes críticos, la optimización del acceso a los equipos o incluso la incorporación de herramientas de monitoreo que permitan anticipar futuras fallas. En este sentido, el ahorro no solo representa una disminución de costos, sino también una oportunidad para avanzar hacia una gestión de mantenimiento más eficiente.

En conjunto, estos resultados permiten respaldar la viabilidad técnica del enfoque propuesto, demostrando que la intervención directa sobre los modos de falla más relevantes podría mejorar de manera significativa la confiabilidad del sistema de climatización.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo de título, se pudo analizar el comportamiento del sistema de climatización de la Embajada de Estados Unidos en Chile, con el propósito de identificar oportunidades de mejora orientadas a reducir los modos de falla y tiempos de detención de los equipos. A partir del levantamiento realizado fue posible identificar el estado real del sistema en su totalidad, siendo los fan coils aquellos equipos críticos para la Embajada.

En la primera parte del trabajo se elaboró un análisis de criticidad en base a riesgo para priorizar el subsistema más crítico, luego con el apoyo del diagrama de dispersión de Jackknife se obtuvo claramente lo antes mencionado. Los fan coils representan los equipos de mayor impacto en la operación en base a costos, frecuencia y tiempos de detención. Para identificar aquellos modos de falla crítico para los fan coils se elaboró un FMECA orientado a descomponer cada uno de ellos.

Con base a los resultados obtenidos, se elaboró una propuesta de mantenimiento preventivo actualizada, el cual está orientada a disminuir los modos de falla de mayor criticidad. La propuesta integró mantenimientos preventivos, predictivos y tareas de mejora, definiendo la frecuencia ideal, junto con el recurso necesario y los procedimientos estandarizados, todo alineado en base a las buenas prácticas de gestión de activos y la norma ISO 14224.

En términos cuantitativos, durante el periodo de estudio se registraron 34 fallas en el sistema de climatización, de las cuales aproximadamente un 59% correspondieron a los fan coils. El análisis FMECA permitió identificar como modos de falla críticos los filtros de aire saturados, controladores defectuosos, motores quemados y rodamientos gripados, los cuales concentraron una parte significativa de los mantenimientos correctivos realizadas.

A partir de los resultados obtenidos, se estimó que la implementación del plan de mantenimiento propuesto podría reducir la frecuencia de fallas en aproximadamente un 40%, disminuyendo las horas destinadas a mantenimiento correctivo y reduciendo el riesgo cuantitativo desde USD 5.960/año a USD 3.036/año.

Es importante señalar que la propuesta fue desarrollada y evaluada a nivel teórico, por lo que los resultados obtenidos corresponden a proyecciones fundamentadas en los análisis realizados. La implementación y validación operacional del plan de mantenimiento propuesto quedan planteadas como una oportunidad de trabajo futuro para verificar los beneficios estimados en condiciones reales de operación.

En consideración de los resultados, se recomienda la implementación de este plan de mantenimiento preventivo actualizado de manera progresiva, priorizando a los fan coils con mayor historial de fallas, junto con esto efectuar un seguimiento adecuado de los resultados durante los primeros meses para verificar la efectividad de las tareas propuestas y ajustar la frecuencia de ser necesario.

Este nuevo plan de mantenimiento constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar la operación del subsistema de los fan coils dentro del sistema de climatización. Finalmente, se sugiere llevar un registro estructurado de fallas y actividades de mantenimiento de modo que se disponga de información confiable para futuras oportunidades de procesos de mejora continua.

BIBLIOGRAFIA

International Organization for Standardization. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* (ISO 14224). ISO.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2016). *ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment*. ASHRAE.

Carrier Corporation. (2008). *Fundamentals of HVAC Systems*. Carrier Press.

Embajada de Estados Unidos en Chile – Facilities. (2024). *Registro histórico de mantenimiento del sistema HVAC*. Documento interno no publicado.

Embajada de Estados Unidos en Chile – Facilities. (2024). *Plan de mantenimiento vigente del sistema de climatización*. Archivo interno.

Airstack Chillers. (2007). *ASP-30A Modular Chiller – Technical Manual*. Airstack LLC.

Trane. (2012). *Tracer Controls – Operator Guide*. Trane Technologies.

Duque, P. (2025). *Ingeniería en Mantenimiento* [Presentación no publicada]. Universidad Técnica Federico Santa María.

Flores, A. (2024). *Gestión de Activos* [Presentación no publicada]. Universidad Técnica Federico Santa María.

U.S. Department of State. (n.d.). *Embassy of the United States in Santiago, Chile* [Imagen]. <https://cl.usembassy.gov>

ANEXOS

ANEXO A: AMEF

#	Descripción de la Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto Falla	FREC FALLAS	MTRR (LOG-EJEC- PENMARCHA)	IMP. PROD. CLP/Hr	COSTOS DIRECTOS POR FALLA CLP/Hora	IMP SEG IMP AMB	RIESGO CUANTITATIVO CLP/año	RIESGO CUALITATIVO	GRÁFICO		
1	Mantener oficinas en el rango de 20 y 23 °C con un flujo de aire de 50 CFM	11	Equipo no entrega aire frío	1.1.1	Valvula defectuosa mecánicamente	Evidencia: No. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): El flujo de aire se intermite o se intermite. Acción correctiva: Limpiar mecánicamente o cambiar valvula.	3	3	\$	\$	263	C	C	769	CC	100
				1.1.2	Sistema de agua con aire	Evidencia: Si, rotar con la valvula activa. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): Se escuchan ruidos al accionar la valvula, se genera agua. Acción correctiva: Purgar aire del sistema manualmente en rotar valvula por el agua.	1	16	\$	\$	480	C	C	480	CC	100
				1.1.3	Valvula sin energía	Evidencia: No. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): Valvula no se abre cuando se le da energía. Acción correctiva: Verificar conexión de energía y limpiar.	2	6	\$	\$	440	C	C	880	CC	100
				1.1.4	Filtro de aire saturado	Evidencia: No. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): El flujo de aire se intermite. Acción correctiva: Cambio de filtro por uno nuevo.	5	6	\$	\$	582	B	B	290	B	BB
2	Mantener aire renovado en oficinas	12	Equipo no enciende	1.2.1	Controlador sin energía	Evidencia: Si. Alerta SHk/ha. Efecto operacional (ítem a): El equipo no enciende. Acción correctiva: Revisión de cableado y cambio de controlador.	3	4	\$	\$	260	A	C	760	AC	200
				1.2.2	Motor quemado	Evidencia: Si. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): El equipo no enciende, no se ve flujo de aire. Acción correctiva: Reemplazo del motor/cambio por uno nuevo.	2	12	\$	\$	588	B	C	1170	BC	100
				1.2.3	Contacto quemado	Evidencia: No. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): El equipo no enciende, no arranca ventilador. Acción correctiva: Reemplazo de los contactos.	1	2	\$	\$	160	A	C	160	AC	200
				2.1.1	Serpentín Bloqueado	Evidencia: Si, para el invierno. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): El flujo de aire, no es movimiento de aire. Acción correctiva: Limpieza del serpentín, desde ambos lados.	1	3	\$	\$	200	B	C	200	BC	100
				2.1.2	Rodamiento gripado	Evidencia: Si, para el invierno. Alerta SHk/ha Efecto operacional (ítem a): Ventilador no funciona. Acción correctiva: Cambio de rodamiento.	1	28	\$	\$	1000	B	C	1000	BC	100
				2.1.3	Correa cortada	Evidencia: Si, para el invierno. Alerta SHk/ha. Efecto operacional (ítem a): No se ve flujo de aire, ventilador no gira. Acción correctiva: Cambio de correa.	1	8	\$	\$	480	B	C	480	BC	100

ANEXO B: FALLAS REGISTRADAS EN CHILLERS

N° Falla	Equipo	Falla funcional	Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Costo reparación (USD)
1	Santiago #1	Pérdida de capacidad de enfriamiento	Fuga de refrigerante por microfisura en serpentín	10	\$ 2.500
2	Santiago #1	Parada total del compresor	Falla eléctrica en contactor principal	6	\$ 720
3	Santiago #2	Alta presión en descarga	Condensador sucio o con obstrucción parcial	4	\$ 540
4	Santiago #1	Compresor no arranca	Fallo en bobina del contactor	3	\$ 380
5	Santiago #2	Alta presión de descarga	Ventilador quemado	4	\$ 340
6	Santiago #2	Vibración excesiva	Falla en amortiguadores chiller	16	\$ 3.490
MTTR	7,2			43	\$ 7.970

ANEXO C: FALLAS REGISTRADAS EN UMA

N°Falla	Equipo	Falla funcional	Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Costo reparación (USD)
1	UMA 3	Flujo de aire insuficiente	Filtro de aire saturado	2	\$ 200
2	UMA 6	Flujo de aire insuficiente	Filtro de aire saturado	2	\$ 200
3	UMA 5	Vibración excesiva	Base de motor suelta	2	\$ 200
4	UMA 3	No enfría adecuadamente	Serpentín sucio	3	\$ 250
5	UMA 3	Agua derramándose por bandeja	Obstrucción en drenaje de condensado	1	\$ 80
6	UMA 1	Fallo eléctrico	Contacto con bobina quemada	2	\$ 280
7	UMA 2	Nivel de ruido elevado	Rodamiento de cojinete desgastado	4	\$ 470
8	UMA 4	No enfría adecuadamente	Serpentín sucio	3	\$ 250
MTTR	2,4			19	\$ 1.930

ANEXO D: FALLAS REGISTRADAS EN FAN COILS

N°Falla	Equipo	Falla funcional	Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Costo reparación (USD)
1	FC 1	No enfría	Valvula trabada	2	\$ 240
2	FC 8	No enciende	Controlador no enciende	4	\$ 250
3	FC 2	No enfría	Valvula sin energia	6	\$ 540
4	FC 1	No enfría	Aire en el sistema de agua	16	\$ 480
5	FC 2	No enciende	Contacto trabado	2	\$ 150
6	FC 29	No enfría	Filtro sucio	1	\$ 80
7	FC 34	No enciende	Controlador en corte electrico	5	\$ 380
8	FC 6	No enfría	Filtro Saturado	15	\$ 1.200
9	FC 25	Sin flujo de aire	Serpentin bloqueado	3	\$ 200
10	FC 17	No enciende	Motor quemado	16	\$ 570
11	FC 15	No enfría	Valvula trabada	3	\$ 150
12	FC 19	No enfría	Filtro saturado	3	\$ 250
13	FC 19	Sin flujo de aire	Correa cortada	8	\$ 480
14	FC 12	No enfría	Valvula trabada	4	\$ 370
15	FC 12	No enciende	Motor ventilador quemado	8	\$ 600
16	FC 7	No enfría	Filtro saturado	8	\$ 840
17	FC 5	No enfría	Filtro saturado	5	\$ 540
18	FC 26	No hay circulacion de aire	Rodamiento agripado	28	\$ 1.100
19	FC 31	No enciende	Controlador no enciende	2	\$ 150
20	FC 1	No enfría	Valvula sin energia	6	\$ 340
MTTR	7,3			145	\$ 8.910

ANEXO E: DATOS PARA JACKKNIFE

Maquina	Tipo	Cantidad de fallas	Costos de MTTO. Correctivo (USD)
Chillers	A/C	6	\$ 7.970
UMA	A/C	8	\$ 1.930
Fan coils	A/C	20	\$ 8.910
Promedio		11,3	\$ 6.270

ANEXO F: INFORMACIÓN TÉCNICA CHILLER



PACKAGED CHILLER

JOB NAME Santiago Ch.2 ENGINEER _____
 LOCATION _____ ARCHITECT _____
 CUSTOMER _____ CONTRACTOR _____

Multistack Order Number _____ Submitted by _____
 Customer P.O. Number _____ Quote # _____
 Sales Representative _____ Approved by _____ Date: _____

Total Number of Modules: 8.0 (Dimensions Do Not Include J-Boxes)
 Overall Height(in): 77.13/16 Width: 72 Length: 292 Wet Weight: 15200 lbs

CHILLED WATER DESIGN

Master Module ASP-30A (MF) 1
 Slave Front ASP-30A (SF) 2
 Slave Front ASP-__A (SF) 0
 Slave Rear ASP-30A (SR) 2
 Slave Rear ASP-__A (SR) 0

Chilled Water: 0% Glycol
 Entering Temperature 55.0 °F
 Leaving Temperature 45.0 °F
 Flow Rate 370.8 GPM
 Evaporator ΔP 4.9 Feet

AMBIENT AIR TEMPERATURE
 Design: 90.0 °F
 Low: 0.0 °F

FULL LOAD CHILLER PERFORMANCE
 Chiller performance @ 2000 ft above sea level
 Cooling Capacity: 154.5 Tons
 Power Input: 140.7 KW
 EER: 13.2

FREE COOL DESIGN

Free Cool Front ASP-00F (FF) N/A
 Free Cool Rear ASP-00F (FR) N/A

Chilled Water:
 Entering Temp N/A °F
 Leaving Temp N/A °F
 Flow Rate (each) N/A GPM
 Total Flow Rate N/A GPM
 Operating ΔP N/A Feet
 Bypass ΔP N/A Feet

ACCESSORY MODULES

180 Gallon Tank Module(s) ASP-00T 1
 Glycol Feeder Module(s) ASP-00G 0
 Pump Module(s) ASP-00P 1

CHILLER FEATURES

- Stainless Steel Evaporator
- Lead Compressor Sequencing (24hrs)
- Automatic Internal Rescheduling If Fault Occurs
- Automatic Logging Of Any Fault Condition
- Electronic Chilled Water Control
- Multiple Independent Ref. Systems
- Quick Interconnect Modular Design
- Copper Fin/Copper Tube Condenser Coils
- Dual Condenser Fans Per Module Designed For Quiet Operation
- Pressure Controlled 950 RPM Fan Motors
- Filters In Evaporator Supply Headers
- Stainless Steel Inlet Header
- R-407c Refrigerant
- 5 Year Compressor Warranty
- Single Point Power & Lifting Frame
- Cu/Cu Condenser Coils
- Compressor Wrap
- Outdoor Flow Switch & Triple Duty Valve
- Seismic & Vibration Isolation
- Heat Tracing
- Additional 180 Gallon Tank in Tank Module
- Interoperability Web Portal
- (2) Spare Pump Mechanical Seal Kits

ELECTRICAL DATA

MAIN POWER SUPPLY

380 / 50 / 3

FANS: 3.8 FLA per fan motor

ELECTRICAL CIRCUIT(S) CAPACITY

HEAT TRACING CIRCUIT*

CHILLER CIRCUIT

Minimum Circuit Ampacity (amps) 28
 Maximum Fuse Size (amps) 29
 Recommended Dual Element Fuse 30

350
373
400

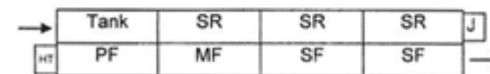
ASP-30A: 23 FLA per compressor
 ASP-00P: 22 FLA per module

*All chillers require completion of at least one of these columns.

** Compressor RLA's are obtained at ARI Conditions

First Letter Second Letter
 M=Master Chiller Module F=Front Module
 S=Slave Chiller Module R=Rear Module
 P=Pump Module
 FC=Free Cool Module
 G=Glycol Feeder Module

CHILLER LAYOUT



*Customer must supply a separate 220/50/1 volt circuit for heat tracing.

IMPORTANT: To assure full equipment design performance, life and reliability, the MULTISTACK chiller must be piped in accordance with Installation Manual unless specifically authorized otherwise by MULTISTACK in writing.

ANEXO G: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S1

Post Santiago
Asset ID 46

Equipment Report

Asset: AIR HANDLER - AHU S-1, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL1220H
 Serial Number: 3XB00468-04
 Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO1

Commission Date: 8/19/1993 In-Service Date: 8/19/1993 Manufacturer Date:

 --- Equipment Technical Details ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	11400.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	Hot Water
Heating Capacity:	221431
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	301534
Control Type:	3 way valve
Coil Type:	Cold water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	B76 x 4 ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	NA
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	10
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	JOHNSON CONTROL INC
Part Number:	VA-7202 & VA-3100
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	LINCOLN ELECTRIC CO.
Model:	K11R180L4
Serial Number:	77286/0172F

ANEXO H: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S2

Post Santiago
Asset ID 1020

Equipment Report

Asset: AIR HANDLER - AHU S-2, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL1280H

Serial Number: 3XB_ _ _

Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO3

Commission Date: 5/25/1993 In-Service Date: 5/25/1993 Manufacturer Date:

 --- Equipment Technical Details ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	14450.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	
Heating Capacity:	0
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	309554
Control Type:	3 Way Valve
Coil Type:	Cold Water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	BX75 x 4ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	N/A
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	10
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	JHONSON CONTROLS
Part Number:	VA-3100
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	LINCOLN ELECTRIC CO.
Model:	G80115
Serial Number:	D0301054657-001R-02

ANEXO I: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S3

Post Santiago
Asset ID 1019

Equipment Report

Asset: AIR HANDLER - AHU S-3, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL237DH

Serial Number: 3XC00001-04

Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO1

Commission Date: 5/25/1993 In-Service Date: 5/25/1993 Manufacturer Date:

 --- Equipment Technical Details ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	16965.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	
Heating Capacity:	0
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	314531
Control Type:	3 way valve
Coil Type:	Cold Water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	B76 x 4 ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	NA
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	10
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	JOHNSON CONTROL INC
Part Number:	VA-3100
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	LINCOLN ELECTRIC CO.
Model:	G80115
Serial Number:	D0301054657-001R-01

ANEXO J: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S4**Post** Santiago**Asset ID** 243**Equipment Report**

Asset: AIR HANDLER - AHU S-4, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL114DV

Serial Number: 3XB00465-04

Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO3

Commission Date: 5/25/1993

In-Service Date: 5/25/1993

Manufacturer Date:

--- *Equipment Technical Details* ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	6534.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	Hot Water
Heating Capacity:	116975
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	169655
Control Type:	3 way valve
Coil Type:	Cold Water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	B71 x 4 ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	NA
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	6
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	JOHNSON CONTRLOS,INC
Part Number:	VA-7202 & VA7202
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	WEG
Model:	w21 cc029a
Serial Number:	30set05 bt52153

ANEXO K: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S5

Post Santiago
 Asset ID 1021

Equipment Report

Asset: AIR HANDLER - AHU S-5, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL111CH
 Serial Number: 3XPO1361-06
 Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO3

Commission Date: 5/25/1993 In-Service Date: 5/25/1993 Manufacturer Date:

 --- Equipment Technical Details ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	4900.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	Hot Water
Heating Capacity:	189483
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	112528
Control Type:	3 way valve
Coil Type:	Cold water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	B71 x 4 ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	NA
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	6
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	JOHNSON CONTRLOS,INC
Part Number:	VA-7202 & VA-7202
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	WEG
Model:	w21 cc029a
Serial Number:	040ut05 bt55538

ANEXO L: INFORMACIÓN TÉCNICA UMA S6

Post Santiago
Asset ID 242

Equipment Report

Asset: AIR HANDLER - AHU S-6, Manufacturer: MCQUAY/SNYDER GENERAL, Model: LSL1140H
 Serial Number: 3XB00457-04
 Location: (18019) CHANCERY, Floor: Unknown, Space: RO1

Commission Date: 5/25/1993 In-Service Date: 5/25/1993 Manufacturer Date:

 --- Equipment Technical Details ---

Section - General Details	
Type:	Forced
Air Flow:	6786.00
Air Flow Metric:	CFM
Drive Type:	Belt
Heating Type:	Hot Water
Heating Capacity:	6786
Cooling Medium:	Coil
Cooling:	6786
Control Type:	3 way valve
Coil Type:	Cold water
Section - Belt	
Manufacturer:	N/A
Part Number:	B71 x 4 ea
Section - Filter	
Type:	Particulate
Manufacturer:	NA
Part Number:	Bag Filter 95% Efficiency
Quantity:	6
Section - Actuator	
Type:	Electric
Manufacturer:	LANDIS & STAFA
Part Number:	M3P40G & M3P15G
Section - Humidifier	
Manufacturer:	
Part Number:	
Section - Motor	
Manufacturer:	WEG
Model:	w21cc029a
Serial Number:	050ut05 bt57525

ANEXO M: PLANILLA MANTENIMIENTO MENSUAL

Mantenimiento Mensual

Tipo de activo: FAN COIL
Descripción: FAN COIL
Código: FC-MEN
Frecuencia: Mensual
Tiempo estimado (horas): 1

Herramientas (T), Elementos de Seguridad (S) y Materiales (M)

1. Juego de herramientas mecánicas (T)
2. Materiales y equipos de limpieza (M)
3. Filtros de repuesto (M)
4. Aspiradora industrial o soplador (T)
5. Elementos de bloqueo y etiquetado LOTO (S)
6. Guantes, lentes de seguridad y casco (S)

Instrucciones de Seguridad

1. Desenergizar completamente el equipo, aplicar bloqueo y etiquetado del circuito eléctrico. PELIGRO: verificar ausencia de tensión antes de iniciar cualquier intervención.
2. Cumplir estrictamente los procedimientos de seguridad del sitio y las instrucciones entregadas por el supervisor.
3. Utilizar en todo momento los elementos de protección personal requeridos para la tarea.
4. Registrar y reportar inmediatamente cualquier daño, condición insegura o desviación detectada durante la actividad.
5. Registrar todos los resultados de la intervención en el historial de mantenimiento del equipo.
6. Revisar previamente las instrucciones de operación y mantenimiento entregadas por el fabricante.
7. Asegurar que todos los ensayos y verificaciones se realicen conforme a los valores y tolerancias especificadas por el fabricante.

Procedimiento de Mantenimiento

1. Inspeccionar visualmente el estado general de la unidad, verificando ausencia de ruidos, vibraciones o fugas.
2. Retirar los filtros de aire del equipo de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
3. Limpiar y lavar filtros reutilizables mediante aspirado o lavado con agua y detergente neutro.
4. Verificar la correcta reinstalación y fijación de los filtros.
5. Dejar registro del estado general del equipo y de los filtros inspeccionados.

ANEXO N: PLANILLA MANTENIMIENTO TRIMESTRAL

Mantenimiento Trimestral

Tipo de activo: FAN COIL
Descripción: FAN COIL
Código: FC-TRI
Frecuencia: Trimestral
Tiempo estimado (horas): 2

Herramientas (T), Elementos de Seguridad (S) y Materiales (M)

1. Juego de herramientas mecánicas (T)
2. Materiales y equipos de limpieza (M)
3. Filtros de repuesto (M)
4. Aspiradora industrial o soplador (T)
5. Elementos de bloqueo y etiquetado LOTO (S)
6. Guantes, lentes de seguridad y casco (S)

Instrucciones de Seguridad

1. Desenergizar completamente el equipo, aplicar bloqueo y etiquetado del circuito eléctrico. PELIGRO: verificar ausencia de tensión antes de iniciar cualquier intervención.
2. Cumplir estrictamente los procedimientos de seguridad del sitio y las instrucciones entregadas por el supervisor.
3. Utilizar en todo momento los elementos de protección personal requeridos para la tarea.
4. Registrar y reportar inmediatamente cualquier daño, condición insegura o desviación detectada durante la actividad.
5. Registrar todos los resultados de la intervención en el historial de mantenimiento del equipo.
6. Revisar previamente las instrucciones de operación y mantenimiento entregadas por el fabricante.
7. Asegurar que todos los ensayos y verificaciones se realicen conforme a los valores y tolerancias especificadas por el fabricante.

Procedimiento de Mantenimiento

1. Inspeccionar la unidad verificando ruidos, vibraciones y condiciones anormales durante la operación.
2. Retirar, limpiar y/o reemplazar los filtros de aire según su condición.
3. Verificar funcionamiento de termostato.
4. Realizar la limpieza de la bandeja de condensado utilizando productos recomendados por el fabricante.
5. Realizar limpieza superficial del serpentín mediante aspirado o soplado, evitando dañar las aletas.
6. Revisar condición, alineación y tensión de correas en V; ajustar o reemplazar si es necesario.
7. Inspeccionar visualmente el ventilador y rodamientos, verificando ausencia de juego excesivo o ruido.
8. Verificar estado general del motor eléctrico, conexiones visibles y fijaciones.
9. Registrar todas las observaciones y acciones realizadas.

ANEXO O: PLANILLA MANTENIMIENTO SEMESTRAL

Mantenimiento semestral

Tipo de activo: UNIDAD FAN COIL

Descripción: UNIDAD FAN COIL

Código: FC-SEM

Frecuencia: Semestral

Tiempo estimado (horas): 3

Herramientas (T), Elementos de Seguridad (S) y Materiales (M)

1. Juego de herramientas mecánicas (T)
2. Materiales y equipos de limpieza (M)
3. Grasea (T)
4. Filtros de repuesto (M)
5. Aspiradora industrial o soplador (T)
6. Elementos de bloqueo y etiquetado LOTO (S)
7. Guantes, lentes de seguridad y casco (S)

Instrucciones de Seguridad

1. Desenergizar completamente el equipo, aplicar bloqueo y etiquetado del circuito eléctrico. PELIGRO: verificar ausencia de tensión antes de iniciar cualquier intervención.
2. Cumplir estrictamente los procedimientos de seguridad del sitio y las instrucciones entregadas por el supervisor.
3. Utilizar en todo momento los elementos de protección personal requeridos para la tarea.
4. Registrar y reportar inmediatamente cualquier daño, condición insegura o desviación detectada durante la actividad.
5. Registrar todos los resultados de la intervención en el historial de mantenimiento del equipo.
6. Revisar previamente las instrucciones de operación y mantenimiento entregadas por el fabricante.
7. Asegurar que todos los ensayos y verificaciones se realicen conforme a los valores y tolerancias especificadas por el fabricante.

Procedimiento de Mantenimiento

1. Realizar inspección general del equipo en operación, verificando condiciones mecánicas y acústicas, además del termostato.
2. Ejecutar limpieza profunda del serpentín y bandeja de condensado utilizando productos compatibles y protegiendo componentes eléctricos.
3. Revisar, ajustar y alinear correas y poleas según especificaciones del fabricante.
4. Lubricar rodamientos del eje del ventilador, cuando aplique, utilizando el lubricante recomendado.
5. Revisar condiciones eléctricas del motor, verificando consumo, temperatura y estado de aislamiento.
6. Inspeccionar válvulas, líneas de agua y drenajes, corrigiendo fugas o bloqueos detectados.
7. Retirar, limpiar y/o reemplazar los filtros de aire según su condición.
8. Abrir válvula manual de purga para eliminar aire atrapado en el serpentín.
9. Limpiar el área de trabajo, retirar residuos y dejar el equipo en condiciones operativas.
10. Retirar bloqueo y etiquetado, energizar el equipo y verificar su correcto funcionamiento.
11. Registrar la intervención completa en el historial de mantenimiento.