

PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CENTRADO EN CONFIABILIDAD AL
EQUIPO DE REFRIGERACION POR ABSORCION-DIFUSION A PARTIR DE
ENERGIA SOLAR TERMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE
BOGOTA

CRISTIAN AGUIRRE MARTINEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2021

PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CENTRADO EN CONFIABILIDAD AL
EQUIPO DE REFRIGERACION POR ABSORCION-DIFUSION A PARTIR DE
ENERGIA SOLAR TERMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE
BOGOTA

CRISTIAN AGUIRRE MARTINEZ

Trabajo de grado para optar título de Especialista en Gerencia de mantenimiento

Director:

MSc. Ing. YAMID GONZALO REYES FLOREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2021

AGRADECIMIENTOS

Especialmente quiero agradecer a Dios por permitirme culminar este objetivo en mi vida profesional y por rodearme de mi familia en todo el desarrollo del proyecto, que, gracias a él, me rodearon siempre de su gran cariño.

A los posgrados en Gerencia de Mantenimiento junto al cuerpo docente por habernos brindado todo el aprendizaje adquirido reflejado en este proyecto, que gracias a las herramientas adquiridas se logró culminar a cabalidad los objetivos de esta investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS.....	12
1.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. MARCO REFERENCIAL	13
2.1. BREVE HISTORIA DEL MANTENIMIENTO	13
2.2. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN - DIFUSIÓN.....	15
2.3. ANÁLISIS CAUSA RAIZ	17
3. METODOLOGIA	19
3.1. BILL OF MATERIALS (BOM).....	19
3.2. ANALISIS RCM DEL SISTEMA	21
3.3. PROBABILIDAD DE FALLA DEL SISTEMA EN SU OPERACIÓN.....	24
3.4.1. Sub-sistema 1, carro plataforma:	27
3.4.2. Sub-sistema 2, concentrador solar:	30
3.4.3. Sub-sistema 3, sistema de intercambio de calor:.....	33
3.4.4. Sub-sistema 4, unidad de refrigeración:	38
3.4.5. Sub-sistema 5, cámara frigorífica:	40
4. CONCLUSIONES	43
4.1. PROPUESTA GENERAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	43
4.2. PROPUESTA DE REDISEÑO	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. BREVE HISTORIA DEL MANTENIMIENTO.....	13
FIGURA 2. BENEFICIOS RCM PROPUESTOS.....	15
FIGURA 3. DIAGRAMA CAUSA - RAÍZ DE LA MÁQUINA.....	17
FIGURA 4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DEFINICIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CENTRO EN CONFIABILIDAD RCM.....	19
FIGURA 5. BILL OF MATERIAL DEL SISTEMA ANALIZADO.....	19
FIGURA 6. CLASIFICACIÓN GENERAL DE SUB-SISTEMAS.....	21
FIGURA 7. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DAR SIENDO UTILIZADO EN PRUEBAS POR INVESTIGADORES.....	23
FIGURA 8. GRAFICA DE PROBABILIDAD DE FALLA EN LOS SUB-SISTEMAS.....	25
FIGURA 9. SUB-SISTEMA 1.....	27
FIGURA 10. SUB-SISTEMA 2.....	30
FIGURA 11. SUB-SISTEMA 3.....	33
FIGURA 12. SUB-SISTEMA 4.....	38
FIGURA 13. SUB-SISTEMA 5.....	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. PROBABILIDAD DE FALLA TOTAL POR SUB-SISTEMA.....	25
TABLA 2. COMPONENTES SUB-SISTEMA 1.....	28
TABLA 3. ANÁLISIS DE FALLAS SUB-SISTEMA 1	29
TABLA 4. RUTINA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA PARA SUB-SISTEMA 1.	29
TABLA 5. COMPONENTES SUB-SISTEMA 2.....	30
TABLA 6. ANÁLISIS DE FALLAS SUB-SISTEMA 2	31
TABLA 7. RUTINA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA PARA SUB-SISTEMA 2	32
TABLA 8. COMPONENTES SUB-SISTEMA 3.....	33
TABLA 9. ANÁLISIS DE FALLAS SUB-SISTEMA 3	35
TABLA 10. RUTINA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA PARA SUB-SISTEMA 3.	37
TABLA 11. COMPONENTES SUB-SISTEMA 4.....	39
TABLA 12. ANÁLISIS DE FALLAS SUB-SISTEMA 4	39
TABLA 13. RUTINA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA PARA SUB-SISTEMA 4.	39
TABLA 14. COMPONENTES SUB-SISTEMA 5.....	40
TABLA 15. ANÁLISIS DE FALLAS SUB-SISTEMA 5	41
TABLA 16. RUTINA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA PARA SUB-SISTEMA 5.	42
TABLA 17. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PROPUESTO POR EL AUTOR.....	43

LISTA DE ANEXOS

**(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la Base de datos de la
Biblioteca UIS)**

ANEXO 1. PLANOS SISTEMA

ANEXO 2. MODELO 3D SISTEMA

ANEXO 3. BOM

RESUMEN

TÍTULO: DEFINIR UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CENTRADO EN CONFIABILIDAD AL EQUIPO DE REFRIGERACION POR ABSORCION-DIFUSION A PARTIR DE ENERGIA SOLAR TERMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE BOGOTA

AUTOR: CRISTIAN AGUIRRE MARTINEZ

PALABRAS CLAVE: mantenimiento preventivo, mantenimiento centrado en confiabilidad, sistema de refrigeración por absorción-difusión; energía solar térmica

DESCRIPCIÓN: Se realizó un análisis de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM (por sus siglas en inglés) para determinar el plan general de mantenimiento preventivo; donde analizó el equipo de laboratorio de refrigeración por absorción-difusión a partir de energía solar térmica de la universidad Santo Tomás construido en el año 2019, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la maquina durante su vida útil de aproximadamente 30 años. Se inicio desde un despiece de la maquina por medio de bill of materials de 4 niveles para realizar un análisis de criticidad de los sub-sistemas y componentes del equipo a partir de discriminar la maquina a partir de las funciones que realiza desde el inicio de la absorción de luz solar hasta el fin del proceso de refrigeración; donde se encontró que los sub-sistemas más críticos por frecuencia de falla son el concentrador solar y el intercambiador de calor auto circulante (patente autor: CO2019005328A1); por otra, parte los componentes más críticos son el tubo de vacío solar, la válvula de alivio y el líquido de transferencia de calor. Posteriormente se analizó cada componente viendo factores de falla como detectabilidad, severidad y ocurrencia. Como resultado, se propuso un plan de mantenimiento preventivo con frecuencia anual, cada 5 años y cada 15 años para esta máquina prototipo.

ABSTRACT

TITLE: DEFINE A PREVENTIVE MAINTENANCE PLAN FOCUSED ON RELIABILITY OF THE REFRIGERATION EQUIPMENT BY ABSORPTION-DIFFUSION FROM SOLAR THERMAL ENERGY FROM SANTO TOMAS UNIVERSITY OF BOGOTA

AUTHOR: CRISTIAN AGUIRRE MARTINEZ

KEY WORDS: preventive maintenance, reliability-focused maintenance, absorption-diffusion cooling system; Thermal solar energy

DESCRIPTION: An RCM Reliability Focused Maintenance Analysis (for its acronym in English) was performed to determine the overall preventive maintenance plan; where he analyzed the absorption-diffusion refrigeration laboratory equipment from Santo Tomás University, built in 2019, in order to guarantee the correct operation of the machine during its useful life of approximately 30 years. It started from an exploded view of the machine by means of 4-level bill of materials to carry out a criticality analysis of the sub-systems and components of the equipment from discriminating the machine from the functions it performs from the beginning of the absorption of sunlight until the end of the cooling process; where it was found that the most critical sub-systems due to failure frequency are the solar concentrator and the self-circulating heat exchanger (author patent: CO2019005328A1); On the other hand, the most critical components are the solar vacuum tube, the relief valve and the heat transfer liquid. Subsequently, each component was analyzed looking at failure factors such as detectability, severity and occurrence. As a result, a preventive maintenance plan was proposed with annual frequency, every 5 years and every 15 years for this prototype machine.

3.

4. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración son una de las aplicaciones en el campo de la ingeniería mecánica con mayor aplicación industrial en Colombia, en su gran mayoría, la refrigeración corresponde a los sistemas por compresión de vapor y estos dependen de energía eléctrica para realizar su ciclo de trabajo. Sin embargo, para este objeto de investigación, se trabajará con un equipo de refrigeración por absorción, que funciona a partir de energía térmica para comprimir el refrigerante y así, el equipo de absorción pueda ser funcional y obtener las bajas de temperaturas deseadas al igual que un sistema de refrigeración convencional para aplicaciones que requieran temperaturas de preservación de entre 0-12°C como alimentos o algunas vacunas.

El equipo de refrigeración por absorción-difusión a partir de energía solar térmica, que fue co-diseñado y fabricado por el autor como tesis de ingeniería mecánica en la Universidad Santo Tomas, sede Bogotá [1], el cual carece de un plan de mantenimiento actual. Este equipo es un prototipo de tipo académico, por lo cual su principal función es realizar prácticas de laboratorio en áreas relacionadas a la termodinámica, transferencia de calor y ciclos termodinámicos para la recolección de datos que permitan entender y desarrollar esta máquina.

Adicionalmente, el plan de mantenimiento es necesario ya que no existe y cobra especial importancia ya que el equipo obtuvo la aprobación de la patente CO2019005328A1 a principios de 2021, por lo cual la universidad lo utilizara mucho más para seguir el proceso de investigación y desarrollo de la tecnología. De tal manera, se propone implementar un plan de mantenimiento el cual pueda ser ejecutado antes y después de puesta en marcha el equipo de esta refrigeración. Por este motivo se propone definir un plan de mantenimiento preventivo centrado en

confiabilidad RCM (por sus siglas en inglés, *Reliability Centred Maintenance*) al equipo de refrigeración por absorción - difusión a partir de energía solar térmica de la Universidad Santo tomas de Bogotá.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Definir un plan de mantenimiento preventivo centrado en confiabilidad RCM al equipo de refrigeración por absorción difusión a partir de energía solar térmica de la universidad Santo Tomas de Bogotá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un BOM (por sus siglas en inglés, *Bill of Materials*) del equipo de refrigeración por absorción – difusión a partir de energía solar térmica.
- Elaborar un análisis de mantenimiento basado en confiabilidad RCM para el equipo de refrigeración por absorción – difusión a partir de energía solar térmica.
- Determinar el plan de mantenimiento preventivo y sus costos asociados para el equipo de refrigeración por absorción – difusión a partir de energía solar térmica.

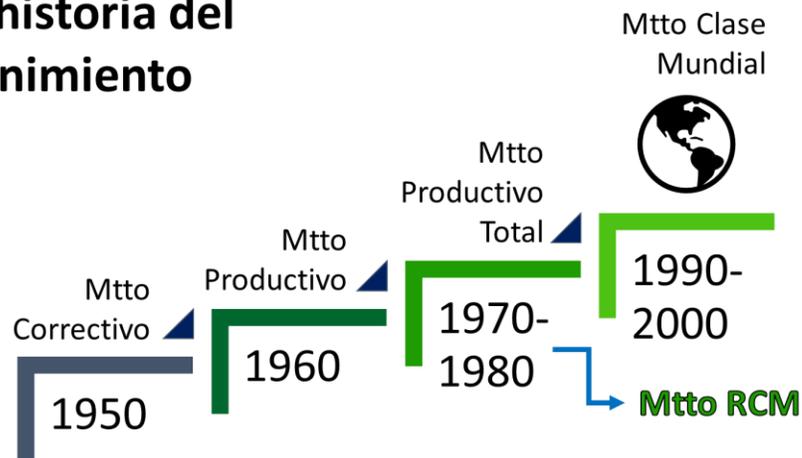
2. MARCO REFERENCIAL

2.1 BREVE HISTORIA DEL MANTENIMIENTO

El mantenimiento industrial a lo largo del tiempo, siempre se ha fijado en la necesidad de mantener sus equipos, herramientas o aparatos. A finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX con la revolución industrial, surgió la necesidad de realizar las primeras reparaciones, donde se logró establecer el término de falla y, por ende, se generó la necesidad de controlar estas fallas que posiblemente incurrirían en paradas de planta o producción. Como pioneros del mantenimiento industrial cabe mencionar la participación de la compañía Ford Motor Company, la cual fue considerada el padre de las cadenas de producción modernas utilizadas para la producción en masa (Nueva Gestión Informática, 2020; Sanchez, 2019).

Figura 1. Breve historia del mantenimiento.

Breve historia del mantenimiento



Fuente: Adaptada por el autor (Nueva Gestión Informática, 2020).

El mantenimiento preventivo a concepto de recomendaciones de fabricantes nace en los 50's, con la finalidad de alargar la vida útil de los equipos. En la época de los 70's y 80's nace el concepto de calidad total, enfocando en filosofías netamente gerenciales de calidad y círculos de calidad, lo cual es llamado Mantenimiento

Productivo Total que se basa en cinco etapas fundamentales, que lo son: **Incrementar la confiabilidad** disminuyendo fallas, Mantenimiento autónomo, prevención del Mantenimiento, Capacitación del personal como mantenedores con múltiples labores y trabajo arduo en equipo basado en la búsqueda de la causa raíz de las fallas en los activos. En la década de los 90's, el "Mantenimiento Clase Mundial" hacía referencia a la filosofía que agrupo una serie de tendencias desde el mantenimiento productivo total, pasando por mantenimiento centrado en confiabilidad y finalmente por conceptos de gerencia o gestión del riesgo (Nueva Gestión Informática, 2020).

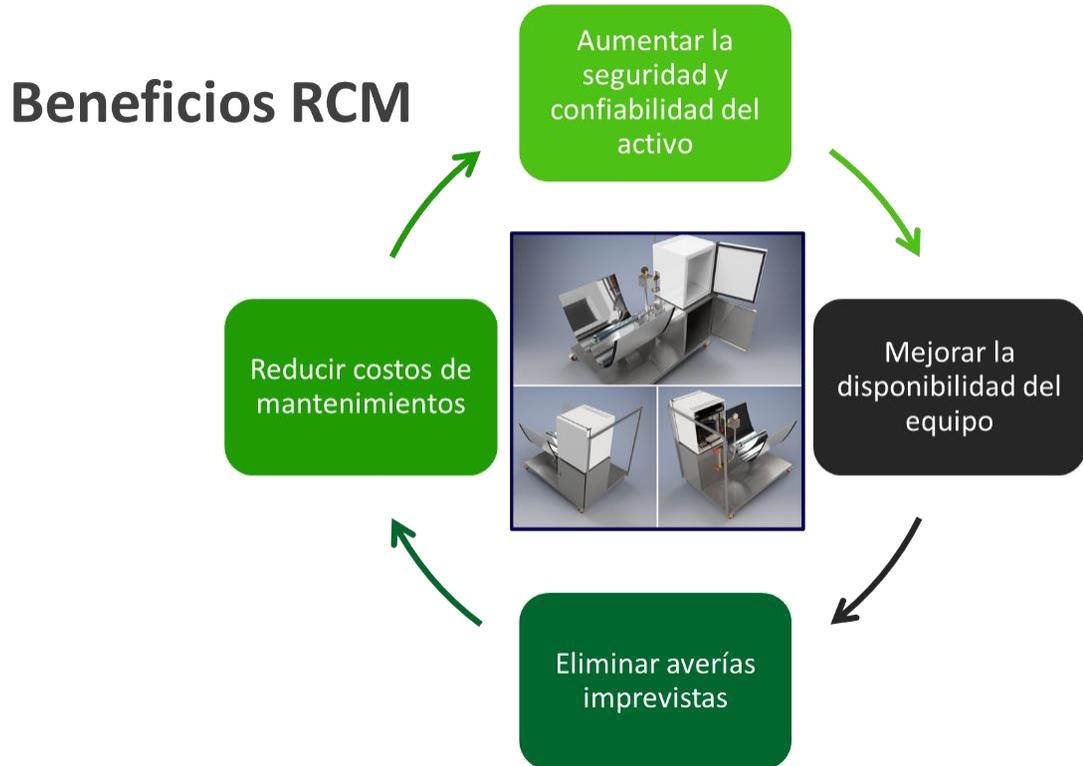
- Mantenimiento basado en confiabilidad. La reducción de la probabilidad de falla de los activos es lo que se desea alcanzar diariamente tras las aplicaciones de RCM en los diferentes equipos o maquinas actuales. Los objetivos del mantenimiento son relacionados directamente por las funciones y expectativas que se desean con el activo o sus componentes funcionales (Rivera Rubio, 2011).

La finalidad de implementar el plan de mantenimiento preventivo consiste en garantizar la disponibilidad del equipo antes de que ocurra una falla, esta sea corregida de manera oportuna, teniendo en cuenta las condiciones mecánicas de los componentes funcionales del equipo (Valderrama, 2021). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es posible evidenciar el equipo de refrigeración en cuestión, con sus componentes claramente identificados, en el planteamiento del problema, se puede visualizar cada uno de los componentes funcionales que corresponde.

Dado la carencia de un plan de mantenimiento al equipo anteriormente mencionado, cabe la importancia de una implementación o plan de mantenimiento aplicado en metodologías de RCM para cada uno de los componentes descritos, satisfaciendo a cabalidad el uso de dicho equipo de refrigeración funcional sin conllevar a fallas

no tenidas en cuenta que afecten el funcionamiento bien sea por cualquier modo de falla, los beneficios se detallan en la **Figura 2**.

Figura 2. Beneficios RCM propuestos.



A partir del diagnóstico a realizar a cada uno de los componentes funcionales del equipo de refrigeración, se tiene por objeto determinar los costos de la implementación del plan de mantenimiento aplicado, teniendo así una idea económica para la manutención y funcionalidad de este (Campos, Tolentino, Toledo, & Tolentino, 2018; Mora Gutiérrez, 2005; Valderrama, 2021).

2.2 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN - DIFUSIÓN

Los sistemas de refrigeración por absorción –SRA- tienen producciones frigoríficas muy elevadas (mayores a 100 kW), por lo cual buscando la forma de hacer más pequeñas estas máquinas, y además de eliminar su único componente mecánico

(la bomba) a fin de equipar refrigeradores de pequeña capacidad (10 L - 200 L) los ingenieros suecos Platen y Munters en 1928 inventaron un sistema el cual llamaron sistema de refrigeración por absorción difusión DAR (Diffusion Absorption Refrigeration, por sus siglas en inglés) (Jakob, 2005). El primer prototipo comercial DAR fue lanzado en el mercado por la compañía Electrolux en Suecia y desde entonces millones de refrigeradores han sido construidos y puestos en venta para la conservación de productos a bajas temperaturas (Best & Rivera, 2015).

El principio de la refrigeración por absorción corresponde en su gran mayoría a equipos cuyas capacidades de carga frigorífica bajas, donde la mayoría de los sistemas son de tipo doméstico. La refrigeración es una necesidad para todos los hogares en la actualidad la mayoría de neveras funciona con energía eléctrica por medio de un ciclo de compresión de vapor de un gas refrigerante debido a esto en las zonas no interconectadas (ZNI) a la red eléctrica, donde viven alrededor de 1.5 millones de personas, muchas veces se prescinde de tener refrigeradores, ya que también estas máquinas son las que representan mayor consumo en la matriz energética de Colombia con alrededor de 30%. (IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas), s/f).

Este sistema de refrigeración de 30L que funciona a partir de un ciclo termodinámico de absorción-difusión (DAR) que requiere de una fuente de calor de 22W para operar la cual es suministrada a partir de un concentrador solar cilindro parabólico compuesto (CPC). El refrigerador construido opera entre 8-14°C, con un COP de 0.02, y adicionalmente la fuente de calor que alcanza los 200°C (Caro, Aguirre, & Malagón, 2019).

- Sistemas de refrigeración a partir de energía solar térmica. Una de las principales fuentes de calor que tenemos a partir de la creación ha sido la radiación solar, está como fuente primaria, no se agota, no contamina y es totalmente distribuida en el planeta tierra. Los captadores solares o

concentradores solares, corresponden a equipos que a través de su tecnología obtienen energía térmica a partir de la radiación. La energía solar térmica puede ser utilizada con el fin de impulsar sistemas de refrigeración por absorción difusión (Ayadi, Aprile, & Motta, 2012; Best & Rivera, 2015).

2.3 ANÁLISIS CAUSA RAIZ

Esta metodología es aplicada con la idea de identificar desde la raíz consecuente física, humana o latente que originan las fallas. El objetivo principal es generar acciones para eliminar o prevenir la recurrencia de las fallas, teniendo en cuenta los beneficios como reducción de gastos o perdidas de producción asociados directa o indirectamente a las fallas (Garcia, 2016; Rivera Rubio, 2011). A continuación, se muestra un análisis de las causas que pueden ocasionar que la maquina no opere con normalidad, lo cual se requiere para tomar datos de laboratorio exactos.

Figura 3. Diagrama causa - raíz de la máquina.

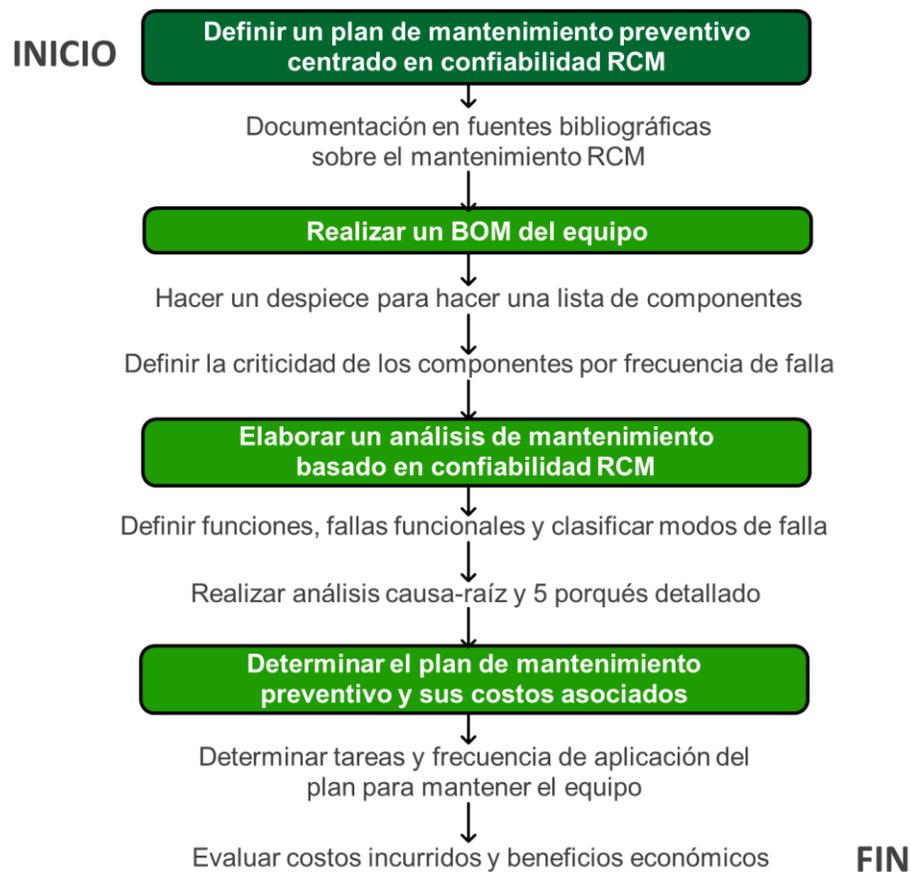


La finalidad del diagrama anterior es lograr mediante la estructura de espinas de pescado de las fallas, las cuales se pueden estandarizar o categorizar en subcategorías como: diseño, instalación, operación, materiales, etc. A partir del análisis anterior, se evalúa también el costo riesgo beneficio, el cual permite comparar el costo asociado relacionados con las actividades dirigidas al incremento de la confiabilidad del equipo, reemplazo, rediseño de elementos que requieran, rehabilitación o actualización de tecnología; todos estos aspectos se evalúan contra el nivel de reducción de riesgo o posibles mejoras para una acción correctiva (García, 2016).

3. METODOLOGIA

A continuación, se plantea una serie de actividades las cuales desarrollan paso a paso los objetivos específicos como finalidad de esta investigación. Los tiempos de desarrollo de estas, se evidencian posteriormente en el cronograma de actividades, donde se estima cada una de estas actividades en orden (Martínez, 2018; Rivera Rubio, 2011; Valderrama, 2021).

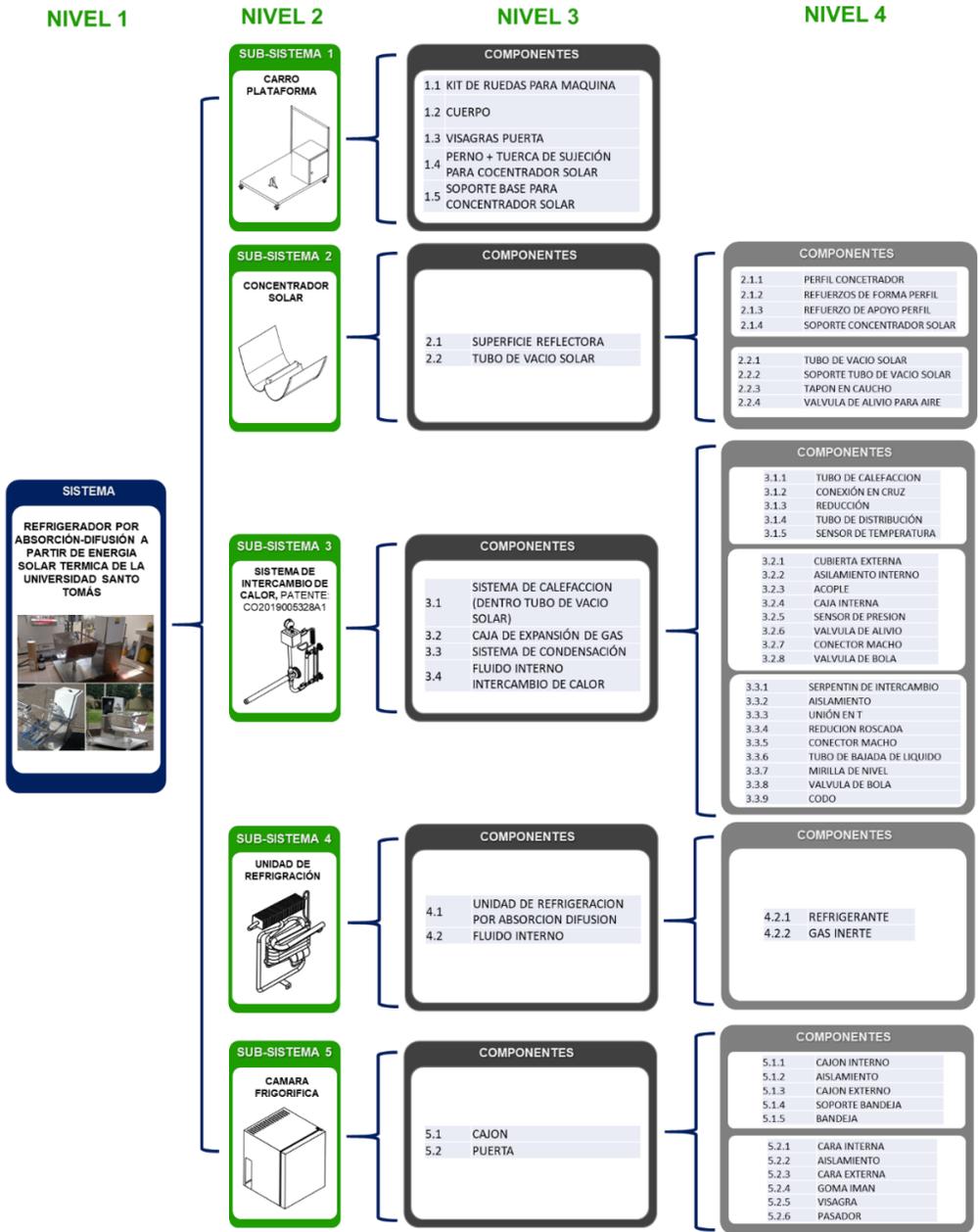
Figura 4. Metodología propuesta para la definición de un plan de mantenimiento preventivo centro en confiabilidad RCM.



3.1 BILL OF MATERIALS (BOM)

Figura 5. Bill of material del sistema analizado.

BOM



Para realizar el análisis de RCM primero se hace un primero que se hace un despiece por funciones implícitas dentro de la máquina para poder determinar la criticidad de los componentes necesarios para fabricar el equipo bajo análisis (Mecalux, 2020).

3.2 ANALISIS RCM DEL SISTEMA

El objetivo de este análisis es establecer un plan de mantenimiento a partir de un estudio del sistema para ver la frecuencia de falla de los componentes, las causas de las fallas de los componentes y la medida técnica necesaria para evitar una falla que ponga a reducir el nivel de servicio del equipo; para esto, el análisis tendrá en cuenta la criticidad de los componentes en el funcionamiento de la falla con el fin de enfocarse en los planes de mantenimiento para estos componentes (Romero, Arias, & Sarmiento, 2012). Para empezar, se ha categorizado la maquina en 5 subsistemas principales que cumplen una función en el todo, como se muestra en la **Figura 5**.

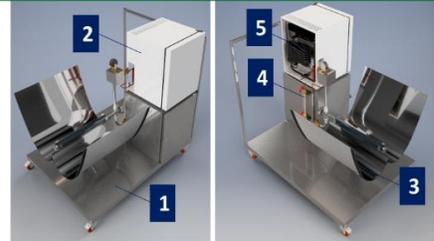
El sistema analizado es un prototipo de laboratorio desarrollado para evaluar una nueva tecnología de refrigeración doméstica, esto presentó un reto para este análisis ya que una maquina prototipo aún tiene muchas deficiencias en su diseño. Adicionalmente, su principal uso es hacer pruebas de laboratorio en la intemperie para lo cual se desplaza mediante el **carro plataforma** (sub-sistema 1) ya que funciona con energía solar térmica la cual obtiene a partir de un **concentrador solar** (sub-sistema 2) y transporta esta energía mediante un **intercambiador de calor** (sub-sistema 3) para llegar a la **unidad de refrigeración** (sub-sistema 4) la cual enfría el espacio dentro de la **cámara frigorífica** (sub-sistema 5).

Figura 6. Clasificación general de sub-sistemas

CASO DE ESTUDIO

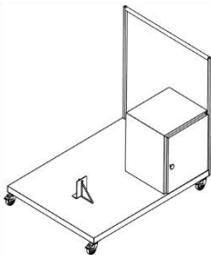
SISTEMA

REFRIGERADOR POR ABSORCIÓN-DIFUSIÓN A PARTIR DE ENERGIA SOLAR TERMICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS



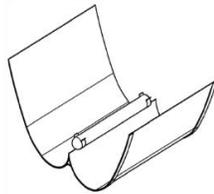
SUB-SISTEMA 1

CARRO PLATAFORMA



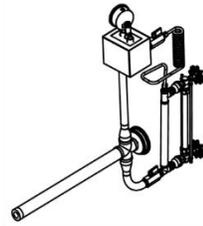
SUB-SISTEMA 2

CONCENTRADOR SOLAR



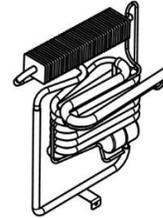
SUB-SISTEMA 3

SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR, PATENTE: CO2019005328A1



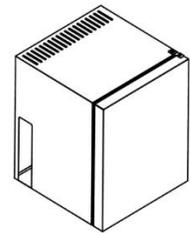
SUB-SISTEMA 4

UNIDAD DE REFRIGERACIÓN



SUB-SISTEMA 5

CAMARA FRIGORIFICA



La necesidad de un plan de mantenimiento se da que el sistema no cuenta con un plan de mantenimiento definido a la fecha, el cual es muy necesario para esta máquina ya que es un equipo que se requiere para hacer pruebas de laboratorio donde se toman datos; por esta razón con el plan de mantenimiento se busca tener siempre la maquina en sus niveles óptimos de funcionamiento para no alterar los resultados de las pruebas por una falla funcional.

- Información de fallas. En este caso las personas que llevan registro de las fallas son el docente encargado del equipo y los estudiantes que realizan las pruebas de laboratorio con el equipo. Es importante primero entender cómo se utiliza el equipo (Valderrama, 2020). para esto se describe a continuación el procedimiento con el cual se realizan las pruebas de laboratorio (Caro et al., 2019); como muestra en la **Figura 6** **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 7. Sistema de refrigeración DAR siendo utilizado en pruebas por investigadores.



En su operación el equipo cuenta con tres fases de funcionamiento:

- Fase 1 – calentamiento: Se deja la máquina dispuesta al sol, con el fin de que concentre los rayos del sol en el punto focal del concentrador para alcanzar la temperatura de arranque del sistema (170°C , en Bogotá). Donde se toman los datos de irradiancia y presión para ver el comportamiento de la máquina, la cual depende de las condiciones climáticas (Caro et al., 2019).
- Probabilidad de fallas, fase 1: En esta etapa las principales fallas funcionales del equipo se pueden dar debido a que en el sub-sistema 2 la superficie de del concentrador solar se encuentre sucia y pierda reflectancia para proyectar los rayos del sol hacia el punto focal donde se encuentra el tubo de vacío solar.
- Fase 2 – enfriamiento-: Donde inicia el ciclo de refrigeración ya que empieza a fluir el gas caliente por intercambiador de calor hasta llegar a la bomba de

burbujas que es la fuente de entrada para la unidad de refrigeración (Caro et al., 2019).

- Probabilidad de fallas, fase 2: En esta etapa pueden ocurrir varias fallas funcionales en el sub-sistema 3 ya que el intercambiador de calor es un sistema complejo, las principales fallas aquí están relacionadas con la fuga del fluido que circula por este sub-sistema.
- Fase 3 – reposo-: Se deja operar el sistema para que alcance su temperatura de refrigeración entre 0-12°C y se deja que conserve el frío durante la noche para iniciar al día siguiente de nuevo el proceso (Caro et al., 2019).
- Probabilidad de fallas, fase 3: En esta etapa hasta el día de hoy no se registran fallas funcionales y las fallas acá están relacionadas con deficiencias en la operación del equipo.

3.3 PROBABILIDAD DE FALLA DEL SISTEMA EN SU OPERACIÓN

A partir de esta descripción se hizo una evaluación de la probabilidad de falla de cada sub-sistema dándole una calificación a la probabilidad de que falle el sistema en cada una de estas fases de funcionamiento (Ullman, 2003); donde:

(0) – la probabilidad del sub-sistema es nula o no se ha presentado aún.

(3) – la probabilidad de falla existe en el sub-sistema, pero no impide el funcionamiento del sistema.

(9) – la probabilidad de falla es alta y puede impedir el funcionamiento del sistema.

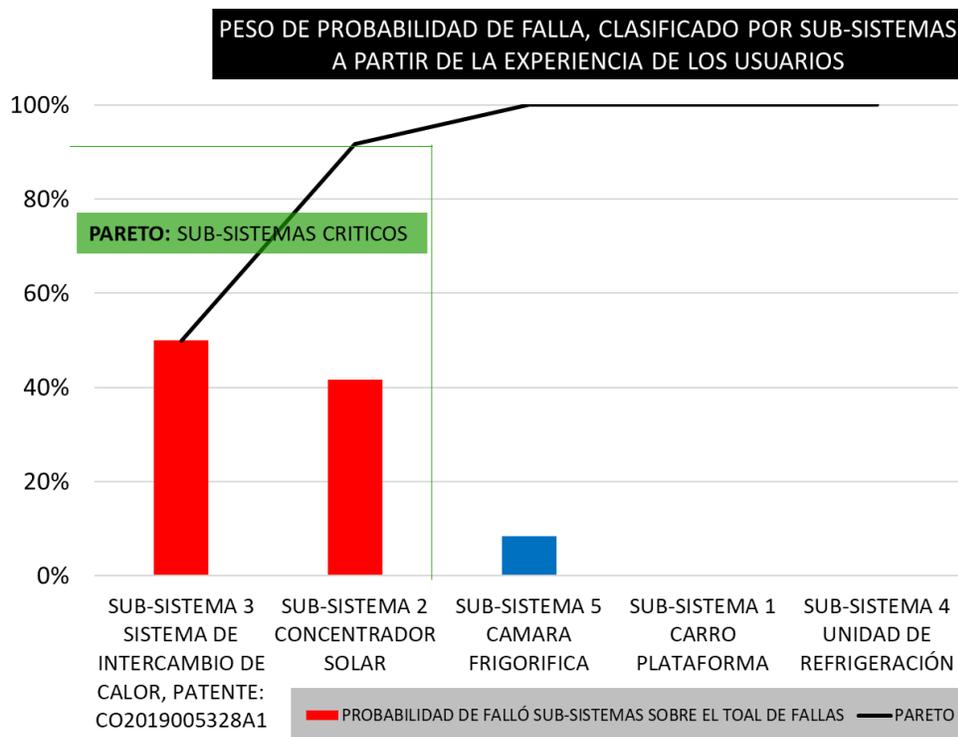
Los resultados de esta evaluación de falla en cada sub-sistema se muestran en la **Tabla 1:**

Tabla 1. Probabilidad de falla total por sub-sistema.

SUB-SISTEMA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	PROBABILIDAD DE FALLO SUB-SISTEMAS SOBRE EL TOAL DE FALLAS
SUB-SISTEMA 1 CARRO PLATAFORMA	0	0	0	0%
SUB-SISTEMA 2 CONCENTRADOR SOLAR	9	3	3	42%
SUB-SISTEMA 3 SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR, PATENTE: CO2019005328A1	0	9	9	50%
SUB-SISTEMA 4 UNIDAD DE REFRIGERACIÓN	0	0	0	0%
SUB-SISTEMA 5 CAMARA FRIGORIFICA	0	0	3	8%

A partir de estos resultados se puede evaluar mediante un diagrama de pareto el peso de los sub-sistema en el plan de mantenimiento por su probabilidad de falla como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se evidencia que los sub-sistemas con mas probabilidad de fallar y afectar la disponibilidad del equipo son: el sub-sistema 3 **-intercambiador de calor-** y sub-sistema 2 **-concentrador solar-**.

Figura 8. Grafica de probabilidad de falla en los sub-sistemas.



3.4 ANÁLISIS DE FALLAS POR SUB-SISTEMAS

A continuación, se analiza cada sub-sistema a detalle, la criticidad de sus componentes, las causas y modos de falla, las alternativas para mantener estos componentes y el costo estimado de las rutinas mantenimiento; para este análisis se utilizan los siguientes criterios (Campos et al., 2018):

- Criterio de detectabilidad (D):
 - (1) Causa de falla potencial fácilmente detectable y corregida durante la operación.
 - (2) Mediana probabilidad de detectar fallas potenciales y corregirlas a tiempo.
 - (3) Baja probabilidad de detectar fallas potenciales y corregirla a tiempo.
 - (4) No hay probabilidad de detectar fallas potenciales a tiempo, se puede llegar a falla funcional.

- Criterio de severidad (S):

- (1) No hay efectos importantes.
- (2) Efecto leve en la capacidad productiva, no hay pérdidas económicas por paro o reparación.
- (3) Efecto importante en la capacidad productiva, hay pérdidas económicas por paro o reparación.
- (4) Efecto crítico en la seguridad (riesgo por lesiones o muertes) o en el medio ambiente, disminución de la capacidad productiva, hay pérdidas económicas significativas por paro o reparación.

- Criterio de ocurrencia (O):

- (1) Tasa de fallas menor o igual a 1 falla anual.
- (2) Tasa de fallas mayor a 1 falla anual y menor a 3 fallas anuales.
- (3) Tasa de fallas mayor a 3 fallas anuales y menor a 12 fallas anual.
- (4) Mas de 12 fallas al año, pueden ocurrir varias fallas al año.

- Criterio de semaforización (NPR):

$NPR = D * S * O$	<i>(¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)</i>
-------------------	--

(ROJO) – $NPR \geq 36$.

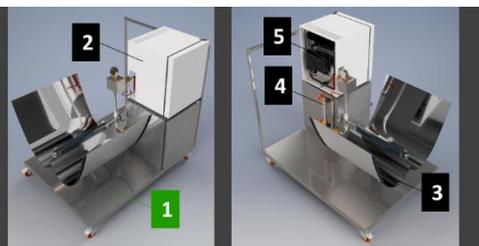
(AMARILLO) – $7 < NPR < 36$.

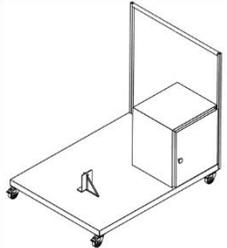
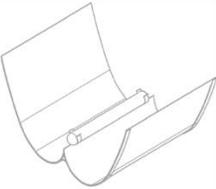
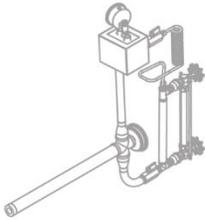
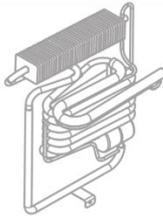
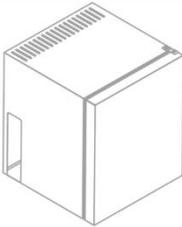
(VERDE) – $NPR \leq 7$

3.4.1 Sub-sistema 1, carro plataforma:

Figura 9. Sub-sistema 1.

SISTEMA



SUB-SISTEMA 1	SUB-SISTEMA 2	SUB-SISTEMA 3	SUB-SISTEMA 4	SUB-SISTEMA 5
CARRO PLATAFORMA	CONCENTRADOR SOLAR	SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR, PATENTE: CO2019005328A1	UNIDAD DE REFRIGERACIÓN	CAMARA FRIGORIFICA
				

La función de este sistema es transportar y sostener el equipo, lo compone principalmente por una estructura fabricada en acero inoxidable, y los demás componentes que se detallan a continuación:

Tabla 2. Componentes sub-sistema 1

SUB-SISTEMA 1 CARRO PLATAFORMA	COMPONENTES		DESCRIPCION	#	UMB	TIPO	COMPRA	PRECIO DE REFERENCIA (COP)
	1.1	KIT DE RUEDAS PARA MAQUINA	PVC REF. STEP AP203	1	KIT	ESTANDAR	NACIONAL	\$ 25.000
	1.2	CUERPO	LIMINA DE ACERO INOXIDABLE 430, CALIBRE 20 + TUBO DE ACERO INOX. 304 1IN	1	EA	MAQUILADO	NACIONAL	\$ 650.000
	1.3	VISAGRAS PUERTA		2	EA	ESTANDAR	NACIONAL	\$ 1.000
	1.4	PERNO + TUERCA DE SUJECIÓN PARA COCENTRADOR SOLAR	TORNILLO HEX G8 3/8 X 1-1/4 UNC + TUERCA ZINCADA MACIZA 3/8 IN	1	EA	ESTANDAR	NACIONAL	\$ 1.300
	1.5	SOPORTE BASE PARA CONCENTRADOR SOLAR	LAMINA HIERRO, CALIBRE 5	1	EA	MAQUILADO	NACIONAL	\$ 12.800

En este sub-sistema no se esperan fallas recurrentes, como se detalla en la tabla a continuación:

Tabla 3. Análisis de fallas sub-sistema 1

SUB-SISTEMA 1 CARRO PLATAFORMA	COMPONENTES			D	S	O	NPR
	1.1	KIT DE RUEDAS PARA MAQUINA			1	2	1
1.2	CUERPO			1	1	1	1
1.3	VISAGRAS PUERTA			1	1	1	1
1.4	PERNO + TUERCA DE SUJECIÓN PARA COCENTRADOR SOLAR			1	1	1	1
1.5	SOPORTE BASE PARA CONCENTRADOR SOLAR			1	1	1	1

Ninguno de los componentes del sistema presenta probabilidad de falla representativa, todas pueden ser corregidas tiempo.

- Causas de fallas:

(1) Probable: El sistema se encuentra expuesto a la intemperie, en caso de que llueva se debe limpiar a tiempo ya que el componente 1.5 es una lámina de hierro que puede llegar a presentar corrosión. Sin embargo, cuando llueve no se utiliza la maquina ya que no hay sol.

(2) Poco probable: El kit de ruedas puede presentar desgaste con el tiempo, sin embargo, conseguir los componentes es fácil en el mercado nacional, el costo es bajo y el reemplazo es sencillo.

- Rutina de mantenimiento propuesta:

Tabla 4. Rutina de mantenimiento propuesta para sub-sistema 1.

Actividad	Frecuencia	Costo estimado (COP)		
		Repuestos	Mano de obra	Total

Limpeza de la superficie	Cada vez que presente agua en la superficie.	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Inspección visual	Mensual.	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Cambio de 1.1 Kit de ruedas	Cuando el mantenedor evidencie desgaste evidente que impida el desplazamiento.	\$25.000	\$50.000	\$75.000

3.4.2 Sub-sistema 2, concentrador solar:

Figura 10. Sub-sistema 2.



La función principal de este sistema es calentar, esto lo hace a partir de recibir y reflejar los rayos del sol en la superficie sobre el punto focal donde se encuentra el tubo de vacío solar:

Tabla 5. Componentes sub-sistema 2

SUB-SISTEMA 2 CONCENTRADOR	COMPONENTES			DESCRIPCION	#	UM B	TIPO	COMPRA	PRECIO DE REFERENCIA (COP)
	2.1	SUPERFICIE REFLECTORA	2.1.1	PERFIL CONCENTRADOR	LAMINA DE ACERO INOX. CALIBRE 24, BRILLO ESPEJO	1	EA	MAQ	NAC

		2.1.2	REFUERZOS DE FORMA PERFIL	PLATINA DE HIERRO DUCTIL 1 X 1/8 IN	2	EA	MA Q	NAC	\$ 11.000	
		2.1.3	REFUERZO DE APOYO PERFIL	PLATINA DE HIERRO DUCTIL 1 X 1/8 IN	1	EA	STR	NAC	\$ 4.500	
		2.1.4	SOPORTE CONCENTRADOR SOLAR	LIMINA DE HIERRO 5 MM	1	EA	MA Q	NAC	\$ 13.000	
	2.2	TUBO DE VACIO SOLAR	2.2.1	TUBO DE VACIO SOLAR	EN BOROSILICATO CON CAPA INTERNA DE ABSORCIÓN NEGRA 58/600 MM	1	EA	STR	INT (USA)	\$627.000
			2.2.2	SOPORTE TUBO DE VACIO SOLAR	LIMINA DE ACERO INOX. CALIBRE 20 CON RECUBRIMIENTO SUPERIOR DE CORCHO	2	EA	MA Q	NAC	\$ 2.400
			2.2.3	TAPON EN CAUCHO	TAPON CACUCHO 58 MM	1	EA	STR	NAC	\$ 2.000
			2.2.4	VALVULA DE ALIVIO PARA AIRE	TUBO DE COBRE 4MM	1	EA	MA Q	NAC	\$ 3.000

El análisis de fallas de este sub-sistema se detalla a continuación:

Tabla 6. Análisis de fallas sub-sistema 2

			COMPONENTES				D	S	O	NPR
			2.1	SUPERFICIE REFLECTORA	2.1.1	PERFIL CONCENTRADOR	1	3	4	12
	2.1.2	REFUERZOS DE FORMA PERFIL	2		3	1	6			
	2.1.3	REFUERZO DE APOYO PERFIL	1		2	1	2			
	2.1.4	SOPORTE CONCENTRADOR SOLAR	1		2	1	2			
SUB-SISTEMA 2 CONCENTRADOR SOLAR	2.2	TUBO DE VACIO SOLAR	2.2.1	TUBO DE VACIO SOLAR	3	3	1	9		
			2.2.2	SOPORTE TUBO DE VACIO SOLAR	1	2	1	2		
			2.2.3	TAPON EN CAUCHO	1	3	1	3		
			2.2.4	VALVULA DE ALIVIO PARA AIRE	1	3	1	3		

Hay que prestar atención en este sub-sistema a los componentes:

(2.1.1) perfil del concentrador: puede presentar fallas debido a la suciedad que se concentra sobre la superficie ya que pierde reflectividad y disminuye la eficiencia

del sistema de calefacción. Por otra, parte la geometría no debe verse afectada ya que también modifica la efectividad al variar el punto focal de la geometría.

(2.2.1) tubo de vacío solar: es un componente crítico ya que, en caso de falla, su repuesto debe ser adquirido en el exterior y los tiempos de parada pueden afectar la disponibilidad de la máquina. Se recomienda, la correcta manipulación del componente ya que es poco probable que falle.

- Causas de fallas:

(1) Muy Probable: El perfil del concentrador se encuentra sucio ya que se encuentra la intemperie y esto disminuye su reflectividad.

(2) Poco probable: (A) En el transporte se ve afectada la geometría del concentrador por abolladura; (B) En el transporte el tubo de vacío solar sufre un daño irreparable.

- Rutina de mantenimiento propuesta:

Tabla 7. Rutina de mantenimiento propuesta para sub-sistema 2

Actividad	Frecuencia	Costo estimado (COP)		
		Repuestos	Mano de obra	Total
Limpieza de la superficie	Después de cada uso, con agua y jabón.	\$ 2.000	\$ 0	\$ 2.000
Inspección visual	Al tubo de vacío solar y la superficie para verificar que no presenten alteraciones.	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Cambio 2.1.1. tubo de vacío solar	(MTTO CORRECTIVO) Cuando falle el componente, se recomienda evaluar tener una de repuesto para evitar paradas del equipo.	\$627.000	\$ 0	\$627.000

Cambio de 2.1. superficie reflectora	Cambio cada 5 años, debido a que la superficie pierde reflectividad y con el tiempo se va alterando la geometría.	\$348.500	\$300.000	\$648.500
--	---	-----------	-----------	-----------

3.4.3 Sub-sistema 3, sistema de intercambio de calor:

Figura 11. Sub-sistema 3.



La función principal de este sistema es transportar el calor generado en el sub-sistema 2 al sub-sistema 4 para que funcione el sistema refrigeración. Esto lo hace a partir de trabajar con los cambios de fase el fluido en su interior, al calentarlo hasta que se evapore y luego sobre calentar el gas hasta que alcance los 220°C y la presión de operación de 100 psi. Por otra parte, este es el sub-sistema más complejo de la maquina como se evidencia a continuación donde se hace el listado detallado de los componentes que lo conforman.

Tabla 8. Componentes sub-sistema 3

SUB-SISTEMA 3	COMPONENTES			DESCRIPCION	#	UM B	TIP O	CO MPR	PRECIO DE REFERENC IA (COP)
	3.1	SISTEMA DE CALEFACCION (DENTRO TUBO DE VACIO SOLAR)	3.1.1	TUBO DE CALEFACCION	TUBO ACERO INOX. 304 1IN + TAPAS	1	EA	MA Q	NA C
	3.1.2		CONEXIÓN EN CRUZ	ASME B16,3 CRUZ -	1	EA	ST R	NA C	\$ 2.300

				CLASE 150 X 3/4IN					
		3.1.3	REDUCCIÓN	ASME B16,9 REDUCTOR 1 X 1/2IN - SCH 80	2	EA	STR	NAC	\$ 1.150
		3.1.4	TUBO DE DISTRIBUCIÓN	TUBO ACERO INOX. 304 1/2 IN	1	EA	STR	NAC	\$ 12.000
		3.1.5	SENSOR DE TEMPERATURA	TERMOMETRO ANALOGO 3 IN X INSERTO DE 100 MM DE 0-300°C	1	EA	STR	NAC	\$ 34.000
3.2	CAJA DE EXPANSIÓN DE GAS	3.2.1	CUBIERTA EXTERNA	LAMIANA DE ACERO INOX. 304 CALIBRE 20	1	EA	MAQ	NAC	\$ 25.000
		3.2.2	ASILAMIENTO INTERNO	ESPUMA DE POLIURETANO	1	EA	STR	NAC	\$ 8.000
		3.2.3	ACOPLE	ACOPLE PARA SOLDADURA CL 150 X 1/4IN	4	EA	STR	NA	\$ 1.200
		3.2.4	CAJA INTERNA	LAMINA DE ACERO INOX. 430 CALIBRE 20	1	EA	STR	NAC	\$ 14.000
		3.2.5	SENSOR DE PRESION	MANOMETRO ANALOGO 1/4 IN NPT DE 0 - 200 PSI	1	EA	STR	NAC	\$ 17.750
		3.2.6	VALVULA DE ALIVIO	VALVULA DE SEGURIDAD TIPO LLAVERO 1/4 IN 150 PSI CON SELLOS CERAMICOS	1	EA	STR	NA	\$ 23.900
		3.2.7	CONECTOR MACHO	PARKER 1/4 IN	1	EA	STR	NAC	\$ 900
		3.2.8	VALVULA DE BOLA	VALVULA DE BOLA MINI 1/4 IN	1	EA	STR	NA	\$ 8.700
3.3	SISTEMA DE CONDENSACIÓN	3.3.1	SERPENTIN DE	TUBO COBRE FLEXI 1/4 IN	2	M	STR	NA	\$ 16.000

			INTERCAMBIO						
		3.3.2	AISLAMIENT O	LANA DE ROCA	1	EA	ST R	NA C	\$ 20.000
		3.3.3	UNIÓN EN T	ASME B16.3 TUBO EN T ROSCADO 1/4 IN CL 150	2	EA	ST R	NA C	\$ 2.700
		3.3.4	REDUCION ROSCADA	HIERRO 1/2 X 1/4 IN CL 1	2	EA	ST R	NA	\$ 1.450
		3.3.5	CONECTOR MACHO	PARKER 1/4 IN	4	EA	ST R	NA C	\$ 900
		3.3.6	TUBO DE BAJADA DE LIQUIDO	TUBO ACERO INOX. 304 1/2 IN	1	EA	ST R	NA C	\$ 7.500
		3.3.7	MIRILLA DE NIVEL	SET DE NIVEL TIPO CALDERA, APOLLO. REF. 20-100	1	EA	ST R	NA C	\$ 49.000
		3.3.8	VALVULA DE BOLA	VALVULA DE BOLA MINI 1/4 IN	1	EA	ST R	NA C	\$ 8.700
		3.3.9	CODO	ACERO INOX. 304 1/2 IN	1	EA	MA Q	NA C	\$ 13.000
3.4	FLUIDO INTERNO INTERCAMBIO DE CALOR			DICLOMETA NO CH2Cl2 X 3800ML	1	EA	ST R	NA C	\$ 89.000

El análisis de fallas de este sub-sistema se detalla a continuación:

Tabla 9. Análisis de fallas sub-sistema 3

			COMPONENTES		D	S	O	NPR
SUB-SISTEMA 3 SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR	3.1	SISTEMA DE CALEFACCION (DENTRO TUBO DE VACIO SOLAR)	3.1.1	TUBO DE CALEFACCION	2	4	1	8
			3.1.2	CONEXIÓN EN CRUZ	2	4	1	8
			3.1.3	REDUCCIÓN	2	4	1	8
			3.1.4	TUBO DE DISTRIBUCIÓN	2	4	1	8
			3.1.5	SENSOR DE TEMPERATURA	1	4	1	4
	3.2	CAJA DE EXPANSIÓN DE GAS	3.2.1	CUBIERTA EXTERNA	1	2	1	2
			3.2.2	ASILAMIENTO INTERNO	1	2	1	2
			3.2.3	ACOPLE	1	4	1	4
			3.2.4	CAJA INTERNA	4	4	1	16
			3.2.5	SENSOR DE PRESION	2	4	1	8
			3.2.6	VALVULA DE ALIVIO	2	4	3	24
			3.2.7	CONECTOR MACHO	2	4	1	8
	3.3	SISTEMA DE CONDENSACIÓN	3.2.8	VALVULA DE BOLA	2	4	1	8
			3.3.1	SERPENTIN DE INTERCAMBIO	1	4	1	4
			3.3.2	AISLAMIENTO	1	3	1	3
3.3.3			UNIÓN EN T	2	4	1	8	

		3.3.4	REDUCION ROSCADA	2	4	1	8
		3.3.5	CONECTOR MACHO	2	4	1	8
		3.3.6	TUBO DE BAJADA DE LIQUIDO	1	4	1	4
		3.3.7	MIRILLA DE NIVEL	1	2	1	2
		3.3.8	VALVULA DE BOLA	1	4	1	4
		3.3.9	CODO	1	4	1	4
	3.4	FLUIDO INTERNO INTERCAMBIO DE CALOR		3	4	4	48

Este es el sub-sistema más crítico de todos en esta máquina, ya que puede fallar de varios modos, las fallas más críticas están en:

(3.2.4) caja interna: puede presentar un fallo de construcción que no es evidente ya que es un componente interno, acá se pueden ocasionar fugas del líquido de transferencia de calor. Adicionalmente cuando se reemplaza el líquido se hace por acá al retirar 3.2.6 válvula de alivio y si se ensamblar mal puede presentar también fugas de gas de diclorometano que puede ser riesgoso (Roth GmbH, s/f).

(3.2.6) válvula de alivio: es un componente crítico ya que puede presentar fuga si no se ajusta bien cuando se carga el líquido por este agujero donde se retira este componente. Adicionalmente, puede presentar una falla en la integridad mecánica de su empaque ya que el diclorometano puede tener una reacción que debilita este mismo, cuando se dispara la válvula, debido a sus características químicas y la temperatura que alcanza el gas puede derretir el empaque. Por otra parte, cuando si se dispara la válvula de alivio presenta un alto riesgo para las personas que se encuentren alrededor de la máquina (CO2019005328A1, 2020).

(3.4) Fluido interno de intercambio de calor: el fluido (DICLOROMETANO) presenta alto riesgo para la salud debido a sus características químicas, por la cual requiere un manejo especial y que el sistema esté a punto sino puede presentar un riesgo para la salud de las personas (Roth GmbH, s/f). La falla puede darse debido a que se presentan fugas en el sistema o desprendimiento de material de los componentes al reaccionar con este químico durante su exposición prolonga, por este motivo se debe estar revisando que el nivel de líquido se encuentre en el nivel

determinado por los fabricantes del equipo (Caro et al., 2019; CO2019005328A1, 2020).

- Causas de fallas:

(1) Muy Probable: El fluido presenta fuga porque excede la temperatura de operación y se sube la presión lo cual hace que se dispare la válvula y en consecuencia puede dañar la válvula haciendo que se salga todo el fluido.

(2) Probable: cuando se hace el cambio de fluido se dejan piezas mal ajustadas lo cual causa una fuga.

(3) Muy poco probable: la caja interna de expansión se encuentra mal fabricada y permite que haya fugas en el sistema.

- Rutina de mantenimiento propuesta:

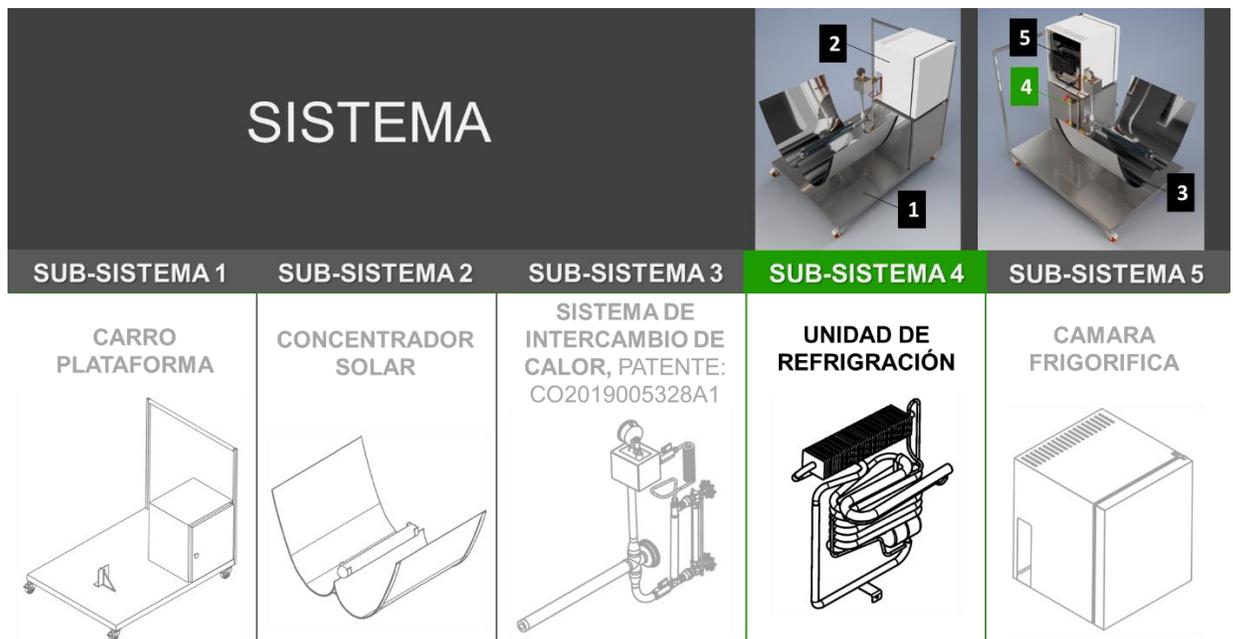
Tabla 10. Rutina de mantenimiento propuesta para sub-sistema 3.

Actividad	Frecuencia	Costo estimado (COP)		
		Repuestos	Mano de obra	Total
Inspección visual y olfativa	Revisar siempre que no haya fugas evidentes en el sistema, Adicionalmente, el fluido tiene un olor característico, en caso de notarlo evacuar el área y consultar plan de contingencia.	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Cambio 3.2.6 válvula de alivio	Cambiar válvula de alivio cada vez que se dispara y evaluar mediante análisis mecánico sus componentes. Se recomienda tener una válvula de reemplazo ya que no es costosa. Esto lo puede realizar quien opere la máquina.	\$47.800	\$ 0	\$47.800

<p>Cambio de 3.4. fluido de intercambio de calor</p>	<p>Cambio cada 6 meses 380 ML, debido a que se ensucia el fluido. Manifiestan que es porque en la construcción de la maquina cayo espuma de poliuretano dentro de la cámara de expansión y con el tiempo el DICLOROMETANO ha ido limpiando este componente.</p> <p>Sin embargo, para el correcto funcionamiento del sistema si como en carro toca cambiar el aceite cada cierto tiempo, acá toca hacerlo con este líquido, Cuando la maquina este fría y lejos del sol. Esto lo puede realizar quien opere la máquina.</p>	<p>\$8.700</p>	<p>\$0</p>	<p>\$8.700</p>
--	--	----------------	------------	----------------

3.4.4 Sub-sistema 4, unidad de refrigeración:

Figura 12. Sub-sistema 4.



La función principal de este sub-sistema es enfriar, esto lo hace a partir de un ciclo de refrigeración por absorción difusión con una mezcla de amoniaco e hidrogeno en su interior (Caro et al., 2019):

Tabla 11. Componentes sub-sistema 4

SUB-SISTEMA 4 UNIDAD DE REFRIGERACIÓN	COMPONENTES		DESCRIPCION		#	UMB	TIPO	COMPRA	PRECIO DE REFERENCIA (COP)
4.1	UNIDAD DE REFRIGERACION POR ABSORCION DIFUSION		UNIDAD DE REFRIGERACION ABSORCION-DIFUSION 30 LITROS, XC-30 TIPO TK-P30G SUZHOU MDSAFE EQUIPMENT		1	EA	STR	INT (CHN)	\$1.121.000
4.2	FLUIDO INTERNO	4.2.1	REFRIGERANTE	AMONIACO NH3, 300 ML	1	EA	STR	INT (CHN)	\$ 41.000
		4.2.2	GAS INERTE	HIDROGENO H2, 25 PSI (CILINDRO)	1	EA	STR	INT (CHN)	\$ 321.000

El análisis de fallas de este sub-sistema se detalla a continuación:

Tabla 12. Análisis de fallas sub-sistema 4

SUB-SISTEMA 4 UNIDAD DE REFRIGERACIÓN	COMPONENTES				D	S	O	NPR
	4.1	UNIDAD DE REFRIGERACION POR ABSORCION DIFUSION				4	4	1
4.2	FLUIDO INTERNO		4.2.1	REFRIGERANTE	4	4	1	16
			4.2.2	GAS INERTE	4	4	1	16

Este sub-sistema es muy confiable ya que el fabricante da una vida útil de 20 años (Aliane, Abboudi, Seladji, & Guendouz, 2016; Caro et al., 2019; Rodríguez-Muñoz & Belman-Flores, 2013); sin embargo, cuando presenta falla se debe cambiar el sistema ya que no tiene arreglo y se debe mandar a traer el componente desde China por lo cual hay que contar con los tiempos de aprovisionamiento.

- Causas de fallas:

(1) Extremadamente poco probable: presenta fugas o deja de funcionar.

- Rutina de mantenimiento propuesta:

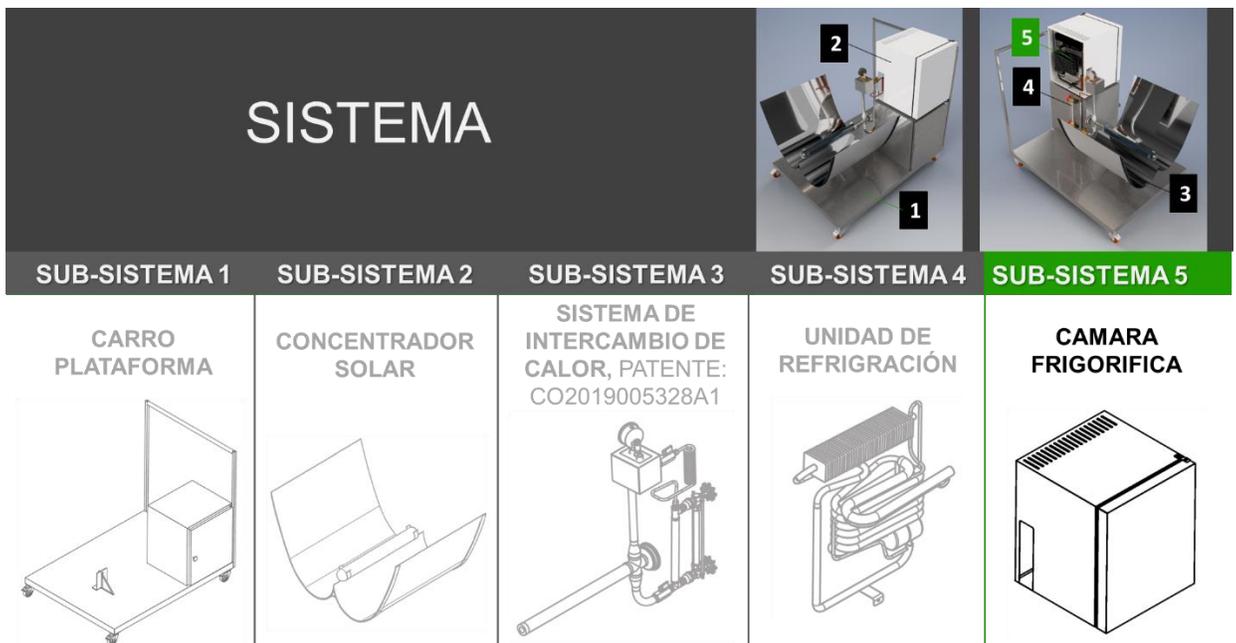
Tabla 13. Rutina de mantenimiento propuesta para sub-sistema 4.

Actividad	Frecuencia	Costo estimado (COP)
-----------	------------	----------------------

		Repuestos	Mano de obra	Total
Cambio de unidad de refrigeración	Cada 15 años.	\$ 1.121.000	\$ 0	\$ 1.121.000

3.4.5 Sub-sistema 5, cámara frigorífica:

Figura 13. Sub-sistema 5.



La función principal de este sub-sistema es mantener el frío generado por el sub-sistema 4 unidad de enfriamiento y conservar el espacio en su interior a una temperatura de entre 0-12°C (Caro et al., 2019; CO2019005328A1, 2020). Está compuesto por lo siguiente componentes:

Tabla 14. Componentes sub-sistema 5

SUB-SISTEMA	COMPONENTES	DESCRIPCION	#	UMB	TIPO	COMPRA	PRECIO DE REFERENCIA (COP)
-------------	-------------	-------------	---	-----	------	--------	----------------------------

	5.1	CAJON	5.1.1	CAJON INTERNO	LAMINA PVC ESPESOR 1,5 MM	1	EA	MAQ	NAC	\$ 16.000
			5.1.2	AISLAMIENTO	ESPUMA DE POLIURETANO	1	EA	MAQ	NAC	\$ 8.000
			5.1.3	CAJON EXTERNO	LAMINA DE ACERO GALVANIZADA CALIBRE 24	1	EA	MAQ	NAC	\$ 18.000
			5.1.4	SOPORTE BANDEJA	RIL DIN 250 ACERO GALVANIZADO	2	EA	MAQ	NAC	\$ 2.000
			5.1.5	BANDEJA	VIDRIO TEMPLADO	1	EA	MAQ	NAC	\$ 21.450
	5.2	PUERTA	5.2.1	CARA INTERNA	LAMINA PVC ESPESOR 1,5 MM	1	EA	MAQ	NAC	\$ 6.000
			5.2.2	AISLAMIENTO	ESPUMA DE POLIURETANO	1	EA	MAQ	NAC	\$ 4.000
			5.2.3	CARA EXTERNA	LAMINA DE ACERO GALVANIZADA CALIBRE 24	1	EA	MAQ	NAC	\$ 6.500
			5.2.4	GOMA IMAN	GOMA IMAN PARA NEVERA ESTANDAR	1	EA	MAQ	NAC	\$ 4.500
			5.2.5	VISAGRA	LAMINA DE ACERO GALVANIZADA CALIBRE 20	1	EA	MAQ	NAC	\$ 1.800
			5.2.6	PASADOR	TUBO DE ACERO AL CARBONO 6X20 MM	1	EA	MAQ	NAC	\$ 800

El análisis de fallas de sub-sistema 5 se detalla a continuación:

Tabla 15. Análisis de fallas sub-sistema 5

	COMPONENTES				D	S	O	NPR
	SUB-SISTEMA 5 CAMARA FRIGORIFICA	5.1	CAJON	5.1.1	CAJON INTERNO	1	1	1
5.1.2				AISLAMIENTO	1	1	1	1
5.1.3				CAJON EXTERNO	1	1	1	1
5.1.4				SOPORTE BANDEJA	1	1	1	1
5.1.5				BANDEJA	1	1	1	1
5.2		PUERTA	5.2.1	CARA INTERNA	1	1	1	1
			5.2.2	AISLAMIENTO	1	1	1	1
			5.2.3	CARA EXTERNA	1	1	1	1
			5.2.4	GOMA IMAN	1	3	1	3
			5.2.5	VISAGRA	1	1	1	1
			5.2.6	PASADOR	1	3	1	3

Este sub-sistema es muy confiable ya que es de tipo estructural y no presenta mucha complejidad.

- Causas de fallas:

(1) Extremadamente poco probable: que falle el imán de la puerta o el pasador que sirve como bisagra.

- Rutina de mantenimiento propuesta:

Tabla 16. Rutina de mantenimiento propuesta para sub-sistema 5.

Actividad	Frecuencia	Costo estimado (COP)		
		Repuestos	Mano de obra	Total
Limpiar superficie	Después de cada uso	\$ 0	\$ 0	\$ 0

4. CONCLUSIONES

4.1 PROPUESTA GENERAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

A partir del análisis detallado de cada sub-sistema analizado se consolida la propuesta general de mantenimiento para el sistema de refrigeración por absorción - difusión a partir de energía solar térmica de tipo laboratorio de la Universidad Santo Tomás.

Tabla 17. Plan de mantenimiento preventivo propuesto por el autor.

Actividad	Material	Frecuencia	Costo estimado anual (COP)
CADA AÑO			
Limpieza superficie, prestando especial atención a la superficie del concentrador solar	AGUA Y JABÓN	Después de cada uso	\$720.000
Inspección visual toda la maquina	N/A	Después de cada uso	\$0
Inspección olfativa al intercambiador de calor y la unidad de refrigeración	N/A	Después de cada uso	\$0
Cambio 3.2.6 válvula de alivio	VALVULA DE SEGURIDAD TIPO LLAVERO 1/4 IN 150 PSI CON SELLOS CERAMICOS	Cada 6 meses cambiar válvula de alivio o cada vez que se dispara. Se recomienda tener en inventario una válvula de reemplazo.	\$191.200
Cambio de 3.4. fluido de intercambio de calor		Cambio cada 6 meses 380 ML, debido a que se ensucia el fluido.	\$26.100
COSTO ESTIMADO DE PLAN DE MTTO ANUAL			\$937.300
CADA 5 AÑOS			
Cambio de 1.1 Kit de ruedas	KIT DE RUEDAS PVC REF. STEP AP203	Para evitar fallo en el desplazamiento del equipo.	\$75.000
Tener 2.1.1. tubo de vacío solar de repuesto	TUBO DE VACIO SOLAR EN BOROSILICATO CON CAPA INTERNA DE ABSORCIÓN NEGRA 58/600 MM	Se recomienda evaluar tener una de repuesto para evitar paradas del equipo.	\$627.000
Cambio de 2.1. superficie reflectora	LAMINA DE ACERO INOX. CALIBRE 24; BRILLO ESPEJO, PLATINA DE HIERRO	Cambio cada 5 años, debido a que la superficie pierde reflectividad y con el tiempo se va alterando la geometría.	\$648.500

	DUCTIL 1 X 1/8 IN; LIMINA DE HIERRO 5 MM		
COSTO ESTIMADO DE PLAN DE MTTO ANUAL			\$1.350.500
CADA 15 AÑOS			
Cambio de unidad de refrigeración	UNIDAD DE REFRIGERACION ABSORCION-DIFUSION 30 LITROS, XC-30 TIPO TK-P30G SUZHOU MDSAFE EQUIPMENT	Cada 15 años.	\$1.121.000
COSTO ESTIMADO DE PLAN DE MTTO ANUAL			\$1.121.000
VIDA UTIL ESTIMADA = 30 AÑOS			
COSTO DEL EQUIPO			\$4.989.326
COSTO TOTAL ESTIMADO DE MANTENER EL EQUIPO DURANTE SU VIDA UTIL			\$37.343.000

4.2 PROPUESTA DE REDISEÑO

Entendiendo que la maquina analizada es un prototipo y presenta varias oportunidades de mejora en su diseño se recomienda prestar especial atención al **sub-sistema 3 intercambiador de calor** ya que presenta la mayor criticidad en cuanto a fallas del sistema, se recomienda incluir sensores y actuadores electrónicos que controlen mejor los parámetros de presión y temperatura para evitar fallos. Adicionalmente, se recomienda pensar en una construcción más sólida que simplifique el sistema a nivel mecánico, pero lo haga más complejo a nivel electrónico de acuerdo con lo expuesto anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

ALIANE, A., ABBOUDI, S., SELADJI, C., & GUENDOOUZ, B. (2016). An illustrated review on solar absorption cooling experimental studies. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.012>

AYADI, O., APRILE, M., & MOTTA, M. (2012). Solar cooling systems utilizing concentrating solar collectors - An overview. *Energy Procedia*, 30, 875–883. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.099>

BEST, R., & RIVERA, W. (2015). A review of thermal cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1162–1175. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.018>

CAMPOS, O., TOLENTINO, G., TOLEDO, M., & TOLENTINO, R. (2018, junio 26). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. Recuperado el 21 de julio de 2021, de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61458265006/html/index.html>

CARO, J., AGUIRRE, C., & MALAGÓN, D. (2019). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS*. Santo Tomas Bogota.

CARO, J., AGUIRRE, C., & MALAGÓN, D. (2020). *CO2019005328A1*. Colombia. Recuperado de <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/073578702/publication/CO2019005328A1?q=pn%3DCO2019005328A1>

GARCIA, S. (2016). El análisis de causa raíz. Recuperado el 21 de julio de 2021, de <https://www.reporteroindustrial.com/temas/El-analisis-de-causa-raiz+115643>

IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas). (s/f). Quiénes somos. Recuperado el 30 de agosto de 2017, de <http://www.ipse.gov.co/informacion-institucional/ipse>

JAKOB, U. (2005). *Investigations Into Solar Powered Diffusion- Absorption Cooling Machines S Olar P Owered D Iffusion-. Building.*

MARTÍNEZ, L. M. (2018). Plan de mantenimiento preventivo y mejora del rendimiento de una instalación de energía solar para producción de ACS. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71162/fichero/TFM-1162-MARIN.pdf>

MECALUX, S. A. (2020). Lista de materiales (BOM): definición y diseño. Recuperado el 20 de julio de 2021, de <https://www.mecalux.com.co/blog/lista-materiales-bom>

MORA GUTIÉRREZ, L. A. (2005). *Mantenimiento estratégico para empresas de servicios o industriales.*

Nueva Gestión Informática. (2020). Breve historia del mantenimiento y sus etapas- MovilGmao. Recuperado el 20 de julio de 2021, de <https://movilgmao.es/breve-historia-mantenimiento/>

RIVERA RUBIO, E. M. (2011). Capítulo I Evolución del Mantenimiento. *Sistema de gestión del mantenimiento industrial. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL*, 51.

Recuperado de <https://docplayer.es/2233486-Sistema-de-gestion-del-mantenimiento-industrial.html>

RODRÍGUEZ-MUÑOZ, J. L., & BELMAN-FLORES, J. M. (2013). Review of diffusion–absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.019>

ROMERO, C., ARIAS, A., & SARMIENTO, L. (2012). *ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO MASADA EN RCM PARA UN GASODUCTO DE TRANSPORTE TRAMO OTERO - SANTANA*. Universidad Industrial de Santander UIS. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/146754.pdf>

ROTH GMBH, C. (s/f). Hoja de seguridad DICLOROMETANO. Recuperado de www.carlroth.de

SANCHEZ, I. (2019). (1) *Historia del Mantenimiento - YouTube*. YouTube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=XlkGWWtraPo>

ULLMAN, D. G. (2003). *The Mechanical Design Process*.

VALDERRAMA, P. (2020). RCM caso de estudio Steve Turner – Ventilador.

VALDERRAMA, P. (2021). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM (p. 119). Universidad Industrial de Santander UIS.

4.