

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA  
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

“DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉCNICA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO  
EN LA CONFIABILIDAD PARA PLANTA FOTOVOLTAICA RINCONADA SUR”

Trabajo titulación para optar al título de la

Ingeniería en MANTENIMIENTO

INDUSTRIAL

Alumno:

Constanza Gabriela López Verdugo

Profesor guía:

Mg. Ing. Vanessa Mella Lorca

## **DEDICATORIA**

A mi mamá, un profundo agradecimiento a su labor de madre, siempre dedicada y enfocada en nuestro cuidado y educación, en brindarnos las mejores herramientas para enfrentar la vida que sin duda son las que hoy me permiten obtener este logro, que también es de ella.

A mi abuelo, que encarna en su alma también a mi abuela que ya no comparte este plano con nosotros, pero sí en los recuerdos y enseñanzas, mi abuelo me ha brindado su amor y apoyo incondicional en estos años, siempre expresando su orgullo por mí y palabras de aliento para los momentos difíciles.

Mis hermanos Javier y Amaro, mis amigas Constanza y Jeniffer, mis eternos compañeros de vida que celebran cada paso que doy, como si fuera suyo. Su compañía, amor y amistad ha sido fundamental para mi desarrollo personal y contención emocional en este largo camino.

A mi gatito, que ha estado realmente cada mañana, tarde y noche de estudio a mi lado, fiel a mí brindando su amor y compañía.

Y también mis agradecimientos a la formación académica de la Universidad, a mis profesores, por entregar su conocimiento con paciencia y sabiduría, compartir sus experiencias y guiar a sus estudiantes de la mejor manera para convertirse en profesionales.

## RESUMEN EJECUTIVO

**KEYWORDS:** PLAN DE MANTENIMIENTO – PLANTA FOTOVOLTAICA – RCM

La planta fotovoltaica Rinconada Sur de 3MW está ubicada en el pueblo Rinconada de Silva, comuna de Putaendo, San Felipe, construida en el año 2021, operativa desde 2022. Pertenece a la empresa Gestión Solar, compañía chilena dedicada a la generación de energía eléctrica a través de la radiación solar desde el año 2018. El área constructiva de los parques lo desarrolla Tic Solar, departamento de la misma entidad y el área de mantención ha sido delegada a la empresa contratista oEnergy, realizando el mantenimiento a las cinco plantas de Gestión Solar, incluida Rinconada Sur. Actualmente se considera que el mantenimiento ha sido insatisfactorio según los parámetros del cliente, destacando el mantenimiento preventivo debido a visitas periódicas se pudo observar que la planta estaba en condiciones deficientes, por lo que la empresa ha decidido desvincular a oEnergy y constituir su propio departamento de mantenimiento en Gestión Solar. Se inicia tomando como base actual el plan ejecutado recientemente, y realizando un estudio paralelo de las fallas con fin de implementar las mejoras necesarias al plan de mantenimiento que se desea establecer para las cinco plantas, este estudio es enfocado en el plan destinado a Rinconada Sur.

El capítulo uno describe antecedentes técnicos y geográficos de la planta fotovoltaica Rinconada Sur, entrega una breve reseña de la empresa Gestión Solar, y detalles del mantenimiento realizado a la planta hasta la fecha. Se presenta la problemática y un análisis de criticidad de los equipos.

En el capítulo dos, se desarrolla la metodología RCM, se prioriza los modos de fallo mediante un análisis FMECA y se definen actividades de mantenimiento para el equipo crítico seleccionado.

Para finalizar, en el capítulo tres se definen las actividades de mejora que puedan incorporarse al plan de mantenimiento destinado a Rinconada Sur, evaluando también económicamente las opciones.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>OBJETIVOS</b> .....	8
GENERAL .....	8
ESPECÍFICOS .....	8
<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES DEL PROYECTO PLANTA FOTOVOLTAICA RINCONADA SUR</b> .....	9
1.1 PLANTA FOTOVOLTAICA RINCONADA SUR.....	10
1.1.1 ANTECEDENTES GEOGRÁFICOS .....	10
1.1.2 GESTIÓN SOLAR .....	12
1.1.3 SISTEMAS, COMPONENTES Y EQUIPOS.....	12
1.2 MANTENIMIENTO .....	19
1.3 PROBLEMÁTICA .....	21
1.3.1 FLUJOGRAMA DE IMPLANTACIÓN DEL RCM.....	23
1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	23
1.4.1 METODOLOGÍA.....	23
1.4.2 TAXONOMÍA DE ACTIVOS FÍSICOS .....	26
1.4.3 APLICACIÓN A SISTEMAS DE PLANTA RINCONADA SUR.....	27
<b>CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE METODOLOGÍA RCM PARA EQUIPO PRIORIZADO</b> .....	30
2.1 METODOLOGÍA RCM.....	31
2.2 FMECA .....	32
2.2.1 FUNCIONES OPERACIONALES .....	33
2.2.2 FALLAS FUNCIONALES .....	34
2.2.3 MODOS DE FALLA.....	35
2.2.4 EFECTOS DE FALLA.....	36
2.2.5 ÍNDICE DE PRIORIDAD DE RIESGO.....	36
2.3 HOJAS DE INFORMACIÓN .....	42
2.4 SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.....	43
2.5 ALGORITMO DE DECISIÓN RCM .....	44
2.6 HOJA DE DECISIÓN RCM .....	47
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE APLICACIÓN METODOLOGÍA RCM Y VALORIZACIÓN ECONÓMICA</b> .....	50
3.1 APLICACIÓN HOJA DE DECISIÓN: TRACKER .....	51
3.1.1 RESULTADO PRIORIZACIÓN POR RIESGO .....	51
3.1.2 RESULTADO RIESGO ANUAL EQUIVALENTE.....	52
3.2 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO .....	56
3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO .....	57
<b>CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</b> .....	58
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	60

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Fotografía panorámica con dron de planta Rinconada Sur Fuente: Gestión Solar	10
<b>Figura 1.2</b> y <b>Figura 1.3</b> Imágenes satelitales ubicación planta Fuente: Google Maps	10
<b>Figura 1.4</b> Índice de radiación UV Fuente: <a href="https://graciaproductora.com/producto/indice-radiacion-uv/">https://graciaproductora.com/producto/indice-radiacion-uv/</a>	11
<b>Figura 1.5</b> Mapa solar de América del Sur Fuente: <a href="https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/south-america">https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/south-america</a>	11
<b>Figura 1.6</b> Logo Gestión Solar	12
<b>Figura 1.7</b> Hinca Fuente: Manual Ideematec	13
<b>Figura 1.8</b> Traverse Fuente: Manual Ideematec	13
<b>Figura 1.9</b> Caracol, cuerda y tubo de torque Fuente: Manual Ideematec	13
<b>Figura 1.10</b> Montaje completo de hinca con elementos superiores y caracol Fuente: Manual Ideematec	14
<b>Figura 1.11</b> Estructura mecánica de una mesa Fuente: Manual Ideematec	14
<b>Figura 1.12</b> Mesa con montaje de paneles Fuente: Manual Ideematec	14
<b>Figura 1.13</b> Tracker compuesto por 4 mesas Fuente: Manual Ideematec	15
<b>Figura 1.14</b> Motor Fuente: Elaboración propia	15
<b>Figura 1.15</b> Paneles solares Fuente: Elaboración propia	16
<b>Figura 1.16</b> Inversor Fuente: Elaboración propia	17
<b>Figura 1.17</b> Esquema genérico del funcionamiento de una planta solar Fuente: SMA	18
<b>Figura 1.18</b> Plano del emplazamiento de trackers Rinconada Sur Fuente: SLK consultores ingeniería	19
<b>Figura 1.19</b> Recuadro de ordenes de trabajo de mantenimiento preventivo mensual realizado por oEnergy a Rinconada Sur. Fuente: oEnergy	20
<b>Figura 1.20</b> Recuadro de orden de trabajo de mantenimiento correctivo mensual realizado por oEnergy a Rinconada Sur. Fuente: oEnergy	21
<b>Figura 1.21</b> Reporte de mantenimiento preventivo en informe mensual proporcionado por oEnergy a Gestión Solar. Fuente: oEnergy	21
<b>Figura 1.22</b> y <b>Figura 1.23</b> Estado de sensores y cables en tracker posterior a mantenimiento mensual Fuente: Elaboración propia	22
<b>Figura 1.24</b> Flujograma general implementación RCM Fuente: Elaboración propia	23
<b>Figura 1.25</b> Matriz de frecuencia por consecuencia Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos.	25
Parra, C. & Crespo, A. Draft-Vol.-5-Sept.-2012	25
<b>Figura 2.1</b> Proceso RCM Fuente: <a href="https://angelmendizabal.com/mantenimiento/7-pasos-para-realizar-el-analisis-rcm">https://angelmendizabal.com/mantenimiento/7-pasos-para-realizar-el-analisis-rcm</a>	32
<b>Figura 2.2</b> Proceso FMECA. Fuente: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=tdiFxaXTsWE">https://www.youtube.com/watch?v=tdiFxaXTsWE</a>	33
<b>Figura 2.3</b> Diagrama de decisión – Registro de consecuencias de falla Fuente: Moubray	45
<b>Figura 2.7</b> Diagrama de decisión Fuente: Google imágenes	46
<b>Figura 2.4</b> Hoja de decisión: Evaluación de las consecuencias Fuente: Moubray (1997)	47
<b>Figura 2.5</b> Hoja de decisión – Criterios de factibilidad técnica Fuente: Moubray (1997)	48
<b>Figura 2.6</b> Hoja de decisión – Tareas “a falta de” Fuente: Moubray (1997)	48

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1 Taxonomía de activos: División y subdivisión de sistemas, equipos e ítems mantenibles. Fuente: Elaboración propia .....	26
Tabla 1.2 Análisis de criticidad: asignación de valores. Fuente: Elaboración propia .....	27
Para asignación de valores de impacto operacional se ha elaborado la siguiente relación: .....	28
Tabla 1.3 Relación de porcentajes impacto operacional string y módulos. Fuente: Elaboración propia .....	28
Tabla 1.4 Relación de porcentajes impacto operacional tracker y sistema motriz Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 1.5 Análisis de criticidad: resultados Fuente: Elaboración propia .....	28
Tabla 2.1 Funciones operacionales Fuente: Elaboración propia .....	34
Tabla 2.2 Fallas funcionales Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 2.3 Modos de falla Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 2.4 Efectos de falla Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 2.5 IPR – Índice de Ocurrencia Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 2.6 IPR – Índice de Severidad Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 2.7 IPR – Índice de Detección Fuente: Elaboración propia .....	38
Tabla 2.8 IPR – Impacto en la seguridad y el ambiente Fuente: Elaboración propia .....	38
Tabla 2.9 Rangos IPR Fuente: Elaboración propia .....	39
Tabla 2.10 Consecuencias de falla, cálculo del IPR Fuente: Elaboración propia .....	40
Tabla 2.11 FMECA Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 2.12 Hoja información RCM – F1 Fuente: Elaboración propia .....	42
Tabla 2.13 Hoja información RCM – F2 Fuente: Elaboración propia .....	42
Tabla 2.14 Hoja información RCM – F3 Fuente: Elaboración propia .....	43
Tabla 3.1 Resultado priorización de riesgo Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 3.2 Frecuencia por año Elaboración propia.....	52
Tabla 3.3 Valores de TPPR Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 3.4 Cálculo valor económico de potencia por hora Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 3.5 Cálculo valor IP Fuente: Elaboración propia .....	53
Tabla 3.6 Costos directos por falla Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 3.7 Hoja de decisión RCM: Tracker Fuente: Elaboración propia .....	55
Tabla 3.8 Cuadro comparativo implementación RCM Fuente: Elaboración propia .....	57

## INTRODUCCIÓN

La producción mundial de energía aumenta año tras año a un ritmo constante, la generación de energía eléctrica está predominada por combustibles fósiles en una cifra cercana al 60%, seguida por energías renovables con un 27%. Paralelamente existe un crecimiento en la concientización y educación ambiental que demanda incorporar más y nuevas tecnologías y prácticas compatibles con un desarrollo humano sostenible. Bajo este contexto las energías renovables toman un rol protagónico en el potencial crecimiento de producción energética mundial. La urgencia en el mundo por implementar políticas públicas que protejan el medioambiente está en auge y Chile no se queda fuera de esto. El país ha decidido tomar nuevos desafíos en el área de producción energética y fortalecer el crecimiento de esta área. Las energías renovables protagonizan un personaje principal en la nueva era energética de Chile.

Gracias a las características de nuestro extenso territorio, contamos con amplios sectores donde es posible la instalación de plantas fotovoltaicas con fin de obtener energía solar, Chile cuenta con el potencial para producir la totalidad de la electricidad usada por el país, mientras que el sector Norte de Chile posee la mayor incidencia solar del mundo, concentrándose la principal en el Desierto de Atacama y sus alrededores. El apogeo de construcción de parques solares genera a su vez nuevas necesidades de tecnologías y también mayor demanda en el área de mantenimiento.

El parque solar fotovoltaico Rinconada Sur tiene una extensión de aproximadamente 6500 módulos fotovoltaicos, desplegados en 124 trackers mecánicos, fue construido el año 2021-2022 por la empresa Tic Solar, basándose por el método de fabricación de la empresa Ideematec, compañía líder alemana dedicada a la fabricación y construcción de tecnología para la energía solar. La empresa opera proporcionando un manual que concentra todos los detalles macro y micro del montaje de la planta, provee el material, supervisa la construcción con asistencia diaria y coordina visitas de ingenieros alemanes especializados que verifiquen que el montaje esté en correctas condiciones para operar.

Posterior a la puesta en marcha, la empresa Gestión Solar subcontrata a la empresa oEnergy para realizar el mantenimiento de la planta, con el transcurso de los meses el servicio proporcionado a la planta no es el esperado, se decide desvincular la empresa subcontratista y buscar otra propuesta de mantenimiento más eficiente. Siendo esta problemática la motivación para la elaboración de un plan de mantenimiento que rescata la propuesta inicial mejorando los aspectos necesarios según este estudio para aumentar la confiabilidad considerando costos asociados.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Proponer una mejora al plan de mantenimiento actual centrado en la confiabilidad implementando el método RCM para un sistema crítico de la planta Rinconada Sur, determinado por jerarquización de sistemas y de modos de fallo.

### **ESPECÍFICOS**

- Evaluar de manera sistemática los aspectos críticos de la planta fotovoltaica Rinconada Sur a través de un análisis de criticidad semicuantitativo, considerando el contexto operativo y la recopilación de datos de la empresa.
- Jerarquizar modos de fallo a través de un análisis FMECA definiendo actividades de mantenimiento para el sistema crítico.
- Definir actividades de mejora que puedan incorporarse al plan de mantenimiento actual de la planta Rinconada Sur, con el propósito de optimizar la operación y eficiencia, valorizándolo mediante un estudio económico.

**CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES DEL PROYECTO PLANTA FOTOVOLTAICA  
RINCONADA SUR**

## 1.1 PLANTA FOTOVOLTAICA RINCONADA SUR

Rinconada Sur es un proyecto Fotovoltaico de 3MW que ocupa una superficie de 8 Ha, construido el año 2021-2022 en manos de la empresa TIC SOLAR, constructora de GESTIÓN SOLAR. La tecnología utilizada proviene de la empresa alemana Ideematec, líderes en el mercado de energía solar, destaca como el principal proveedor mundial de sistemas de seguimiento solar.



*Figura 1.1 Fotografía panorámica con dron de planta Rinconada Sur*

*Fuente: Gestión Solar*

### 1.1.1 ANTECEDENTES GEOGRÁFICOS

El proyecto fotovoltaico Rinconada Sur, está ubicado en el sector de **Rinconada de Silva**, pueblo rural perteneciente a la comuna de Putaendo, en la provincia de San Felipe de Aconcagua, región de Valparaíso, Chile.



*Figura 1.2 y Figura 1.3 Imágenes satelitales ubicación planta*

*Fuente: Google Maps*

En la imagen satelital se puede considerar perfectamente la posición y alineamiento de los trackers. También se aprecia que la geografía del sector es montañosa, con algunas cuencas. Debido a esta característica del terreno es que se realizó un estudio hídrico con un horizonte de evaluación de 100 años, para confirmar que dichas cuencas no tendrían caudales significativos que pudiesen afectar la instalación del parque, o viceversa, que la estructura del parque interviniera en la formación natural del sector impidiendo el libre tránsito de las aguas. Con el estudio realizado por un hidrólogo chileno se descartó esta variable. El clima de la zona es principalmente tipo semi desértico a tipo templado mediterráneo. La radiación UV en temporada de verano llega en ocasiones al índice 11, extremo. Y la temperatura fluctúa entre los 25° a 31°.

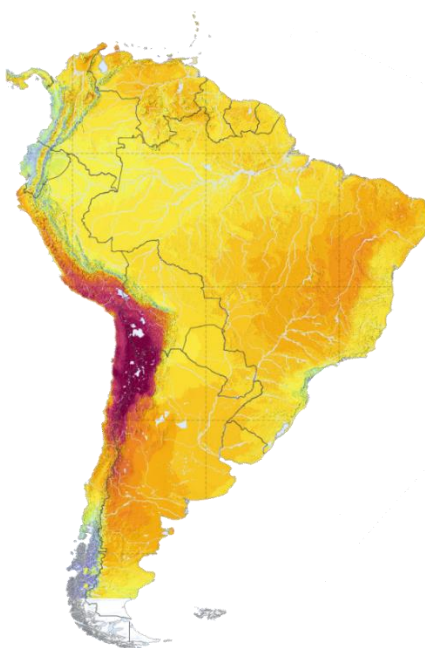


**Figura 1.4** Índice de radiación UV

Fuente: <https://graciaproductora.com/producto/indice-radiacion-uv/>

Este es un mapa solar de América del Sur, donde podemos visualizar enseguida la gran concentración de radiación solar en la zona Norte y Centro de Chile, Argentina, Suroeste de Bolivia y sur de Perú. Precisamente en toda la zona desértica de Latinoamérica.

Se logra visualizar la ubicación privilegiada en cuanto a radiación solar en la que se encuentra Rinconada Sur.



**Figura 1.5** Mapa solar de América del Sur

Fuente: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/south-america>

### 1.1.2 GESTIÓN SOLAR

Gestión Solar es una compañía chilena dedicada a la generación de energía eléctrica mediante el proceso fotovoltaico. La empresa consta de un staff completo para el desarrollo, la ingeniería, la construcción y la operación de plantas solares fotovoltaicas en el país, con oficinas en la ciudad de Santiago. Gestión Solar nace en 2015, a partir de un largo estudio del naciente mercado de energía solar en Chile, que motiva al directorio a ingresar al mercado de la generación eléctrica a través de plantas PMGD. Su propósito es ser un socio activo en la generación de energía eléctrica en la modalidad de generación distribuida, a fin de reducir la producción de energía basada en combustibles fósiles.

Gestión solar está presente en el mercado nacional desde 2018 a través de la construcción de plantas a cargo de TIC SOLAR SPA, empresa constructora derivada de Gestión Solar. Una de sus motivaciones como empresa es contribuir con la generación de energía limpia y renovable, ayudando a avanzar en las metas de carbono neutralidad que el Estado de Chile promueve. Se destaca por su excelente estándar de calidad en instalación y montaje, última tecnología e incluso apreciación estética de las plantas que construyen.



*Figura 1.6 Logo Gestión Solar*

### 1.1.3 SISTEMAS, COMPONENTES Y EQUIPOS

En cuanto a los sistemas de la planta, se pueden clasificar en dos categorías principales: sistema mecánico y sistema eléctrico.

#### ❖ Sistema mecánico

El sistema mecánico incluye componentes como engranajes, ejes, sensores de posición y el propio motor. Los sensores detectan la posición actual del sol, y el motor ajusta la orientación de los paneles para seguir la trayectoria solar.

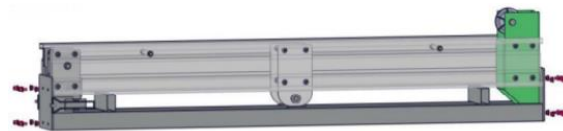
Para poder comprender toda la estructura y las partes que lo integran, se explica desde el orden constructivo mencionando solamente los ítems más característicos, ya que para el correcto funcionamiento hay muchas piezas conformando la estructura:

- Hincas: poste metálico que va directamente anclado al suelo a través de un proceso de hincado, con maquinaria especializada (hincadora), o por medio de una fundación con hormigón que pueda sostener el pilar. Rinconada sur tiene **496 hincas**.
- Traverse: elemento conectado a la parte superior de la hinca, perpendicular a ella, de manera horizontal y centrado. Proporciona estabilidad a la matriz de paneles solares al sostenerlos y distribuir el peso de manera uniforme a lo largo de la estructura de soporte.



**Figura 1.7 Hincas**

Fuente: Manual Ideematec



**Figura 1.8 Traverse**

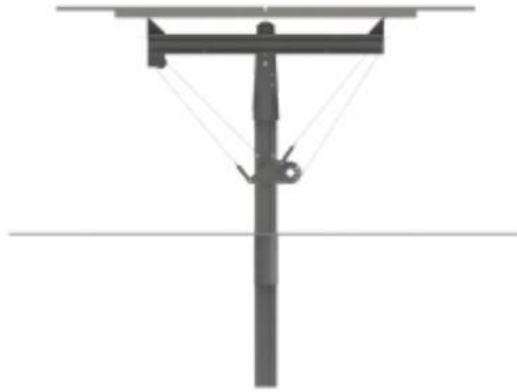
Fuente: Manual Ideematec

- Tubos de torque: eje que conecta una hincas con otra, por medio de una placa justo en el centro del largo de la hincas, va conectado también a un motor que lo energiza para realizar rotación, mediante esta rotación la estructura se mueve, ya que el traverse va conectado al tubo de torque por cuerdas, como se puede apreciar en la imagen. De esta manera la estructura superior puede conseguir la inclinación de este a oeste.
- Cuerdas: elementos que se utilizan para conectar los tubos de torque con los traverse, para otorgar tensión entre una hincas y otra (sistema antisísmico), para generar firmeza en zona superior de la estructura y entre marcos principales antes de colocar paneles.



**Figura 1.9 Caracol, cuerda y tubo de torque**

Fuente: Manual Ideematec



**Figura 1.10** Montaje completo de hincas con elementos superiores y caracol

*Fuente: Manual Ideematec*

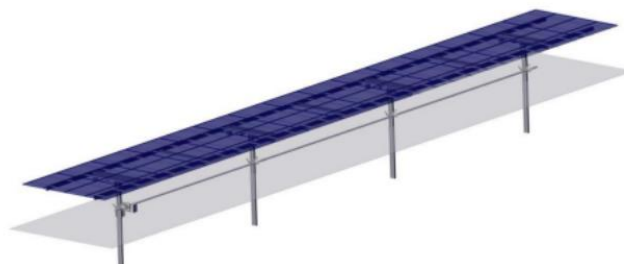
- Marcos principales: pilares paralelos al tubo de torque, conectan un traverse con otro de manera horizontal, otorgando la formación de una mesa. Posteriormente sobre los marcos principales se colocan barras perpendiculares, entre ambos marcos, en las cuales van puestos los paneles. En la siguiente imagen se puede apreciar los marcos principales montados en los extremos de cada traverse.



**Figura 1.11** Estructura mecánica de una mesa

*Fuente: Manual Ideematec*

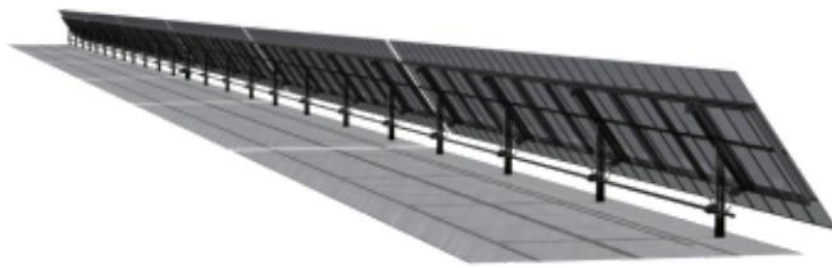
- Mesa: estructura que soporta 52 módulos fotovoltaicos, contempla 4 hincas con sus respectivos traverse, 6 marcos principales, 3 tubos de torque. **Rinconada Sur tiene 124 mesas.**



**Figura 1.12** Mesa con montaje de paneles

*Fuente: Manual Ideematec*

- Tracker: contempla todo el sistema que permite el funcionamiento de rotación de los paneles. Un tracker puede estar compuesto por una o más mesas, en Rinconada Sur hay trackers de 1 a 5 mesas. Cada tracker posee tu motor independiente, esta es la mayor diferenciación entre tracker y mesa. Cada tracker tiene su numeración indicada en el motor, esto sirve para identificar cualquier tipo de observación. Rinconada sur cuenta con **57 trackers de Ideematec; Sistema H4plus – 2V4 – 26 M**. Esta sigla representa el modelo – Vertical de dos módulos – 26 módulos a lo largo Inclinación máx.  $55^{\circ}/+55^{\circ}$ , Offset to north-south direction:  $0.0^{\circ}$ .  
PV-Power dc total: 3417,440 [ KWp] (capacidad del sistema para generar energía en su punto pick de rendimiento).



*Figura 1.13 Tracker compuesto por 4 mesas*

*Fuente: Manual Ideematec*

- Motor: hay 1 motor, por cada tracker, independiente de la cantidad de mesas que sean, un total de 57 motores. Su función es la de energizar el eje para que este pueda rotar a una velocidad de 0.01 rpm. Potencia del motor: estándar 40 W.



*Figura 1.14 Motor*

*Fuente: Elaboración propia*

## ❖ Sistema eléctrico

El sistema eléctrico comprende todos los componentes y dispositivos necesarios para la generación, conversión y distribución de la energía eléctrica producida por los paneles solares. A continuación, se describen los principales elementos del sistema eléctrico fotovoltaico de Rinconada Sur:

- Módulos fotovoltaicos: **Paneles Jinko bifaciales**<sup>1</sup> de 530 Watts de potencia, dimensiones 2274/ 1134/ 35 [ 5 mm], 6.448 módulos fotovoltaicos. Son los dispositivos encargados de convertir la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Están compuestos por células solares que generan corriente continua (CC) cuando son expuestas a la luz solar. **Solar Module Type: JKM465M-7RL3-V.**



*Figura 1.15 Paneles solares*

*Fuente: Elaboración propia*

- Inversor: **Inversor SMA<sup>2</sup> Sunny Central 3000**, Potencia de 3000kVA en tensiones de sistema de CC 1100V o 1500V. Permite planificación eficiente de la planta y una reducción de los costes específicos en centrales fotovoltaicas. Posee un sistema de refrigeración inteligente OptiCool que asegura un funcionamiento libre de fallos incluso con las temperaturas ambiente extremas, plena potencia hasta los 35°C. Vida útil de 25 años. El inversor es el componente clave en un parque solar. Su función principal es convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA).

---

<sup>1</sup> Paneles Jinko Bifaciales: poseen una avanzada tecnología que genera que puedan absorber radiación solar por ambas superficies, la eficiencia es mucho mayor.

<sup>2</sup> SMA: Solar Technology AG, fabricante de inversores para energía solar con mayor facturación a nivel mundial.



*Figura 1.16 Inversor*

*Fuente: Elaboración propia*

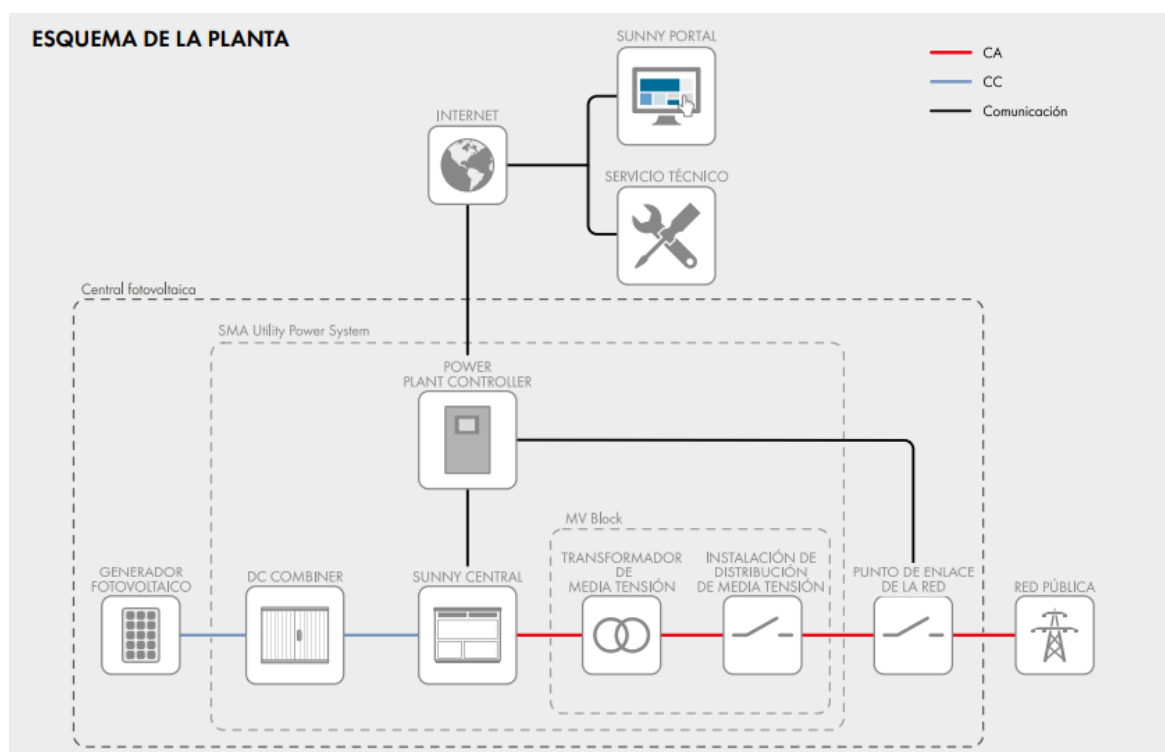
- Transformador: El inversor Sunny Central cuenta con **un transformador integrado de 8,4 kVA**, que opera también como alimentación auxiliar interna, para componentes como sistemas de control, comunicación y monitoreo, independiente de la cantidad de energía solar que esté siendo generada en ese momento. La presencia de esta fuente de energía auxiliar es crucial para garantizar que el inversor pueda operar de manera segura y confiable, incluso cuando la energía solar es baja o nula.
- String<sup>3</sup> Box: 12 string box **Weidmuller**, 10 están operativas. Voltaje de 1500 VOLT, 16 a 30 circuitos, operan establemente con 24 cada una, este circuito es representado físicamente por un fusible, cada circuito de string comprende 26 paneles solares, la mitad de una mesa, en términos de potencia 12.5 kW. Generalmente más conocidas como Combiner Box, es el concepto más innovador para inversores de string, la función de este componente es agrupar las salidas de varios paneles solares en cadenas (strings) para luego dirigirlos al inversor de manera más simplificada y facilitando la gestión de las conexiones. Cada string box tiene su propio conjunto de módulos fotovoltaicos asociados conectados de manera secuencial. Además, presenta dispositivos de protección y monitoreo.
- Sistema de monitoreo y control: Se utilizan sistemas de monitoreo para supervisar el rendimiento de la planta, recopilar datos de generación y asegurar un funcionamiento eficiente. Los sistemas de control automatizan procesos y pueden ajustar la orientación de los paneles o la carga en función de las condiciones cambiantes. También se considera la estación meteorológica como ítem eléctrico, incluye piranómetros y sensores.

---

<sup>3</sup> String o conexión de strings: se refiere a la conexión de paneles solares en serie, formando una “cadena”, esta conexión en serie implica que la corriente fluye a través de cada panel en la cadena, antes de pasar al siguiente,

- Punto de conexión: **POI**, compuesto de 4 postes, transformador, reconectador, equipo de compacto de medida, medidor, mufas con cable de media tensión.
- Sala de control: Estación desde donde se monitorea y controla el funcionamiento de toda la instalación, se encuentran los tableros: SCADA<sup>4</sup>, Panel PC (Aurora), rack de batería, GPM.

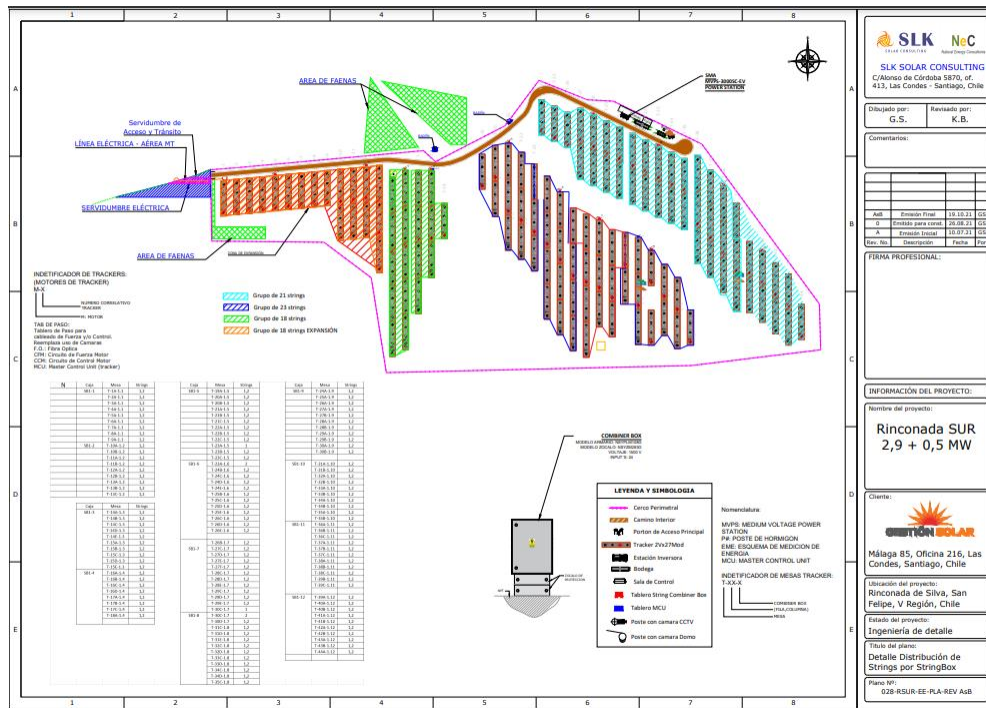
En la siguiente imagen se presenta un esquema del funcionamiento eléctrico general de la planta. La energía es captada por el módulo fotovoltaico como corriente continua, esta es trasladada a través de las canalizaciones de cables string presentes en cada tracker, a los dispositivos Combiner Box, los string son agrupados y derivados al inversor, donde la corriente continua es transformada en corriente alterna de baja tensión. Para conectarse a la red eléctrica de distribución (salida), es necesario ajustar la tensión, en este punto el transformador es el encargado de elevar la tensión de salida del inversor a un nivel de media tensión, posterior a este proceso la energía puede salir a través de la canalización de media tensión de la planta, hasta el punto de conexión (POI), donde conecta la planta con la red pública. Todo este proceso monitoreado y controlado desde la sala de control y también con visualización vía internet.



**Figura 1.17** Esquema genérico del funcionamiento de una planta solar

Fuente: SMA

<sup>4</sup> SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): sistema encargado de supervisar y controlar los procesos de la planta. Proporciona una interfaz gráfica para que los operadores monitoreen el rendimiento y realicen ajustes según sea necesario.



**Figura 1.18** Plano del emplazamiento de trackers Rinconada Sur

Fuente: SLK consultores ingeniería

## 1.2 MANTENIMIENTO

De manera introductoria, en el área de plantas fotovoltaicas, el mantenimiento tiene un enfoque más preventivo, en cuanto a porcentaje de actividades de carácter preventivo y correctivo, la cifra es bastante superior. También se utilizan técnicas predictivas, pero es menos común encontrar empresas que realicen actividades predictivas como parte de sus planes anuales. La periodicidad de tareas más frecuente es mensual y anual.

Los aspectos clave que deben estar incluidos en un buen plan de mantenimiento son los siguientes:

- Inspecciones regulares: inspecciones visuales regulares de paneles, cables, conexiones, estructura mecánica, integridad de soportes, etc.
- Limpieza: especialmente en los paneles, tableros, equipos y componentes principales.
- Termografía: identificación de hotspot en paneles.
- Mantenimiento sistema motriz: limpieza, lubricación, verificación de buen estado anclaje, etc.
- Revisión de todo sistema de comunicaciones, sistema de monitoreo.
- Mantenimiento especializado inversor.
- Pruebas eléctricas.

El mantenimiento correctivo abarca todas las actividades relacionadas con reparaciones realizadas a una planta fotovoltaica por el equipo de técnicos en terreno. Dicho mantenimiento

se lleva a cabo luego de una detección de una falla o anomalía en cualquier componente o equipo que forme parte de la planta. Las detecciones de fallas pueden ser de dos orígenes; mediante inspecciones de calidad realizadas en terreno o a través del equipo de monitoreo y operación remota de la planta.

En caso de realizar un mantenimiento correctivo que requiera una desconexión importante de un área de la planta, o de la planta completa, dichos trabajos se realizaran durante la noche o en horas de baja irradiación a modo de no ver afectada la generación de energía de la planta, aplica también para mantenimiento preventivo.

Todo trabajo de mantenimiento correctivo debe pasar por una fase de evaluación que consta de tres etapas:

1. Diagnóstico de fallas
2. Reparación temporal
3. Reparación

Gestión Solar optó por subcontratar a la empresa oEnergy para realizar el mantenimiento a Rinconada Sur. El plan se basa principalmente en tareas de mantenimiento preventivo con periodicidad mensual, otras actividades anuales y mantenimiento correctivo cuando sea necesario. Además, el plan de mantenimiento incluye lavado de paneles, que debe realizarse tres veces al año, realizado por un equipo especializado en esta tarea y también control de vegetación cada vez que sea necesario. También cabe destacar que cuando llueve los paneles son colocados en posición de limpieza, utilizando este recurso para limpiar los paneles, esto no evita que se realicen de igual forma los tres lavados anuales programados. Se cuenta con los informes mensuales, trimestrales y anuales de oEnergy, los cuales serán analizados para inferir criticidad.

A continuación, se presentan cuadros de actividades de mantenimiento realizadas en el mes de noviembre 2022, son tareas con periodicidad mensual.

OT	Tarea
6652	Inversores y transformadores - Verificar el estado de aisladores, conexiones y barras colectoras.
6651	Switchgear - Inspección visual general
6650	Inversores y transformadores - Inspección de ruidos anormales en inversores, transformadores, etc.
6649	Inversores y transformadores - Inspección visual del transformador y conexiones
6648	Inversores y transformadores - Chequeo e inspección del estanque de aceite del transformador instalado, en búsqueda de posibles fugas.
6647	Inversores y transformadores - Inspección visual de los instrumentos del transformador
6646	Inversores y transformadores - Verificación del estado y fecha de inspección de extintores de incendio (polvo AB/C02)
6645	Switchgear - Inspección visual externa de la barra colectora de puesta a tierra externa.
6644	Switchgear - Disponibilidad de instrucciones de señalización, llaves de puerta y cerradura.
6643	Switchgear - Comprobación del estado de los ductos y puesta a tierra de las partes metálicas (bandejas).
6642	Sistema de monitoreo - Instalación correcta de sensores, estabilidad, fijación, etc.
6641	Sistema de monitoreo - Verificación del funcionamiento del sistema de alimentación auxiliar
6640	Sistema de monitoreo - Inspección visual de alarmas y datos recuperados en dataloggers
6639	Sistema de monitoreo - Verificación del estado correcto del cableado de comunicación a los dispositivos en terreno
6638	Sistema de Seguridad - Comprobar la definición y la claridad de las imágenes
6637	Sistema de Seguridad - Verificar las fuentes de energía del equipo de seguridad
6636	Otros - Verificar y recortar la vegetación en el perímetro y en las zonas de seguridad
6635	Otros - Verificar y recortar la vegetación en áreas cercanas a edificios, cobertizos y tableros.
6634	Otros - Inspección visual de fijación y anclaje de cierre perimetral.
6633	Otros - Verifique el correcto funcionamiento de las cerraduras, candados y cierre de la puerta.
6632	Otros - Inspeccionar el estado del cerco del cierre perimetral.
6631	Otros - Inspeccionar el estado de las puertas de acceso.
6630	Línea de Media Tensión - Inspección visual
6629	Switchgear - Verificación de la presión SF6 de switch y otros componentes.
6628	Switchgear - Inspección del funcionamiento de los indicadores LED
6627	Otros - Verificar el estado de corrosión del cerco, proceder a pintar si es necesario.
6626	Estructuras soportantes y trackers - Funcionalidad y rigidez de trackers
6625	Estructuras soportantes y trackers - Inspección visual en la deformación de los perfiles de acero y aluminio.
6624	Switchgear - Estado y condiciones de los relés de Swtichgears
6623	Estructuras soportantes y trackers - Chequeo de ruidos anormales, fugas de engranajes y rodamientos sellados.

**Figura 1.19** Recuadro de ordenes de trabajo de mantenimiento preventivo mensual realizado por oEnergy a Rinconada Sur. Fuente: oEnergy

Y las siguientes tareas de mantenimiento correctivo

ID de Orden de Trabajo	Tarea
6771	Cables sueltos T34

**Figura 1.20** Recuadro de orden de trabajo de mantenimiento correctivo mensual realizado por oEnergy a Rinconada Sur. Fuente: oEnergy

### 1.3 PROBLEMÁTICA

La compañía Gestión Solar, trabaja con dos empresas consultoras de energía solar:

- ❖ SLK, empresa española de ingeniería fotovoltaica: han desarrollado el área de ingeniería de la construcción de las plantas, diseño, planos y cálculos principalmente.
- ❖ Natural Energy Consultores, empresa chilena de la comuna de Quillota: han trabajado en el área eléctrica y como supervisión presencial en los proyectos.

Desde la puesta en marcha de la planta Rinconada Sur, oEnergy ha sido brindado el servicio de mantenimiento, los reportes mensuales que ha generado son revisados por ambas empresas consultoras, quienes supervisan el trabajo de oEnergy.

En el siguiente cuadro, se presenta un ejemplo, de un reporte de mantenimiento preventivo entregado por oEnergy, en el mes de julio 2022, donde se describe que se ha realizado la actividad de inspeccionar visualmente el estado del sistema de monitoreo, incluyendo sensores y cableados.

○ Mantenimiento Preventivo	
Fecha de la actividad	11 de Julio de 2022
Descripción de la actividad	Inspección visual del estado del sistema de monitoreo, sensores, cableado y electrónica (comunicaciones).
Comentarios	Sin observaciones
	

**Figura 1.21** Reporte de mantenimiento preventivo en informe mensual proporcionado por oEnergy a Gestión Solar. Fuente: oEnergy

Posteriormente, la empresa consultora Natural Energy ha visitado Rinconada Sur, en fechas distintas con fin de inspeccionar visualmente el estado de la planta. Y en reiteradas visitas ha

encontrado desperfectos, componentes como sensores en mal estado, que no han sido retirados, ni cambiados, equipos con evidente falta de limpieza, cableado suelto, entre otros detalles.

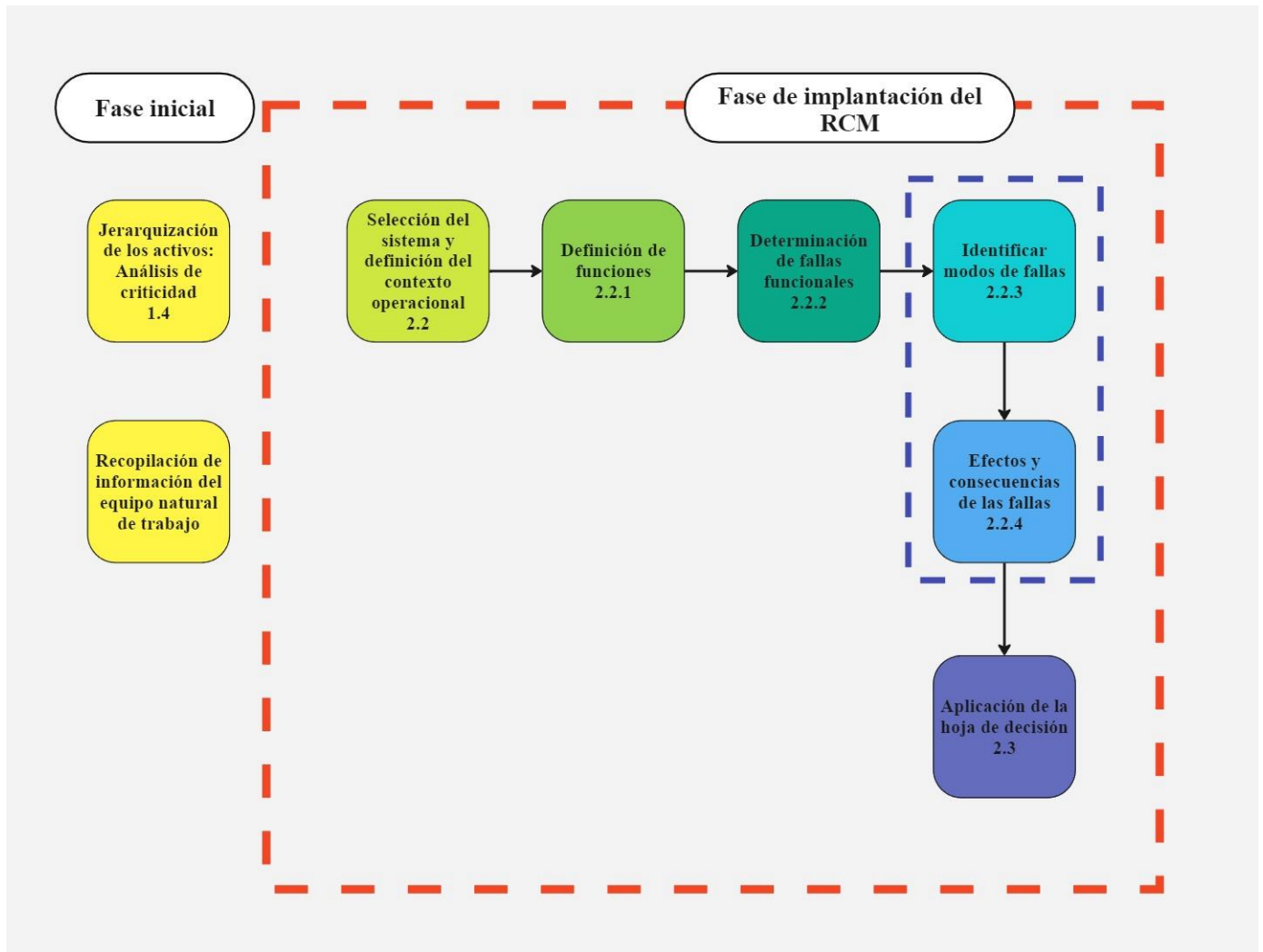


*Figura 1.22 y Figura 1.23 Estado de sensores y cables en tracker posterior a mantenimiento mensual*

*Fuente: Elaboración propia*

Luego del transcurso de varios meses y de plantear la situación entre los involucrados, aún se considera que el mantenimiento no cumple con los estándares a los que aspira el cliente. Gestión Solar toma la decisión de desvincular a la empresa oEnergy del mantenimiento de la planta y asignarlo a los consultores SLK y Natural Energy. Ambas empresas deciden tomar como base inicial el plan de mantenimiento que se lleva ejecutando hasta la fecha, pero en busca de implementar mejoras, y rediseñar lo que sea necesario para comenzar el año 2024 con un programa de mantención optimizado. Se plantea realizar un análisis de criticidad para identificar el punto crítico, al cual aplicar la metodología RCM y definir tareas de mejora.

### 1.3.1 FLUJOGRAMA DE IMPLANTACIÓN DEL RCM



*Figura 1.24* Flujograma general implementación RCM

*Fuente: Elaboración propia*

## 1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

### 1.4.1 METODOLOGÍA

El análisis de criticidad es una metodología que permitirá jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global. Utilizando datos de reportes de fallas proporcionados por Gestión Solar, e informes de mantenimiento mensuales realizados por oEnergy. Esto ayudará a establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos para las actividades de mantenimiento que nos planteamos mejorar. Desde el punto de vista matemático, la criticidad se puede expresar como: **frecuencia por consecuencia**. Donde la frecuencia la veremos asociada al número de eventos o fallas que encontraremos en un elemento o sistema, y la consecuencia va

relacionada con el impacto y flexibilidad operacional, costos de reparación, impactos de seguridad y ambiente.

Según el contexto y en base a los datos proporcionados por la planta, se selecciona el modelo de criticidad semicuantitativo CTR, modelo de criticidad total por riesgo. El modelo propuesto está basado en la estimación del factor Riesgo a través de las siguientes expresiones:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C}$$

Donde:

- ❖ **CTR** = Criticidad total por riesgo
- ❖ **FF** = Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado fallos/año)
- ❖ **C** = Consecuencias de los eventos de fallos.

Se considera:

$$C = (\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}$$

Siendo:

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costes de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times ((\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA})$$

A continuación, se presentan los factores ponderados diseñados para el proceso de jerarquización de los factores de frecuencia y consecuencias de fallos:

❖ **Factor de frecuencia de fallos (FF) (escala 1 - 4)**

4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año

3: Promedio: 1 y 2 eventos al año

2: Bueno: entre 0,5 y un 1 evento al año

1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año

❖ **Factores de Consecuencias (escala 1 - 5)**

• **Impacto Operacional (IO) (escala 1 - 10)**

10: Pérdidas de producción superiores al 75%

7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%

5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%

3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%

1: Pérdidas de producción menor al 10%

• **Impacto por Flexibilidad Operacional (FO) (escala 1 - 4)**

4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes

2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios

1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños

- **Impacto en Costes de Mantenimiento (CM) (escala 1 - 3)**

3: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a \$10.000.000

2: Costes de reparación, materiales y mano de obra entre \$1.500.000 y \$10.000.000

1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a \$1.500.000

- **Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) (escala 1 - 7)**

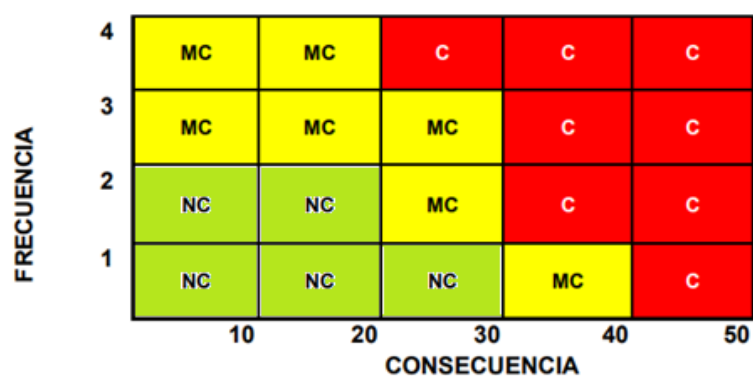
7: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos

5: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración

3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas

1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4x4. El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal (se toma el resultado final de la expresión:  $(IO \times FO) + CM + SHA$ ). La matriz de criticidad mostrada a continuación permite jerarquizar los sistemas en tres áreas: - Área de sistemas No Críticos (NC) - Área de sistemas de Media Criticidad (MC) - Área de sistemas Críticos (C).



**Figura 1.25** Matriz de frecuencia por consecuencia

Fuente: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos

Parra, C. & Crespo, A. Draft-Vol.-5-Sept.-2012

## 1.4.2 TAXONOMÍA DE ACTIVOS FÍSICOS

La taxonomía es definida por la norma ISO 14224:2016 como una “clasificación sistemática de ítems en grupos genéricos basados en factores comunes a varios de los ítems”.

Los componentes y equipos de la planta son categorizados por sistema, para poder trabajar con ellos de una manera más general, ya que son demasiados componentes para analizarlos de manera individual, se propone jerarquizar por sistema, dentro de los cuales se identifican los equipos principales (no todos los componentes de cada sistema) y los respectivos ítems mantenibles asociados. Se elabora la siguiente tabla:

<b>Sistema/Sección</b>	<b>Equipo</b>	<b>Ítem mantenible</b>
<b>POI (Punto de conexión)</b>	Reconectador	Tablero de control del reconectador
	Equipo compacto medida	Aisladores
	Transformador de servicio auxiliar	Prensas Mufas
	Línea de media tensión	Desconectores
<b>Inversor</b>	Celda baja tensión	Barras colectoras
	Transformadores de servicio auxiliar	Interruptores, desconectores Mecanismo de cierre y apertura
	Stack de electrónica de potencia	Tarjeta de control (stack) Ventiladores (rodamientos)
	Transformador (CC a CA)	Relé de protección Sensores de nivel de aceite Sensores de temperatura Barras colectoras
	Celda de media tensión	Sensor de presión de gas SF <sub>6</sub>
	Transformador (600V a 12000V) Interruptor de potencia	(hexafluoruro de azufre) Terminales, fijaciones
<b>String Box</b>	Fusibles	Anclajes, cerraduras
	Tarjetas de comunicación	Fusileras
	Desconectador	Protecciones eléctricas
<b>Módulos fotovoltaicos</b>	Paneles	Conectores MC4 (interconexión de paneles y salida de cables string)
	Circuito cable string	Elementos de sujeción
<b>Estructura</b>	Trackers	Hincas, traverse, piolas, caracoles,
	Sistema motriz	Motor

*Tabla 1.1 Taxonomía de activos: División y subdivisión de sistemas, equipos e ítems mantenibles. Fuente: Elaboración propia*

### 1.4.3 APLICACIÓN A SISTEMAS DE PLANTA RINCONADA SUR

Para la aplicación del método de criticidad se elabora una tabla donde se identifican todos los equipos a analizar en la primera columna, son 18 equipos subdivididos por sistema y en la fila superior se ubican los criterios de evaluación a utilizar. Esta combinatoria forma casillas independientes para cada equipo y criterio a evaluar, un total de 5x18 casillas donde se asigna un valor determinado según criterio que representa un parámetro de evaluación. Consecutivamente de la asignación de valores realizada en conjunto con expertos de la empresa, se aplica la fórmula:  $C = (IO \times FO) + CM + SHA$ , para cálculo de la consecuencia total, representada en la sexta casilla disponible en la última columna de la primera tabla. Posterior se realiza una siguiente tabla donde se ubican los equipos en una columna, la frecuencia de fallas y la consecuencia total, se procede a calcular  $FF \times C$  que nos indicará la **criticidad total por riesgo**, se ordena esta columna de valores obtenidos de mayor a menor, para visualizar desde equipos críticos a no críticos. Finalmente, estos resultados son evaluados en la matriz de criticidad, donde se indicará en que categoría de criticidad se encuentran. El objetivo de este análisis es identificar que sistemas y equipos son los más críticos, según la información que se dispone, para decidir con que equipos es conveniente aplicar la metodología RCM.

A continuación, la tabla de asignación de valores de frecuencia de fallas y cálculo de consecuencia:

Sistemas identificados		Frecuencia de fallas	Impacto operacional	Impacto por flexibilidad operacional	Impacto en costes de mantenimiento	Impacto SHA	Total Consecuencia
POI	Reconectador	1	10	2	3	3	26
	Equipo de compacto medida	1	1	2	3	3	8
	Transformador de servicio auxiliar	1	1	2	2	1	5
	Línea de media tensión	1	10	2	2	3	25
Inversor	Celda baja tensión	1	10	4	3	7	50
	Transformadores de servicio auxiliar	1	1	4	3	1	8
	Stack de electrónica de potencia	2	7	4	3	3	34
	Transformador (CC a CA)	2	10	4	3	7	50
	Celda de media tensión	2	10	4	3	7	50
	Transformador (600V a 12000V)	1	10	4	3	7	50
	Interruptor de potencia	1	5	4	3	1	24
String Box	Fusibles	4	1	1	1	3	5
	Tarjetas de comunicación	4	1	1	1	1	3
	Desconectador	4	3	1	1	1	5
Módulos fotovoltaicos	Paneles	4	1	2	1	3	6
	Circuito string	4	1	2	1	3	6
Estructura	Trackers	4	1	2	3	1	6
	Sistema motriz	4	1	1	2	1	4

**Tabla 1.2** Análisis de criticidad: asignación de valores. Fuente: Elaboración propia

*Para asignación de valores de impacto operacional se ha elaborado la siguiente relación:*

Porcentaje	Potencia kW	String Box	Circuito (fusible)	Mesas	Paneles
100%	3000	10	240	124	6448
10%	300	1	24	12	624
0,8333%	25	0,083333	2	1	52
0,4167%	12,5	0,041667	1	0,5	26
0,0160%	0,48076923	0,001603	0,038461538	0,0192308	1

*Tabla 1.3 Relación de porcentajes impacto operacional string y módulos.  
Fuente: Elaboración propia*

Para tracker y estructura motriz se considera que hay tracker de 1 a 5 mesas, se calcula el rango de valores y se obtiene que, en el caso menos favorable, de una falla, el porcentaje sería menor a 10% en todos los casos.

Motor	Tracker	Mesa	Porcentaje
1	1	1	0,8333%
1	1	2	1,6667%
1	1	3	2,5000%
1	1	4	3,3333%
1	1	5	4,1667%

*Tabla 1.4 Relación de porcentajes impacto operacional tracker y sistema motriz  
Fuente: Elaboración propia*

Los resultados obtenidos del análisis de criticidad por riesgo total son los siguientes:

N°	Equipos	Frecuencia de fallas	Total consecuencia	Frecuencia x Consecuencia
1	Transformador (CC a CA)	2	50	100
2	Celda de media tensión	2	50	100
3	Stack de electrónica de potencia	2	34	68
4	Celda baja tensión	1	50	50
5	Transformador (600V a 12000V)	1	50	50
6	Reconectador	1	26	26
7	Línea de media tensión	1	25	25
8	Interruptor de potencia	1	24	24
9	Paneles	4	6	24
10	Circuito string	4	6	24
11	Trackers	4	6	24
12	Fusibles	4	5	20
13	Desconectador	4	5	20
14	Sistema motriz	4	4	16
15	Tarjetas de comunicación	4	3	12
16	Equipo de compacto medida	1	8	8
17	Transformadores de servicio auxiliar	1	8	8
18	Transformador de servicio auxiliar	1	5	5

*Tabla 1.5 Análisis de criticidad: resultados  
Fuente: Elaboración propia*

Como resultados del análisis de criticidad realizado se resume lo siguiente:

- Los activos críticos son principalmente los equipos y componentes asociados al inversor, transformador de CC a CA y celda de media tensión.
- En activos con criticidad media hay componentes del POI y del sistema de corriente continua previos al inversor. En este rango de valores están las unidades que tienen mayor frecuencia de fallas en la planta, los paneles, circuito string, trackers y fusibles.
- Los activos no críticos, son solamente 3 de los 18 que se contemplaron para el análisis, los transformadores de servicio auxiliar y equipo de compacto medida.
- Impacto operacional: hay 6 equipos que si fallan como consecuencia hay un detenimiento total de la planta, versus 9 componentes que su falla es bastante mínima en valor de porcentaje por unidad, pero en la planta se cuenta con muchas unidades de cada equipo, por lo que las fallas de ese tipo son frecuentes.
- Impacto por flexibilidad operacional: los principales equipos son de marcas extranjeras y conseguir repuestos o sustitución es a costos altísimos y tiempos de espera de mínimo un par de semanas. En cuanto a los sistemas de equipos más pequeños hay suficiente mercado para conseguir repuestos. Los elementos que cuentan con unidades en línea son los menos.
- Impacto en costes de mantenimiento: nuevamente bajo este criterio, los equipos más críticos relacionados al inversor tienen costes muy elevados de mantenimiento.
- Impacto SHA: transformadores y celdas son los componentes que al fallar pueden generar impactos catastróficos medioambientales y de alto riesgo para la vida humana, como incendios, derrames de aceite del transformador, descargas eléctricas de alto voltaje- En los demás sistemas los riesgos ambientales y de salud son mínimos.

**CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE METODOLOGÍA RCM PARA EQUIPO  
PRIORIZADO**

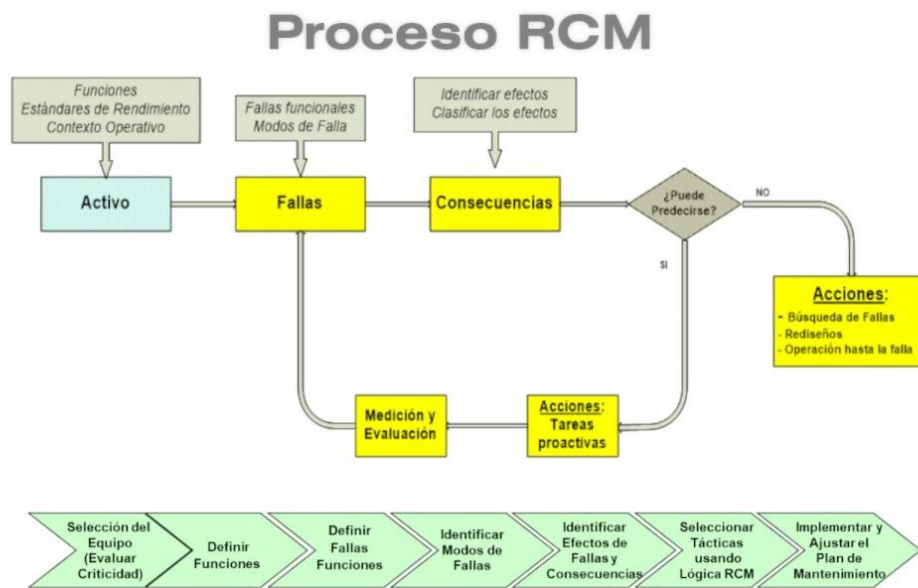
## 2.1 METODOLOGÍA RCM

RCM, sigla que representa Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, *“es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”* (Moubray, 2004, pág. 7). Esta metodología es altamente reconocida para elaborar planes de mantenimiento incluyendo todo tipo de estrategias, como mantenimiento preventivo, predictivo, búsqueda de fallas, entre otros. Inicialmente se desarrolla en la industria de aviación, con fin de mejorar la seguridad y confiabilidad para sus equipos. Es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento, con fin de desarrollar programas íntegros basándose en la confiabilidad de los equipos, además de identificar tareas de mantenimiento, también se utiliza como marco de referencia para analizar riesgos en equipos, jerarquizar, detectar áreas de oportunidad de mejora, entre otras utilidades.

Para la aplicación de la metodología RCM se han establecido siete preguntas que se deben satisfacer en el proceso:

- 1) ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- 2) ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- 3) ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- 4) ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- 5) ¿En qué sentido es importante cada falla?
- 6) ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- 7) ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

En 1999 es publicada la norma SAE JA1011, con el propósito de establecer los criterios que un proceso debe cumplir para ser considerado RCM, consta de un documento de 12 páginas que describe los requerimientos mínimos y que también puede servir como guía.



**Figura 2.1** Proceso RCM

Fuente: <https://angelmendizabal.com/mantenimiento/7-pasos-para-realizar-el-analisis-rcm>

## 2.2 FMECA

La metodología FMECA permite analizar la funcionalidad de los equipos a partir de sus modos de falla, estableciendo una jerarquía útil para poder elaborar planes de mantenimiento focalizados en aquellas fallas de mayor criticidad en los activos. Por sus características es de las herramientas de análisis de falla más empleadas en el proceso de RCM. El objetivo de conocer los modos de fallos es prevenirlos, poder manejar los eventos antes de que sucedan, una vez que un modo de falla ha sido correctamente identificado es posible considerar qué sucede cuando ocurre, evaluar sus consecuencias y decidir cuál es la opción más conveniente de actuar: anticipar, prever, detectar, corregir o rediseñar. En base a esto es que el proceso de selección de tareas de mantenimiento, y también el manejo de estas tareas, se lleva a cabo del nivel del modo de falla.

Para la aplicación de la herramienta FMECA, se seleccionan sistemas críticos obtenidos en el análisis de criticidad, como resultado se obtuvo que el sistema crítico de la planta es el inversor, semi críticos se obtienen algunos equipos del POI, módulos fotovoltaicos y la estructura con valores mayores, posteriormente se encuentra el sistema de String box y solamente hay tres equipos considerados no críticos. El inversor es un sistema bastante complejo, en el cual el mantenimiento está totalmente definido por el fabricante SMA, incluso la garantía es de cinco años, y otorga un mantenimiento preventivo completo anual, posterior al término de la garantía es posible contratar los servicios de mantenimiento de SMA, por lo que no es de interés de la empresa en este momento modificar el programa de mantenimiento, los niveles de criticidad altos se deben principalmente a los impactos, ya que estos equipos son la célula madre del parque solar, ante cualquier fallo se pierde el 100% de la capacidad de producción de energía y

las consecuencias medioambientales pueden ser muy graves, pero la frecuencia de falla es demasiado baja. En caso de realizar cambios al programa, estos deben ser implementados por expertos, como cualquier revisión más exhaustiva del inversor. Respecto a este componente lo contemplado en el mantenimiento mensual que realiza Gestión Solar, es netamente inspección visual y limpieza superficial. Dado este contexto no se selecciona este sistema para implementar mejoras, a pesar de su criticidad. Finalmente, se opta por trabajar con la estructura debido a todas las variables en su composición y al estar entre los componentes semi críticos en el estudio anterior.

El desarrollo de la metodología FMECA, cuenta de dos partes principales: una cualitativa y una cuantitativa. En la parte cualitativa, se realiza un análisis del equipo, definiendo principalmente sus funciones y se estudian los modos de fallo posibles en cada uno, para así determinar los posibles efectos que puedan existir para el mismo elemento y el sistema general. Coincidiendo esta parte con las primeras preguntas planteadas por la metodología RCM. Presentado en los siguientes puntos.



**Figura 2.2** Proceso FMECA.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=tdiFxaXTsWE>

### 2.2.1 FUNCIONES OPERACIONALES

El concepto de funciones operacionales se refiere a las expectativas y requisitos de desempeño que se esperan de un activo o sistema en su entorno operativo específico. Para comenzar con la aplicación de FMECA - RCM es fundamental definir el contexto operacional y las funciones requeridas para cada equipo, este será el punto de partida para diseñar una estrategia a partir de lo que se necesita del activo. Para mantener el rendimiento de una operación específica, es necesario conocer todos los detalles de dicha operación. Se define como se muestra en la tabla 2.2 Tabla de funciones operacionales.

<b>Equipo</b>	<b>Función operacional</b>
Trackers	Dar sostención y sujeción a módulos fotovoltaicos
	Generar rotación mecánica para orientar módulos en función del movimiento del sol
	Transmitir movimiento de rotación de una mesa a la otra, generando una rotación del tracker completo coordinado

**Tabla 2.1** Funciones operacionales  
Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2 FALLAS FUNCIONALES

Una vez se ha determinado las funciones operacionales que cumple el activo a evaluar, se procede al segundo paso de RCM: “*de qué manera puede fallar un activo físico al momento de cumplir sus funciones*”, se define como un estado en el cual un activo físico o sistema no es capaz de ejercer la función específica que se espera de él. Además de la incapacidad total de funcionar, también se abarcan fallas parciales, en las que el activo sigue funcionando, pero no con un nivel de desempeño aceptable. A continuación, se presenta la información de estas fallas funcionales, resumidas en la tabla 2.2 Tabla de falla funcional.

<b>Equipo</b>	<b>Función operacional</b>	<b>Falla funcional</b>
Trackers	Dar sostención y sujeción a módulos fotovoltaicos	Incapacidad de sostener correctamente el panel
	Generar rotación mecánica para orientar módulos en función del movimiento del sol	Detención de la rotación
	Transmitir movimiento de rotación de una mesa a la otra, rotando el tracker completo	Desviación de la posición angular correcta
		Desconexión entre mesas adyacentes

**Tabla 2.2** Fallas funcionales  
Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3 MODOS DE FALLA

Una vez descrita la falla funcional, lo siguiente es determinar la causa de la falla funcional (modo de falla), puede ser más de una. En este ítem se identifican los eventos que ocasionan que se dé una falla funcional, se considera la mayor cantidad de antecedentes posibles, como datos históricos de fallas en los mismos equipos, observaciones registradas durante procesos operativos, fallas actualmente prevenidas, etc. Para generar una lista de fallas completa y aumentar la probabilidad de identificar todas las causas de falla, se debe considerar el deterioro y desgaste de los equipos, los errores humanos por parte de los operadores y el personal de mantenimiento, errores de diseño también deben estar contemplados. Indagar en detalles en esta etapa es fundamental, entre más antecedentes se logren reunir, más minucioso será el proceso, por lo tanto, mayor exactitud. En esta aplicación se han considerado datos históricos de fallas, presentados en la tabla 2.3 Tabla de modo de falla.

<b>Falla funcional</b>	<b>Modo de falla</b>
Incapacidad de sostener correctamente el panel	Fractura del material (omegas y marcos principales)
	Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)
Detención de la rotación	Corte de cuerda (caracoles)
	Atascamiento del mecanismo
	Pérdida de comunicación con centro de control
Desviación de la posición angular correcta	Deformación angular del eje
	Flexión del eje
Desconexión entre mesas adyacentes	Fractura del eje
	Fractura de cardanes o conector de eje

**Tabla 2.3** *Modos de falla*  
Fuente: *Elaboración propia*

#### 2.2.4 EFECTOS DE FALLA

Los efectos de falla describen lo que ocurre con el modo de falla del punto anterior, es decir, el impacto en los sistemas una vez que ha ocurrido la falla. Se elabora un listado que incluya información necesaria para evaluar las consecuencias de la falla, en el punto que sigue. Se presentan en la tabla 2.4 Tabla de efectos de falla.

<b>Modo de falla</b>	<b>Efectos de falla</b>
Fractura del material (omegas y marcos principales)	Colapso de la estructura
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	Desviación de los paneles solares
Corte de cuerda (caracoles)	Deformación de estructura
	Pérdida de eficiencia energética de paneles
Atascamiento del mecanismo	Deformación de estructura
	Pérdida de eficiencia energética de paneles
Pérdida de comunicación con centro de control	Pérdida de eficiencia energética de paneles
Deformación angular del eje	Pérdida de eficiencia energética de mesas adyacentes
Flexión del eje	
Fractura del eje	
Fractura de cardanes o conector de eje	

**Tabla 2.4 Efectos de falla**  
Fuente: Elaboración propia

#### 2.2.5 ÍNDICE DE PRIORIDAD DE RIESGO

Continuando con metodología FMECA, se presenta la parte cuantitativa que consta de la asignación de valores numéricos a tres índices que se utilizan para calcular el Índice de Prioridad de Riesgo (IPR), que indica cuál de los modos de fallo en el proceso representa un mayor riesgo. Compuesto por: Ocurrencia (frecuencia), Severidad (gravedad) y Detección (detectabilidad). En

este contexto se agrega un cuarto índice relacionado a Seguridad y Medioambiente, aspecto a considerar en la priorización. Para la cuantificación de los criterios se utilizan rangos.

- Índice de Ocurrencia: evalúa la probabilidad o frecuencia con la que se espera ocurra la falla, se utilizan datos de frecuencia de fallas anuales.

<b>Ocurrencia O</b>		
<b>Niveles</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cuantificación</b>
Muy baja	Excelente: menos de 0,5 eventos al año	1
Baja	Bueno: entre 0,5 y un 1 evento al año	2-3
Moderada	Promedio: 1 y 2 eventos al año	4-5
Alta	Frecuente: 3 - 5 eventos al año	6-8
Muy alta	Muy frecuente: mayor a 5 eventos al año	9-10

*Tabla 2.5 IPR – Índice de Ocurrencia*  
Fuente: Elaboración propia

- Índice de Severidad: evalúa el impacto o la gravedad de la falla si ocurre, se considera el impacto en la producción relacionado a que fallase de dicha forma.

<b>Severidad S</b>		
<b>Niveles</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cuantificación</b>
Muy baja	El tracker puede continuar su funcionamiento sin impacto en su producción	1
Baja	El tracker ve afectada su producción en un bajo porcentaje (solo una mesa)	2-3
Moderada	La producción energética del tracker se ve afectada en un porcentaje medio (no realizar rotación completa correctamente)	4-5
Alta	El impacto en la producción es considerable y hay daños materiales (deformación estructura)	6-8
Muy alta	Impacto total de producción, con daños permanentes y fractura de módulos fotovoltaicos	9-10

*Tabla 2.6 IPR – Índice de Severidad*  
Fuente: Elaboración propia

- Índice de Detección: Evalúa la capacidad de los controles actuales para detectar la falla antes de que ocurra o antes de que cause el impacto.

<b>Probabilidad de no detección D</b>		
<b>Niveles</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cuantificación</b>
Muy baja	El defecto es obvio, es muy improbable que no sea detectado de inmediato	1
Baja	El defecto podría pasar algún control básico, pero de todas formas sería detectado	2-3
Moderada	El defecto es de fácil detección	4-5
Alta	El defecto es de difícil detección con los métodos más comunes de control	6-8
Muy alta	El defecto es inesperado y muy difícil de detectar	9-10

**Tabla 2.7 IPR – Índice de Detección**  
Fuente: Elaboración propia

- Consecuencias ambientales y para la seguridad: posibilidad de causar daño o muerte a alguna persona, infringir normativa o reglamento ambiental.

<b>Consecuencias de seguridad ocupacional y medioambientales (impacto en la seguridad y el ambiente) SHA</b>		
<b>Niveles</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cuantificación</b>
Muy baja	Existe una mínima posibilidad de riesgo contra el ser humano y el medio ambiente	1
Baja	Baja ocurrencia de riesgo contra la seguridad y el medio ambiente	2-3
Moderada	Probable riesgo de algún impacto en los trabajadores y el medio ambiente	4-5
Alta	Frecuente riesgo de accidente para el ser humano y contaminación al medio ambiente	6-8
Muy alta	Afecta a la salud causando daños severos como la muerte y daños graves o irreparables para el medio ambiente	9-10

**Tabla 2.8 IPR – Impacto en la seguridad y el ambiente**  
Fuente: Elaboración propia

Su cálculo se realiza mediante:


- Índice de ocurrencia:  $I_O$  (frecuencia)
- Índice de severidad:  $I_S$  (gravedad)
- Índice de detección:  $I_D$  (probabilidad de localizar falla)
- Índice medioambiental:  $I_{SHA}$  (impacto en la seguridad y ambiente)
- $IPR = I_O * I_S * I_D * I_{SHA}$

Los rangos de niveles del Índice de Prioridad de Riesgo pueden variar según el área industrial en que se trabaja, en el área de energías renovables suelen ser equitativos los porcentajes, se definen cuatro rangos descritos en la tabla 2.9. Considerando la cuantificación de valores por criterio, el máximo valor es 10000.

<b>IPR</b>		
<b>Niveles</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cuantificación</b>
Riesgo bajo	Los riesgos en este rango se consideran menores y no requieren acciones inmediatas. Se recomienda monitorear y revisar periódicamente.	1 - 2500
Riesgo moderado	Los riesgos en este rango son de importancia moderada y pueden requerir alguna acción correctiva. Se recomienda una evaluación más detallada para determinar la necesidad de intervención.	2500 - 5000
Riesgo alto	Los riesgos en este rango son significativos y deben ser abordados con prioridad. Se requiere una acción correctiva para reducir la probabilidad y/o severidad de la falla.	5000 - 7500
Riesgo muy alto	Los riesgos en este rango son críticos y requieren una acción inmediata. Estos riesgos pueden tener un impacto severo en la seguridad, la operación o el entorno.	7500- 10000

**Tabla 2.9 Rangos IPR**  
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.10 se presentan los resultados obtenidos para cada modo de falla en orden de mayor Índice de Prioridad de Riesgo a menor.

Modo de falla					
	O	S	D	SHA	IPR 
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	6	9	7	3	<b>1134</b>
Fractura del material (omegas y marcos principales)	5	10	7	3	<b>1050</b>
Corte de cuerda (caracoles)	10	6	5	3	<b>900</b>
Atascamiento del mecanismo	8	6	5	3	<b>720</b>
Deformación angular del eje	5	4	7	2	<b>280</b>
Flexión del eje	5	4	7	2	<b>280</b>
Fractura de cardanes o conector de eje	4	5	6	2	<b>240</b>
Fractura del eje	4	5	5	2	<b>200</b>
Pérdida de comunicación con centro de control	8	3	4	1	<b>96</b>

**Tabla 2.10** Consecuencias de falla, cálculo del IPR  
Fuente: Elaboración propia

La cuantificación de las consecuencias de falla entrega como resultado una priorización, en la que se destacan valores bastante bajos obtenidos respecto a los parámetros de evaluación a medir, todos los modos de falla indican un riesgo bajo, calificando en el primer rango de 1 a 2500. El cuarto criterio extra que se utiliza para considerar consecuencias de seguridad y medio ambiente genera que los valores disminuyan aún más, ya que el impacto medioambiental en caso de falla para este sistema de trackers es muy bajo, aún así es un factor que se debe considerar.

Estas consecuencias poseen gran relevancia para el desarrollo en la prevención de una falla potencial, si una falla funcional trae consecuencias graves se tiene que hacer todo lo posible para evitarla, pero si se cuenta con la información necesaria para saber que las consecuencias de una falla son bajas, se puede optar por solamente prestar más atención en su mantenimiento rutinario. Sin embargo, el proceso de selección de la tarea no solo incluye las consecuencias, debe considerar el modo de falla y su efecto sobre la selección de los diferentes tipos de tareas proactivas. Se presenta en la tabla 2.11 el resultado final, obtenido mediante proceso FMECA.

		SISTEMA	ESTRUCTURA							
Equipo	Función operacional	Falla funcional	Modo de falla	Efectos de falla	Consecuencias de falla					
					O	S	D		IPR	
Trackers	Dar sostención y sujeción a módulos fotovoltaicos	Incapacidad de sostener correctamente el panel	Fractura del material (omegas y marcos principales)	Colapso de la estructura	5	10	7	3	<b>1050</b>	
			Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	Desviación de los paneles solares	6	9	7	3	<b>1134</b>	
	Generar rotación mecánica para orientar módulos en función del movimiento del sol	Detención de la rotación	Corte de cuerda (caracoles)	Deformación de estructura	Pérdida de eficiencia energética de paneles	10	6	5	3	<b>900</b>
				Atascamiento del mecanismo						
			Pérdida de comunicación con centro de control	Pérdida de eficiencia energética de paneles	8	3	4	1	<b>96</b>	
				Desviación de la posición angular correcta	Deformación angular del eje	Pérdida de eficiencia energética de mesas adyacentes	5	4	7	2
	Transmitir movimiento de rotación de una mesa a la otra, rotando el tracker completo	Desconexión entre mesas adyacentes	Flexión del eje	5	4		7	2	<b>280</b>	
			Fractura del eje	4	5		5	2	<b>200</b>	
		Fractura de cardanes o conector de eje	Fractura de cardanes o conector de eje	4	5		6	2	<b>240</b>	

**Tabla 2.11 FMECA**  
Fuente: Elaboración propia

## 2.3 HOJAS DE INFORMACIÓN

RCM HOJA DE INFORMACIÓN						
SISTEMA: ESTRUCTURA				EQUIPO: TRACKER		
F	Función operacional	FF	Falla funcional	MF	Modo de falla	Efectos de falla
1	Dar sostención y sujeción a módulos fotovoltaicos.	A	Incapacidad de sostener correctamente el panel.	1	Fractura del material (omegas y marcos principales).	Debido a la fractura de los componentes superiores principales en sostención de los paneles solares, se produce un colapso de la estructura aérea, con resultado de paneles quebrados y deformación irreversible de la estructura.
				2	Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales).	Debido a la deformación permanente de la estructura aérea, los paneles conectados a omegas pueden sufrir desviaciones que lleguen a generar trizaduras en algunos casos de mayor cambio.

*Tabla 2.12 Hoja información RCM – F1  
Fuente: Elaboración propia*

RCM HOJA DE INFORMACIÓN						
SISTEMA: ESTRUCTURA				EQUIPO: TRACKER		
F	Función operacional	FF	Falla funcional	MF	Modo de falla	Efectos de falla
2	Generar rotación mecánica para orientar módulos en función del movimiento del sol.	A	Detención de la rotación.	1	Corte de cuerda (caracoles).	Con el corte de una cuerda de los caracoles, el traveser pierde la conexión que tiene a través de poleas con el tubo de torque, por lo tanto, pierde la capacidad de inclinación. Esto puede ocasionar deformación de la estructura superior, debido a que el resto del tracker continúa su rotación y los marcos principales pueden generar torsión completa, se pierde eficiencia energética.
				2	Atascamiento del mecanismo.	Atascamiento del torno principalmente, donde se ve involucrada la cuerda, existe riesgo de que esta se corte. Puede generarse deformación en marcos principales y omega al no poder continuar rotando en conjunto. Pérdida de eficiencia en paneles.
				3	Pérdida de comunicación con centro de control.	Desconexión con sensores, envío y recepción de información del Panel Control. Pérdida de eficiencia en paneles.

*Tabla 2.13 Hoja información RCM – F2  
Fuente: Elaboración propia*

RCM HOJA DE INFORMACIÓN						
SISTEMA: ESTRUCTURA				EQUIPO: TRACKER		
F	Función operacional	FF	Falla funcional	MF	Modo de falla	Efectos de falla
3	Transmitir movimiento de rotación de una mesa a la otra, rotando el tracker completo.	A	Desviación de la posición angular correcta.	1	Deformación angular del eje.	Deformaciones permanentes en estructura central, se pierde coordinación de torque a lo largo del eje, ocasionando mayor desgaste, roce y menos eficiencia energética.
				2	Flexión del eje.	Deformaciones permanentes en estructura central, se pierde coordinación de torque a lo largo del eje, ocasionando mayor desgaste, roce y menos eficiencia energética.
		B	Desconexión entre mesas adyacentes.	1	Fractura del eje.	Desconexión total entre una mesa y otra, pérdida de rotación de tracker completo, por lo tanto, pérdida de producción energética.
				2	Fractura de cardanes o conector de eje.	Desconexión total entre una mesa y otra, pérdida de rotación de tracker completo, por lo tanto, pérdida de producción energética.

**Tabla 2.14** Hoja información RCM – F3  
Fuente: Elaboración propia

## 2.4 SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

Luego de toda la recopilación de información acerca de las fallas, se puede identificar patrones predominantes de comportamientos en cada falla, estos pueden ser un aporte al momento de recomendar una estrategia de gestión. Los modos de falla pueden ocurrir de manera aleatoria o con un patrón de desgaste, todo dependerá del tiempo operativo de cada equipo. La norma SAE JA1011 reconoce estrategias de mantenimiento para mitigar consecuencias de fallas:

- 1) Tareas de mantenimiento basadas en condición: detección de fallas potenciales. Tarea de monitoreo de condición es aplicada a intervalos fijos para predecir la tendencia de un paro operacional antes de que ocurra una falla funcional. *“Se llaman tareas a condición porque los componentes se dejan en servicio a condición de que continúen alcanzando los parámetros de funcionamiento deseados” (Moubray, 2004, pág. 14).*
- 2) Tareas de reacondicionamiento cíclicas: son tareas de reparación basadas en el tiempo, deben ser realizadas en función de la vida útil del activo (momento en que tasa de falla del activo deja de ser constante y comienza a aumentar más de lo tolerable). También se considera evaluación de costos, comparando el costo de mantenimiento preventivo versus costo de consecuencia de falla funcional.

- 3) Tareas de sustitución cíclicas: tareas programadas de descarte y reemplazo, son consideradas cuando se demuestra que es más rentable en términos económicos reemplazar un activo, que repararlo. Generalmente esta sustitución es recomendada en el fin de la vida útil del activo.

### **“Acciones a falta de”**

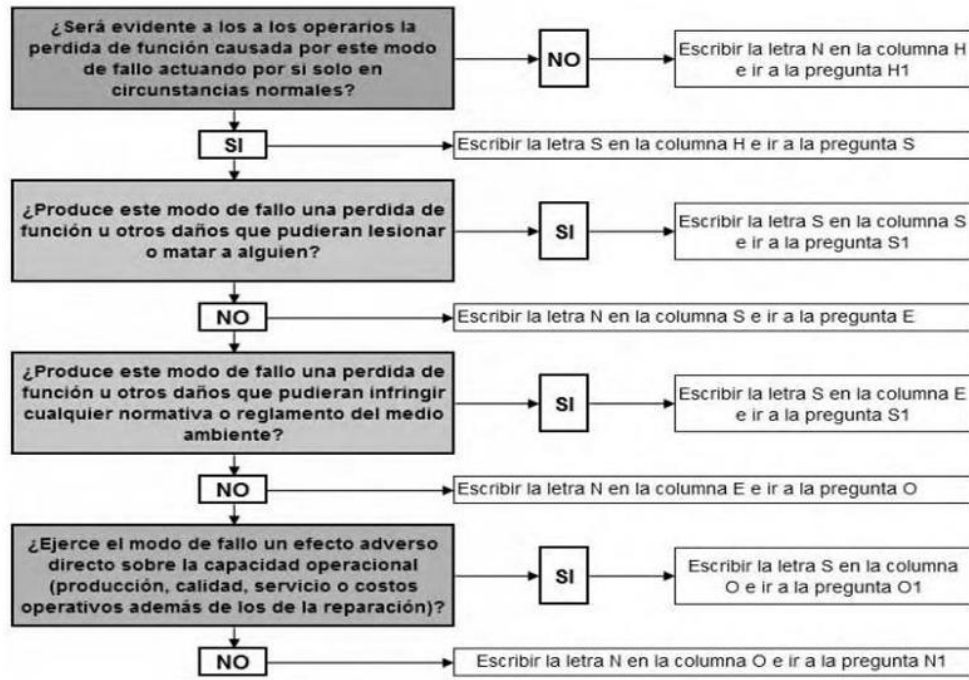
Denominado así por Moubray, se reconocen tres categorías de acciones:

- 1) Búsqueda de fallas: implica revisar con periodicidad funciones ocultas para identificar si han fallado.
- 2) Rediseño: implica hacer cambios de una sola vez a las capacidades iniciales de un sistema, son modificaciones al equipo y a los procedimientos relacionados.
- 3) Ningún mantenimiento programado: no hay tareas programadas de ni un tipo para intentar prevenir o anticipar los modos de falla, simplemente se deja que ocurra la falla y se realiza mantenimiento correctivo. También se puede denominar “mantenimiento a rotura”.

## **2.5 ALGORITMO DE DECISIÓN RCM**

La norma SAE JA1012, es la que define como efectuar la metodología RCM, sirve como guía paso a paso para desarrollar la aplicación, no es una única guía definitiva, ya que cada contexto operativo puede cambiar las aristas de aplicación de esta metodología, pero si entrega bastantes herramientas muy útiles para implementar RCM, como lo es el algoritmo de decisión o diagrama de decisión. Este diagrama integra todos los procesos de decisión de un marco de trabajo estratégico y estructurado, y responde a preguntas formuladas. Inicia definiendo si el modo de falla es evidente o no, que tipo de consecuencias tiene y se evalúa bajo la consecuencia más relevante para dicho modo, así se obtiene como resultado cual podría ser la estrategia más efectiva según la factibilidad de aplicación y qué hacer si no se encuentra una tarea apropiada.

Se elabora una hoja de decisión, donde se completa con los datos que vaya indicando el diagrama, a medida que se avanza en él. En la figura 2.3 se visualiza como se plantean las preguntas y respuestas de manera bastante sencilla, luego en la figura 2.4 se ejemplifica como completar la hoja de decisión.



*Figura 2.3 Diagrama de decisión – Registro de consecuencias de falla*

*Fuente: Moubray (1997)*

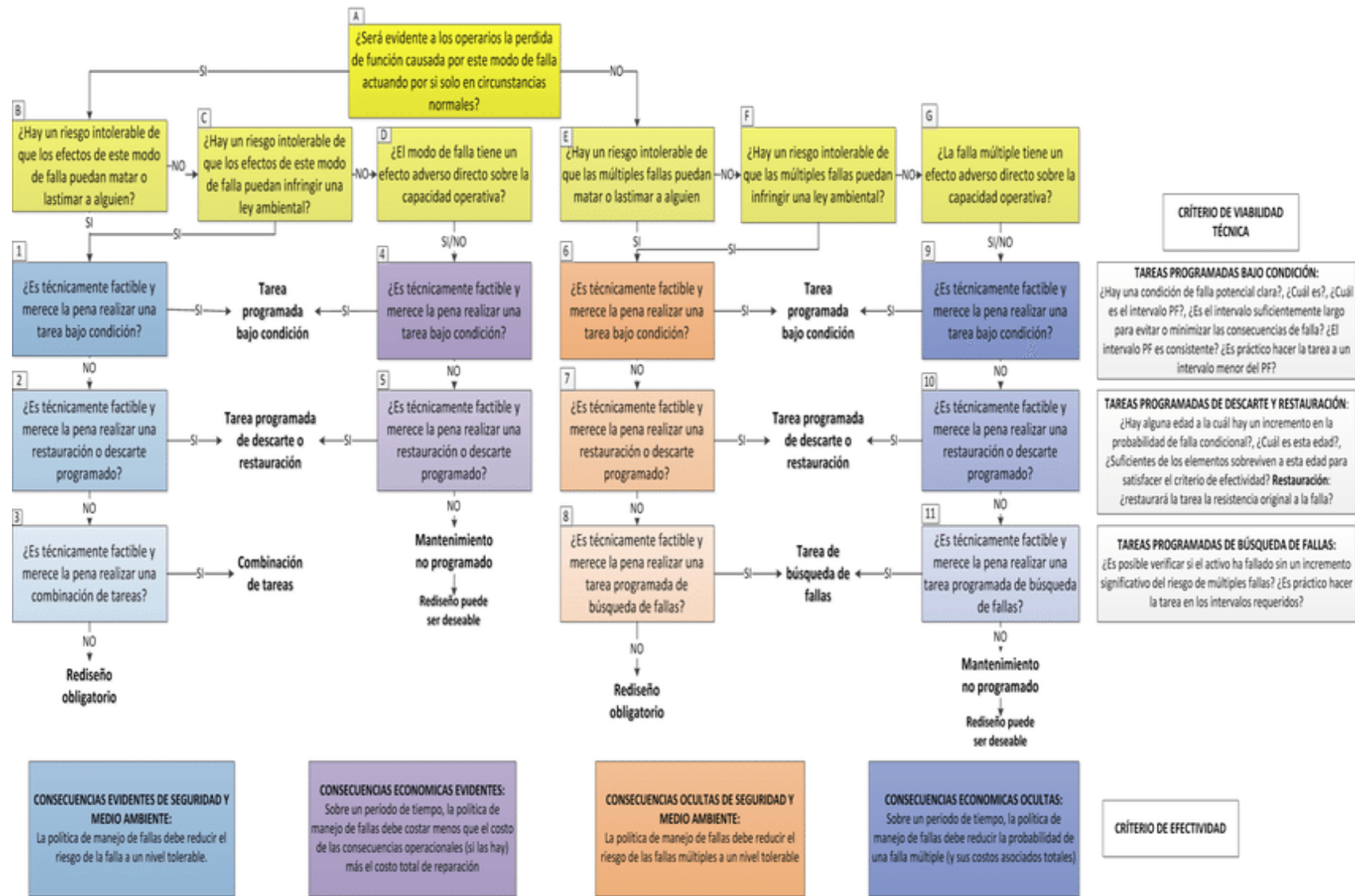


Figura 2.7 Diagrama de decisión

Fuente: Google imágenes

## 2.6 HOJA DE DECISIÓN RCM

La herramienta clave que se utiliza para evaluar la información obtenida en los pasos RCM es la hoja de decisión, donde se incluirán los criterios anteriormente definidos y se definirá de manera clara y resumida la selección de acciones de mantenimiento mas efectivas para cada caso, funciona como una guía.

En referencia de información, en orden se agregan las siglas asociadas a: Función, Falla funcional, Modo de falla.

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias			
F	FF	MF	H	S	E	O
3	A	1	N			
5	B	2	S	S		
2	C	4	S	N	S	
1	A	5	S	N	N	S
1	B	3	S	N	N	N

→ **Una falla oculta:** Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea proactiva (predictiva o preventiva) debe reducir a un nivel tolerable el riesgo de una falla múltiple.

→ **Consecuencias para la seguridad:** Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea proactiva debe reducir a un nivel tolerable el riesgo de esta falla por sí sola.

→ **Consecuencias para el medio ambiente:** Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea proactiva debe reducir el riesgo a un nivel tolerable de esta falla por sí sola.

→ **Consecuencias operacionales:** Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea proactiva debe costar menos que el costo total de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación que pretende prevenir a través de un período de tiempo.

→ **Consecuencias no operacionales:** Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea proactiva debe costar menos que el costo de reparación que pretende prevenir a través de un período de tiempo.

*Figura 2.4 Hoja de decisión: Evaluación de las consecuencias*

*Fuente: Moubray (1997)*

De inmediato siguen la evaluación de las consecuencias, en donde en este contexto se agrega una columna con los valores obtenidos de IPR, ordenados de mayor a menor para visualizar priorización. Cada modo de fallo será ubicado en una sola categoría de consecuencias, si se evalúa bajo consecuencias ambientales, no se debe volver a evaluar bajo consecuencias operacionales.

En las columnas octava a décima en la hoja de decisión, se registra si ha sido seleccionada una tarea proactiva:

- H1/S1/O1/N1 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias.
- H2/S2/O2/N2 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento cíclico apropiada para prevenir las fallas.
- H3/S3/O3/N3 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

H1	H2	H3	
S1	S2	S3	
O1	O2	O3	
N1	N2	N3	
S			<p>¿Es técnicamente factible realizar una tarea a condición para reducir la consecuencia de la falla? ¿Hay alguna condición de falla potencial? ¿Cuál es? ¿Cuál es el intervalo P-F? ¿Es suficientemente largo como para ser de utilidad? ¿Es razonablemente consistente? ¿Es posible realizar la tarea a intervalos menores al intervalo P-F?</p>
N	S		<p>¿Es técnicamente factible una tarea de reacondicionamiento ciclico para reducir la frecuencia de la falla? ¿Hay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad? ¿Restituirá la tarea la resistencia original a la falla?</p>
N	N	S	<p>¿Es técnicamente factible una tarea de sustitución ciclica para reducir la frecuencia de la falla? ¿Hay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de ésta edad?</p>

Figura 2.5 Hoja de decisión – Criterios de factibilidad técnica

Fuente: Moubray (1997)

Si es necesario responder a alguna de las preguntas “a falta de”, las columnas H4, H5 o S4, son las destinadas para registrar esas respuestas.

Referencia de Información	Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"					
	F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4
3	A	1	N					N	N	N	S		
<p>¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de búsqueda de falla?</p> <p>Registrar "SI" si es posible realizar la tarea y resulta práctico hacerlo con la frecuencia requerida y reduce el riesgo de la falla múltiple a un nivel tolerable</p>													
4	B	4	N					N	N	N	N	S	
4	C	2	N					N	N	N	N	N	
<p>¿Podría la falla múltiple afectar la seguridad o el medio ambiente?</p> <p>Sólo se hace esta pregunta si la respuesta a la pregunta H4 es "No". Si la respuesta a esta pregunta es "SI", el rediseño es obligatorio. Si la respuesta es "No", la acción "a falta de" es <b>no realizar mantenimiento preventivo</b>, pero el rediseño puede ser deseable.</p>													
5	B	2	S	S				N	N	N		S	
2	A	5	S	S				N	N	N		N	
<p>¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una combinación de tareas?</p> <p>Responder "SI", si una combinación de <b>dos o más</b> tareas proactivas cualquiera reduce el riesgo de falla a un nivel tolerable (esto rara vez sucede). Si la respuesta es "No", el rediseño es obligatorio.</p>													
1	A	5	S	N	N	S		N	N	N			
1	B	3	S	N	N	N		N	N	N			
<p>En estos dos casos, las consecuencias de la falla son puramente económicas y no se pudo encontrar una tarea proactiva apropiada</p> <p>Como resultado, la decisión "a falta de" inicial es no realizar mantenimiento programado, pero el rediseño puede ser deseable.</p>													

Figura 2.6 Hoja de decisión – Tareas “a falta de”

Fuente: Moubray (1997)

En las siguientes columnas se incluyen parámetros extras, para el cálculo de Riesgo Anual Equivalente:

- Frecuencia de fallas por año:  $FF \times A$ , frecuencia de fallas en el lapsus de un año.
- Tiempo promedio parar reparar: TPPR (horas), tiempo promedio empleado en realizar la reparación correspondiente posterior a la falla.
- Impacto Producción \$/hora: IP, costo que tiene la interrupción en la producción debido a la falla medido en horas, sirve para relacionar cuantitativamente la pérdida de eficiencia con valor monetario.
- Costos directos por falla:  $CD \times F$ , costos directamente asociados a la reparación/mantenimiento de la falla.

Riesgo Anual Equivalente: parámetro que considera funciones, fallas, modos de fallo, frecuencia de fallas y efectos de fallas, para el cálculo de riesgo y luego lo lleva a un valor económico. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$RTA = FFxA * ((TPPR * IP) + CDxF + Imp.SHA)$$

De esta manera, mediante los resultados obtenidos a través del riesgo anual equivalente, se evaluará el valor de las opciones más rentables.

Finalmente, en las últimas tres columnas, en el caso de existir una actividad seleccionada, van los detalles de ella y en la columna “tareas propuestas” se puede registrar los casos que requieren rediseño o no programar mantenimiento para ese modo de fallo.

**CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE APLICACIÓN METODOLOGÍA RCM Y VALORIZACIÓN ECONÓMICA**

### 3.1 APLICACIÓN HOJA DE DECISIÓN: TRACKER

El uso en conjunto de las herramientas de RCM en el capítulo anterior, aplicadas a cada modo de fallo identificado, ha proporcionado información recomendada sobre las tareas propuestas para incluir en un plan de mantenimiento eficiente que busca prevenir fallas funcionales. Los resultados se basan principalmente en “**tareas a condición**”, dada la naturaleza del equipo con el que se está trabajando: una estructura mecánica, que necesita primordialmente inspecciones visuales periódicas, limpiezas, verificación de ajustes de pernería, lubricación, y el reemplazo de cualquier elemento que no esté en su condición óptima, como, por ejemplo, una cuerda gastada de tanto roce en los caracoles conectados al traverse. Y también **actividades correctivas**, ya que en dichos casos no fue posible identificar la condición de falla potencial o probabilidad de falla condicional en dichos modos, además de ya ser abarcados bastantes detalles con las tareas dadas para los otros modos.

Otro punto importante de destacar es que las consecuencias relevantes son directamente relacionadas a producción: consecuencias operacionales. Para estos modos de fallo no incide una consecuencia mayor en la seguridad de personas o impacto medioambiental, que se deba considerar. Distinto en caso de otros elementos de Rinconada Sur, como, por ejemplo, el Inversor central, que sus fallos van directamente relacionados a un gran riesgo de impacto ambiental y de riesgo vital.

Las actividades se realizan bajo la supervisión de un Ingeniero Mecánico, que ocupa el cargo de supervisor de mantenimiento y en terreno un Mantenedor Industrial. La periodicidad de las inspecciones en un caso es semanal, y en general mensual.

#### 3.1.1 RESULTADO PRIORIZACIÓN POR RIESGO

Modo de falla	IPR	Resultado
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	1134	Riesgo bajo
Fractura del material (omegas y marcos principales)	1050	Riesgo bajo
Corte de cuerda (caracoles)	900	Riesgo bajo
Atascamiento del mecanismo	720	Riesgo bajo
Deformación angular del eje	280	Riesgo bajo
Flexión del eje	280	Riesgo bajo
Fractura de cardanes o conector de eje	240	Riesgo bajo
Fractura del eje	200	Riesgo bajo
Pérdida de comunicación con centro de control	96	Riesgo bajo

*Tabla 3.1 Resultado priorización de riesgo  
Fuente: Elaboración propia*

Los valores obtenidos corresponden a riesgo bajo, independiente a eso dentro de los mismos rangos obtenidos hay una diferencia significativa formando dos grupos, en color amarillo destacan los cuatro modos de fallas más riesgosos para este contexto.

### 3.1.2 RESULTADO RIESGO ANUAL EQUIVALENTE

- Según parámetros de índice de ocurrencia se obtienen los siguientes valores para Frecuencia / año:

Modo de falla	O	FFxA
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	6	3
Fractura del material (omegas y marcos principales)	5	2
Corte de cuerda (caracoles)	10	10
Atascamiento del mecanismo	8	5
Deformación angular del eje	5	2
Flexión del eje	5	2
Fractura de cardanes o conector de eje	4	1,5
Fractura del eje	4	1,5
Pérdida de comunicación con centro de control	8	5

**Tabla 3.2** Frecuencia por año  
Elaboración propia

Modo de falla	TPPR (horas)
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	96
Fractura del material (omegas y marcos principales)	96
Corte de cuerda (caracoles)	2
Atascamiento del mecanismo	48
Deformación angular del eje	48
Flexión del eje	72
Fractura de cardanes o conector de eje	3
Fractura del eje	72
Pérdida de comunicación con centro de control	1

**Tabla 3.3** Valores de TPPR  
Fuente: Elaboración propia

- IP: La planta Rinconada Sur genera estimativamente \$72.000 la hora, operando correctamente y generando los 3000 kWh, que es su capacidad máxima. Considerando que hay tracker de 1 a 5 mesas, los valores varían en un rango según la cantidad de paneles que posea cada tracker que sufra de una falla, se utilizará el caso más crítico \$2.904 aproximadamente por hora.

Tracker	Mesa	Paneles	Potencia kW	Porcentaje	Valor / hora
1	1	52	25	0,8333%	\$ 580,65
1	2	104	50	1,6667%	\$ 1.161,29
1	3	156	75	2,5000%	\$ 1.741,94
1	4	208	100	3,3333%	\$ 2.322,58
1	5	260	125	4,1667%	<b>\$ 2.903,23</b>

**Tabla 3.4** Cálculo valor económico de potencia por hora  
Fuente: Elaboración propia

Modo de falla	TPPR (horas)	IP (\$2,904 / hora)
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	96	\$ 278.784
Fractura del material (omegas y marcos principales)	96	\$ 278.784
Corte de cuerda (caracoles)	2	\$ 5.808
Atascamiento del mecanismo	48	\$ 55.757
Deformación angular del eje	48	\$ 55.757
Flexión del eje	72	\$ 83.635
Fractura de cardanes o conector de eje	3	\$ 3.485
Fractura del eje	72	\$ 83.635
Pérdida de comunicación con centro de control	1	\$ 2.904

**Tabla 3.5** Cálculo valor IP  
Fuente: Elaboración propia

- CD x F: se consideran los costos por reparación de mantenimiento, incluye un aproximado de repuestos y hora hombre.

<b>Modo de falla</b>	<b>Costo de reparación por mantenimiento</b>
Deformaciones permanentes (omegas y marcos principales)	\$4.500.000
Fractura del material (omegas y marcos principales)	\$2.650.000
Corte de cuerda (caracoles)	\$55.000
Atascamiento del mecanismo	\$300.000
Deformación angular del eje	\$1.200.000
Flexión del eje	\$1.200.000
Fractura de cardanes o conector de eje	\$3.800.000
Fractura del eje	\$3.800.000
Pérdida de comunicación con centro de control	\$50.000

***Tabla 3.6 Costos directos por falla***  
*Fuente: Elaboración propia*

Sistema			ESTRUCTURA MECÁNICA																					
Subsistema			TRACKER																					
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1 S1	H2 S2	H3 S3	TAREAS "A FALTA DE"				RIESGO					TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR	COSTOS DIRECTOS DE ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO	COSTOS DEL PLAN ANUAL	
F	FF	MF	IPR	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4	FFxA	TPPR	IP	CDxF	RIESGO TOTAL	SHA					
1	A	2	1134	S	N	N	S	S						2	96	\$ 278.784	\$2.650.000	\$ 58.826.528	N	Inspección visual, comprobación de nivel y ajuste adecuado de pernería.	A condición	Mantenedor - Supervisor	\$2.650.000	\$2.650.000
1	A	1	1050	S	N	N	S	S						3	96	\$ 278.784	\$4.500.000	\$ 93.789.792	N	Inspección visual, especialmente en soldaduras y galvanizado, limpieza de oxido, lijado de superficie, retoque de pintura galvanizada de ser necesario.	A condición	Mantenedor - Supervisor	\$4.500.000	\$4.500.000
2	A	1	900	S	N	N	S	S						10	2	\$ 5.808	\$55.000	\$ 666.160	N	Revisión: inspección visual detallada de cuerdas, cambio de ser necesario al ver desgaste.	Mensual	Mantenedor - Supervisor	\$55.000	\$660.000
2	A	2	720	N	N	N	S	N	N	N				5	48	\$ 55.757	\$300.000	\$ 14.881.632	N	Actividad correctiva cuando corresponda.	Correctiva	Mantenedor - Supervisor	\$300.000	\$300.000
3	A	1	280	N	N	N	S	N	N	N				2	72	\$ 83.635	\$1.200.000	\$ 14.443.469	N	Acción correctiva que involucre reparación o cambio de eje al observar deformación.	Correctiva	Mantenedor - Supervisor	\$1.200.000	\$1.200.000
3	A	2	280	S	N	N	S	N	N	N				1,5	3	\$ 3.485	\$3.800.000	\$ 5.715.682	N	Acción correctiva que involucre reparación o cambio de eje al observar deformación.	Correctiva	Mantenedor - Supervisor	\$3.800.000	\$3.800.000
3	B	2	240	S	N	N	S	S						5	1	\$ 2.904	\$50.000	\$ 264.520	N	Limpieza de cardán y conector con soplado, lubricación de ser necesario en cardán.	Trimestral	Mantenedor - Supervisor	\$50.000	\$150.000
3	B	1	200	S	N	N	S	S						1,5	72	\$ 83.635	\$3.800.000	\$ 14.732.602	N	Inspección visual, limpieza de oxido, lijado de superficie, retoque de pintura galvanizada de ser necesario.	A condición	Mantenedor - Supervisor	\$3.800.000	\$3.800.000
2	A	3	96	N	N	N	S	N	N	N				2	48	\$ 55.757	\$1.200.000	\$ 7.752.653	N	Actividad correctiva, reinicio de sistema SCADA.	Correctiva	Supervisor de mantenimiento	\$1.200.000	\$1.200.000

**Tabla 3.7 Hoja de decisión RCM: Tracker**  
Fuente: Elaboración propia

## 3.2 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

### ❖ **Tubos de torque:**

- ✓ Inspección visual
- ✓ Análisis de desgaste: corrosión, trizaduras, desgaste o daño, búsqueda de evidencias, toma de registros
- ✓ Limpieza, soplado, retiro de óxido, jado superficial
- ✓ Retoque de pintura galvanizada de ser necesario
- ✓ Ajuste y reapriete de conexiones
- ✓ Lubricación de partes móviles
- ✓ Verificación de alineación

### ❖ **Cardán y conector:**

- ✓ Inspección visual
- ✓ Limpieza con soplado de componentes internos
- ✓ Lubricación
- ✓ Verificación de alineación y ajuste
- ✓ Análisis de desgaste

### ❖ **Marcos principales:**

- ✓ Inspección visual: detección de grietas, signos de corrosión, etc
- ✓ Limpieza: polvo y óxido, lijado de superficie
- ✓ Verificación de estado de soldaduras y acabado galvanizado: pintura en superficie de ser necesario.
- ✓ Verificación de anclaje y fijación
- ✓ Ajuste de pernería
- ✓ Monitoreo de carga y tensión para identificar cualquier desviación de las especificaciones iniciales

### 3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO

SIN IMPLEMENTACIÓN DE RCM				POSTERIOR A IMPLEMENTACIÓN RCM			
Sigla	Modo de falla	FF/año	Riesgo \$/año	Costo de implementar RCM	Frecuencia potencial fallas/año	Riesgo potencial \$/año	Ahorro potencial
1	A	2	<b>\$ 58.826.528</b>	\$2.650.000	1	\$ 29.413.264	<b>\$ 26.763.264</b>
1	A	1	<b>\$ 93.789.792</b>	\$4.500.000	1	\$ 31.263.264	<b>\$ 58.026.528</b>
2	A	1	<b>\$ 666.160</b>	\$660.000	5	\$ 333.080	<b>\$ -326.920</b>
2	A	2	<b>\$ 14.881.632</b>	\$300.000	2	\$ 5.952.653	<b>\$ 8.628.979</b>
3	A	1	<b>\$ 14.443.469</b>	\$1.200.000	1	\$ 7.221.734	<b>\$ 6.021.734</b>
3	A	2	<b>\$ 5.715.682</b>	\$3.800.000	0,75	\$ 2.857.841	<b>\$ -942.159</b>
3	B	2	<b>\$ 264.520</b>	\$150.000	2,5	\$ 132.260	<b>\$ -17.740</b>
3	B	1	<b>\$ 14.732.602</b>	\$3.800.000	0,75	\$ 7.366.301	<b>\$ 3.566.301</b>
2	A	3	<b>\$ 7.752.653</b>	\$1.200.000	1	\$ 3.876.326	<b>\$ 2.676.326</b>
			<b>\$ 211.073.037</b>	<b>\$18.260.000</b>		<b>\$ 88.416.723</b>	<b>\$104.396.314</b>

*Tabla 3.8 Cuadro comparativo implementación RCM  
Fuente: Elaboración propia*

Considerando los valores obtenidos posterior al estudio RCM, el resultado es positivo hacia la iniciativa de implementar estas actividades de mantenimiento para mitigar los modos de fallo en evaluación, en su mayoría se alcanzan considerables cifras de ahorro, ya que el riesgo anual disminuye bastante, si bien la inversión que se debe hacer para implementar este plan no es menor, el beneficio a largo plazo es mayor, para cuantificarlo es exactamente \$104.396.314 de ahorro potencial en un año.

## CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El sistema **H4plus bifacial tracker de Ideematec** posee una tecnología bastante moderna y de alta gama en el rubro, con un buen mantenimiento preventivo periódico, Rinconada Sur operará excelente durante los 25 años de contrato. Respecto a la problemática planteada en el capítulo uno, se desarrolla cada uno de los puntos necesarios para definir algunas actividades de mantenimiento como propuesta de mejora, para un equipo crítico de Rinconada Sur.

En esta investigación, se llevó a cabo un procedimiento RCM aplicado al sistema de tracker solar, utilizando primeramente un análisis de criticidad para definir el sistema seleccionado y luego incluir herramientas como FMECA para el desarrollo y definición de fallas, efectos y consecuencias. Los resultados de este análisis han arrojado luz sobre los componentes críticos y los modos de falla potenciales que podrían afectar significativamente la confiabilidad y el rendimiento del sistema. Se identificaron los riesgos más relevantes, tales como la fractura, flexión o deformación en general, de elementos principales del tracker, como son los ejes y los marcos principales, en conjunto con omegas. Se identifica la falla más común, el corte de la cuerda entre caracol y traverse, y se buscan medidas de mitigación que puedan incorporarse al contexto y plan actual. A través del uso del diagrama de decisiones, se han definido que tipos de actividades son las más predominantes, según los modos de fallos estudiados y se ha priorizado la necesidad de mantener un enfoque más proactivo, obteniendo como resultado varias “tareas a condición”. Esto implica la implementación de actividades de mantenimiento específicas dirigidas a los componentes ya antes mencionados, sobretodo al punto clave de la movilidad del tracker: la zona central del eje (tubo de torque y caracol). Es precisamente donde se enfocan las actividades que se han propuesto para agregar a un plan de mantenimiento existente. En estas actividades lo primordial será la inspección visual constante, limpieza y ajuste de elementos móviles, la lubricación y análisis de desgaste también deben estar presentes en la recomendación de periodicidad mensual. Además, se ha destacado la importancia de la gestión adecuada de recursos, incluida la optimización de la gestión de repuestos, ya que puede ser necesario tener que cambiar elementos dentro de cada mes, tales como las cuerdas, algún componente que sufra de deformación, estos repuestos deben estar físicamente en la planta, idealmente generar un listado de repuestos críticos que se deben considerar para no perder tiempo en caso de una falla inevitable en la que se deba reemplazar la pieza.

Si bien la metodología central es RCM, para su desarrollo también fue fundamental el uso de otras herramientas, que en términos comparten una serie de características similares en cada paso o pregunta de su procedimiento. Su aplicación proporciona una base sólida para mejorar la confiabilidad, la seguridad y el rendimiento operativo de los sistemas. Para utilizar estas metodologías es fundamental contar con conocimiento de conceptos relacionados al

mantenimiento y profundizar en ellos, así como también tener la mayor cantidad de información de los equipos en su operación, datos históricos de fallas, frecuencia de estas, descripciones de las fallas, etc. Para que una empresa pueda mejorar sus estrategias de mantenimiento, es fundamental trabajar con un equipo comprometido y capacitado, la persona que recopila toda la información en terreno tiene un rol muy importante que es captar la mayor cantidad de datos posibles, son los que servirán en un futuro para poder tomar mejores decisiones.

En conclusión, RCM ha demostrado ser una herramienta invaluable para mejorar la confiabilidad y el rendimiento de un sistema que se quiera evaluar, también una excelente estrategia de ahorro.

## BIBLIOGRAFÍA

A. Crespo Márquez, P. Moreu de León, J.F. Gómez Fernández, C. Parra Márquez and M. López Campos (2009). The maintenance management framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 15(2):167-178 DOI: [10.1108/13552510910961110](https://doi.org/10.1108/13552510910961110)

Aguilar Romero, Angel Yasmany. Tandazo Flores, Luis Fernando. *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) del sistema de inyección de un motor de encendido provocado Corsa Evolution 1.4L empleando herramientas de aprendizaje y clasificación para la programación del mantenimiento*. UPS-CT007176.pdf

Barrero, Álvaro Crisóstomo. *Aplicación de la metodología RCM en plantas solares fotovoltaicas*. Dep. Termodinámica y Energías Renovables Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, 2017.

Estupiñan, Edgar. Cordero, Oscar. *Uso de la metodología FMECA -RCM, para la optimización De la estrategia de mantenimiento en una planta de tostación de cobre*. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, ISSN 0120-4211.

Jeria Sobarzo, Sebastián Ignacio. *ANÁLISIS DE FALLA EN SISTEMAS DE SEGUIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS*. Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA. Septiembre 2020.

Larrea Moreano, Angel Daniel. Redrobán Dilon, Cristian David. Castillo Medina, Antonio Gabriel. *Priorización del mantenimiento mediante la determinación del número prioritario de riesgo, y el análisis de modos y efectos de fallos de una máquina de inyección de poliuretano de alta presión*. ISSN: 2602-8085

Maulen Arriagada, Vicente Alfredo. *MANTENIMIENTO Y FACTIBILIDAD DE MEJORA PARA UN MAYOR RENDIMIENTO EN LA GENERACION DE ENERGIA A PLANTA SOLAR*. Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA. 2020.

Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. *Energía 2050, Política energética de Chile*.

Moubray, John. *Mantenimiento centrado en la confiabilidad (Reliability-centred Maintenance)*. Edición en español, 2004. Traducido por Ellman, Sueiro y Asociados.

Parra, Carlos y Crespo, Adolfo, 2020. Whitepapr 5: Criticality Analysis Methods. Based on the Risk Assessment Process. Sevilla, España, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25392.17926>