

MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
(RCM) PARA EL SISTEMA DE RIEGO DE CAMIONES TANQUEROS DE LA
EMPRESA DRUMMOND LTD

ADOLFO ANDRÉS MARÍN ZABALETA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
(RCM) PARA EL SISTEMA DE RIEGO DE CAMIONES TANQUEROS DE LA
EMPRESA DRUMMOND LTD

ADOLFO ANDRÉS MARÍN ZABALETA

Monografía presentada como requisito para optar por el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director:

Ing. Carlos Raúl Chacón Calderón
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

A Dios, primeramente, quien es mi fortaleza y mi guía y quien dispuso todas las cosas para hacer realidad este anhelo y lograr un objetivo más en mi vida profesional.

A mi familia, motor de mi vida, apoyo incondicional y motivación para seguir adelante.

A Karen Rizzo y Yodalis Cuello, por su sincera amistad.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud hacia todas aquellas personas que hicieron posible no solo la ejecución de este trabajo sino culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

A los ingenieros Carlos Chacón (director del proyecto) y Alfonso López (Coordinador de Mantenimiento) por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto en su Departamento. A ellos y a los miembros de su equipo, gracias por el apoyo brindado y sus valiosos aportes.

A mis jefes Carlos Peña, Juan Ríos y Martin Ahrens, quienes me facilitaron los horarios en medio de mis responsabilidades laborales para asistir a cada una de las clases.

A Elvira De La Rosa por su colaboración. Al ingeniero Daniel Ortiz por su buena disposición y las asesorías recibidas.

A mi empresa, Drummond Ltd. que me brindó un soporte económico importante sin el cual no hubiese podido alcanzar esta meta.

A la Universidad Industrial de Santander y su cuerpo docente por las enseñanzas recibidas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. RESEÑA DE LA EMPRESA	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO	21
5. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA.....	23
5.1 MARCO TEÓRICO.....	23
5.1.1 Introducción.....	23
5.1.2 Definición del RCM.....	23
5.1.3 Metodología del RCM.....	24
5.1.4 Beneficios del RCM.....	26
5.1.5 Barreras para la implementación del RCM.....	26
5.2 MARCO CONCEPTUAL	27
6. DESARROLLO METODOLÓGICO DEL RCM.....	30
6.1 PRELIMINARES.....	30
6.2 DELIMITACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO	31
6.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO	34
6.3.1 Tanque de agua.....	34

6.3.2	Bomba de riego.....	35
6.3.3	Aspersores.....	35
6.3.4	Flauta de riego.....	36
6.3.5	Válvula de corte.....	36
6.3.6	Tanque de aceite hidráulico.....	36
6.3.7	Bomba hidráulica Vickers.....	37
6.3.8	Motor hidráulico.....	37
6.3.9	Válvula de control direccional.....	37
6.3.10	Válvula de alivio.....	38
6.3.11	Mecanismo de accionamiento.....	38
6.3.12	Módulo de control electrónico.....	39
6.3.13	Electroválvulas neumáticas.....	40
6.4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y CONTEXTO OPERACIONAL DE LOS ELEMENTOS.....	40
6.5	DEFINICIÓN DE FUNCIONES Y DESARROLLO DEL AMFE.....	42
6.6	SELECCIÓN DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	45
6.7	ANÁLISIS DEL MODELO RESULTANTE.....	47
7.	CONCLUSIONES.....	54
8.	RECOMENDACIONES.....	56
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXOS.....	59

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vista general del área de cargue en la mina Pribbenow.....	16
Figura 2. Indicadores de Mantenimiento para la flota de tanqueros, año 2016.	19
Figura 3. Clasificación de fallas por sistema para la flota de tanqueros.	21
Figura 4. Diagrama del proceso RCM.....	25
Figura 5. Cambios en las expectativas de Mantenimiento.....	27
Figura 6. Conformación del equipo de trabajo de RCM.....	30
Figura 7. Camión tanquero Caterpillar modelo 777C.....	31
Figura 8. Esquema del sistema de riego camiones 777C/D.	32
Figura 9. Taxonomía del sistema de riego, camiones series 4XJ y 5ER.	33
Figura 10. Taxonomía del sistema de riego, camiones serie AGC.	34
Figura 11. Vista general del sistema de riego.....	35
Figura 12. Aspersionador de riego.....	36
Figura 13. Tanque de aceite hidráulico.....	36
Figura 14. Bomba hidráulica Vickers (1) y toma fuerza del motor diesel (2).....	37
Figura 15. Esquema de la válvula de control hidráulico.....	38
Figura 16. Mecanismo de accionamiento de la válvula de control direccional.....	39
Figura 17. Panel del módulo electrónico de control de riego.	39
Figura 18. Electroválvula neumática.	40
Figura 19. Diagrama lógico de decisión RCM.....	45

Figura 20. Resultados de la aplicación del Árbol Lógico de Decisión – Clasificación según tipo de decisión.	47
Figura 21. Distribución de HH por componente - Plan actual vs plan RCM.....	48
Figura 22. Fallas en bomba Vickers y bomba de riego (período 2014 – 2017).....	49
Figura 23. Diagrama de Pareto - fallas del sistema de riego (agosto de 2016)	52
Figura 24. Desempeño del housing del aspersor para un período de trabajo de 6 meses.	52

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características técnicas y operacionales de los elementos del sistema de riego.....	41
Tabla 2. Matriz de criterios para la evaluación y valoración de las consecuencias de los modos de falla.....	44
Tabla 3. Costo de sustitución cíclica vs correr a falla - Bomba Vickers	49
Tabla 4. Costo de sustitución cíclica vs correr a falla - Bomba de riego	50
Tabla 5. Costo mantenimiento a condición vs correr a falla – Bomba Vickers.....	50
Tabla 6. Comparativo costo rediseño rejilla primaria vs costo reparación por modo de falla “ingreso de material extraño”	51
Tabla 7. Costo de instalación y reparación de aspersores convencionales para un equipo en un período de 6 meses.....	53
Tabla 8. Costo de instalación y reparación de aspersores en acero inoxidable para un equipo piloto en un período de 6 meses.	53

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Análisis modal de fallos y efectos para el sistema de riego.....	59
Anexo B. Selección de tareas de mantenimiento.....	79
Anexo C. Plan de mantenimiento actual para el sistema de riego	84
Anexo D. Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para el sistema de riego	87

RESUMEN

TÍTULO: Modelo de Gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para el sistema de riego de camiones tanqueros de la empresa Drummond Ltd.*

AUTOR: Adolfo Andrés Marín Zabaleta **

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento, Confiabilidad, Camión Tanquero, Sistema de riego, AMFE, SAE JA1011, SAE JA1012

DESCRIPCIÓN: El presente proyecto es una aplicación práctica de las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 para el desarrollo de un modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a los camiones tanqueros de la empresa Drummond Ltd. El propósito es realizar un análisis funcional y de modos de falla al sistema de riego que permita construir un plan de mantenimiento tendiente a mejorar los índices de Confiabilidad y Disponibilidad de la flota de manera sostenida.

El análisis inicia con la definición de los límites de estudio y de la taxonomía del sistema de riego del camión tanquero. Seguidamente se enuncian las funciones de los componentes con bases en sus características técnicas y operacionales. Mediante la herramienta AMFE se determinan los modos razonablemente probables de falla para cada componente junto con sus efectos, los cuales son evaluados y valorados mediante una matriz de criterios previamente definidos y ajustados al contexto operacional de Drummond. Finalmente se seleccionan las tareas de mantenimiento adecuadas siguiendo el árbol lógico de decisión planteado por John Mubray. El modelo resultante es comparado con el plan de mantenimiento vigente para determinar el costo beneficio de su implementación.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Ing. Carlos Raúl Chacón Calderón. Especialista en Gerencia de Mantenimiento

ABSTRACT

TITLE: Management Model of Reliability Centered Maintenance (RCM) for the Spray System of the Water Tank Trucks at Company Drummond Ltd.*

AUTHOR: Adolfo Andrés Marín Zabaleta **

KEY WORDS: Maintenance, Reliability, Water Tank Truck, Spray System, FMEA, SAE JA1011, SAE JA1012

DESCRIPTION: The following project is a practical use of SAE JA1011 and SAE JA1012 standards for the development of a Reliability Centered Maintenance model for the water tank trucks fleet at Drummond Ltd. The purpose is to carry out a functional analysis to the water tank trucks spray system that lead to build up a maintenance plan that would improve the Reliability and Availability performance indicators of the fleet in a sustained manner.

The analysis begins with the definition of the boundaries and the taxonomy of the water tank trucks spray system. Subsequently, the functions of the components are set based on their technical and operational characteristics. By applying the FMEA techniques, the failure modes that are considered reasonably probable for each component are determined along with their effects, which are then assessed using a predefined matrix of criteria and adjusted to the operational context of Drummond Ltd. Finally, the appropriate maintenance tasks are selected following the Logical Decision Tree proposed by John Mubray. The resultant model is compared with the current maintenance plan in order to determine the cost – benefit of its implementation.

* Monograph

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization Course. Director: Eng. Carlos Raúl Chacón Calderón. Maintenance Management Specialist.

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, la compañía Drummond Ltd. consciente de su responsabilidad social y siempre con el objetivo de operar dentro del marco legal y con altos estándares de calidad industrial, ha incluido dentro de su política corporativa el cuidado del medio ambiente como un principio fundamental en el desarrollo de sus operaciones. En este sentido la compañía ha desarrollado planes orientados al monitoreo, control y mitigación de los impactos ambientales en todos los campos, incluyendo el agua y el aire.

Como parte de la conservación de la calidad del aire dentro de las operaciones mineras y sus alrededores, Drummond Ltd cuenta con una de las flotas de camiones tanqueros más grande y moderna del país. Sin embargo, en los años 2015 y 2016 la confiabilidad y la disponibilidad de la flota de tanqueros se ha visto afectada por fallas de diversa índole en los equipos, siendo el sistema de riego el que ha impactado más significativamente. El buen desempeño de estos equipos es vital para el cumplimiento de las disposiciones legales en materia ambiental, ya que la función de los tanqueros es mitigar la dispersión de material particulado en el ambiente.

El departamento de mantenimiento continúa en la búsqueda y formulación de estrategias que permitan lograr el rendimiento esperado de la flota de manera sostenida. El presente estudio tiene como fin contribuir al mejoramiento de los índices de confiabilidad y disponibilidad de la flota de tanqueros mediante el desarrollo de un modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad para el sistema de riego, sustentado por las normas SAE JA1011 y JA1012.

1. RESEÑA DE LA EMPRESA

La compañía Drummond Ltd. es un proyecto carbonífero constituido en Colombia por la norteamericana Drummond Company Inc. a mediados de la década de los 80 y cuyo propósito es la exploración, explotación y exportación de carbón térmico hacia diversos mercados alrededor del mundo. El proyecto se ubica en el departamento del Cesar en el área comprendida entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguana.

Drummond Ltd. inició sus operaciones a comienzos de los 90 con los estudios socioeconómicos y ambientales en los municipios de influencia y posteriormente con los trabajos de exploración. Hacia 1995 se inicia la producción y exportación de carbón junto con un proceso de expansión de sus operaciones tanto mineras como portuarias. Actualmente la explotación de carbón se desarrolla en 2 minas a cielo abierto conocidas como los proyectos Pribbenow y El Descanso y las operaciones de exportación se llevan a cabo desde de un puerto de cargue directo localizado en el municipio de Ciénaga, Magdalena.

Figura 1. Vista general del área de cargue en la mina Pribbenow



Fuente: Mina Pribbenow, Drummond Ltd.

La calidad del carbón extraído en Drummond Ltd. compete con la de otros carbones térmicos comercializados a nivel internacional. Posee un bajo contenido de azufre y ceniza, por lo cual cumple con las regulaciones internacionales, además de ser muy bajo en emisiones de óxidos de nitrógeno, cualidades deseables para aquellos sectores que requieren reducir los niveles de emisiones a la atmósfera.

En la actualidad Drummond Ltd. cuenta con aproximadamente 2.000 millones de toneladas en reservas de carbón que incluyen los proyectos La Loma y El Descanso (en fase de explotación), Rincón Hondo, Similoa y Cerro Largo (en fase de licenciamiento ambiental). En el año 2016 Drummond logró la cifra record de 32.6 millones de toneladas de carbón exportadas gracias a una fuerte inversión en infraestructura productiva.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del aire en cualquier operación minera a cielo abierto es uno de los mayores desafíos ambientales¹ y para la empresa minera Drummond Ltd., el control de las emisiones de material particulado es parte de su compromiso ambiental. Una de estas fuentes de emisión lo constituye el tránsito de equipos a través de las vías de sus minas Pribbenow y El Descanso. Debido a la naturaleza misma de la actividad, las vías del complejo no son pavimentadas o asfaltadas sino terrenos arenosos que han sido acondicionados para el tránsito vehicular lo cual propicia la generación de material particulado de polvo con el paso continuo de los equipos. Para controlar este efecto, Drummond Ltd. cuenta con una flota de camiones tipo tanquero cuya función es la humectación permanente de las vías con agua, mitigando así la suspensión de partículas que pudieran afectar la salud de la comunidad del área de influencia, poner en riesgo la seguridad de los conductores por baja visibilidad y generar incumplimiento de las normativas ambientales.

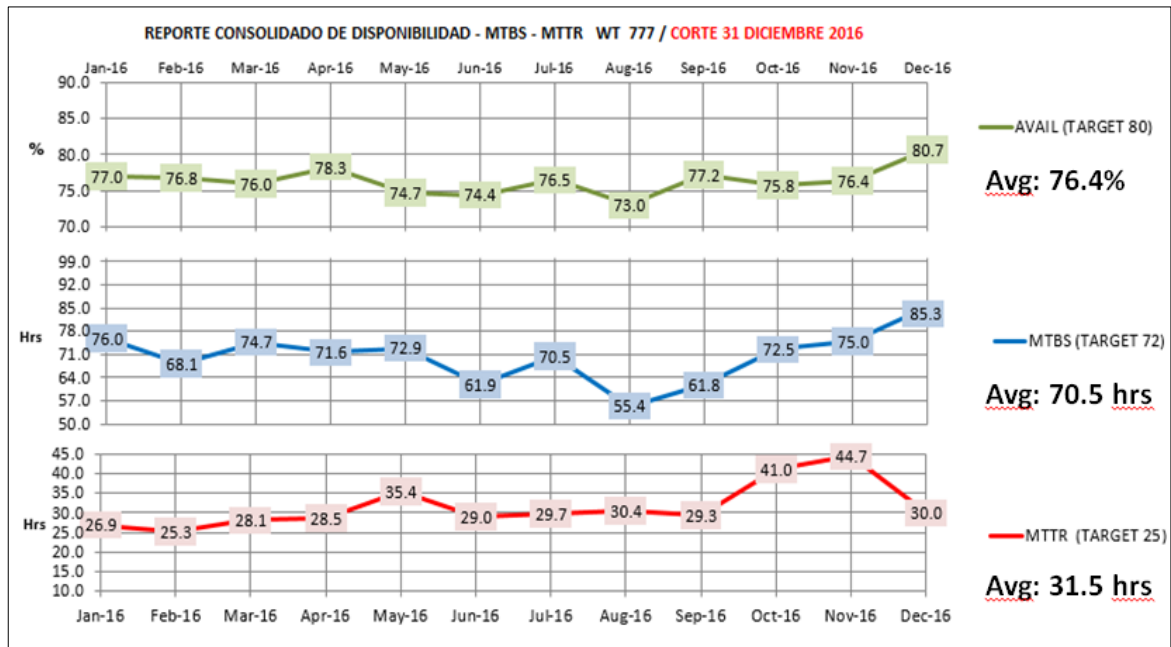
La flota de tanqueros de Drummond Ltd. la conforman 30 camiones del modelo Caterpillar 777C y 777D. Su operación está a cargo del Departamento de Vías y su mantenimiento es responsabilidad del Departamento de Mantenimiento de Equipo Móvil. Al revisar los indicadores del año 2016 para esta flota (figura 2) se observa un comportamiento irregular en el índice de confiabilidad, con algunos meses por encima de la meta y otros muy por debajo de ella. Adicionalmente, aunque se presentó un repunte en el índice de Confiabilidad a finales del año 2016, los valores promedio del año para la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de la flota se situaron por debajo de las metas establecidas.

Por la información disponible se sabe que el sistema que más impacta la confiabilidad de los camiones tanqueros es el sistema de riego (la razón de ser de

¹ Drummond Ltd. Compromiso ambiental: la calidad del aire. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.drummondLtd.com/compromiso-ambiental/calidad-del-aire/>

estos equipos), debido a que presenta la mayor tasa de falla. Al afectarse la confiabilidad y la disponibilidad de los tanqueros se comprometen el control de la polución, la salud de la comunidad, el mantenimiento de las condiciones de las vías y la seguridad en las operaciones de conducción debido a la baja visibilidad.

Figura 2. Indicadores de Mantenimiento para la flota de tanqueros, año 2016.



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond

Con base en lo expuesto anteriormente, este proyecto se concibe con el fin de desarrollar y proponer al Departamento de Mantenimiento un modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para el sistema de riego del camión tanquero y establecer una política de manejo de fallas orientadas al logro sostenido de las metas de Confiabilidad y Disponibilidad.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para el sistema de riego de los camiones tanqueros 777C/D de la mina Drummond Ltd.

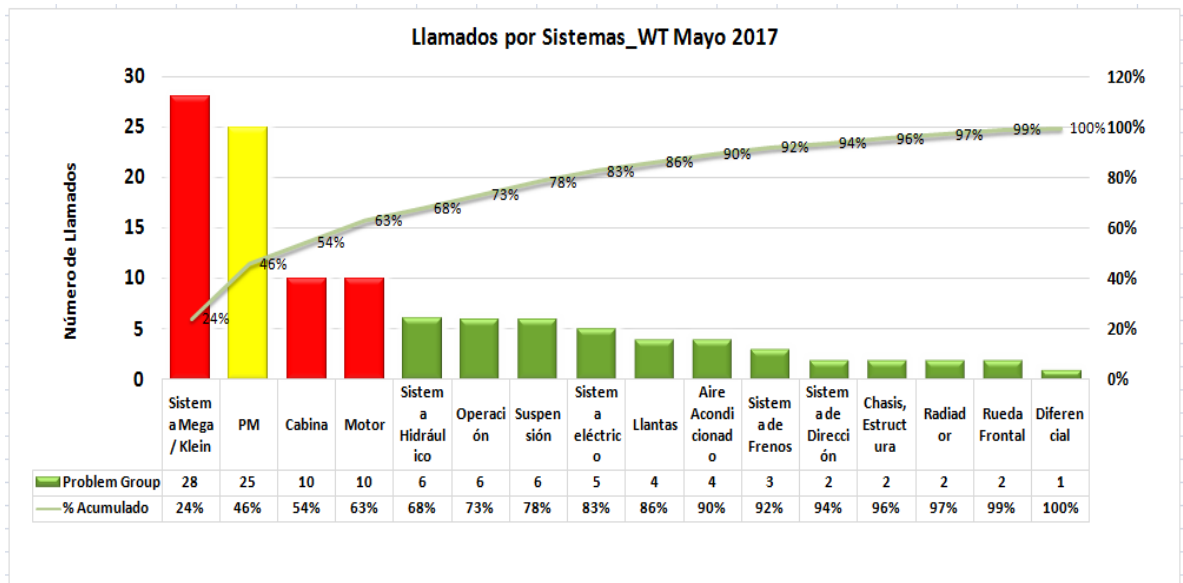
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la taxonomía del sistema de riego del camión tanquero y definir los límites del análisis funcional
- Desarrollar el modelo bajo los criterios de las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 para asegurar que cumple con la filosofía de RCM
- Implementar las técnicas de AMFE en la definición de los modos de falla y la evaluación de sus efectos
- Definir los criterios para la evaluación de las consecuencias de falla, ajustándolos al contexto operacional de Drummond
- Aplicar la herramienta de diagrama lógico de decisión para la selección de las actividades de mantenimiento
- Evaluar el costo-beneficio de la implementación potencial en la flota del modelo RCM resultante

4. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

El escenario actual para la flota de camiones tanqueros muestra que el sistema de riego (o sistema Mega /Klein) es uno de los que presenta mayor tasa de fallas (figura 3). Existe un notable interés por parte de los líderes del Departamento en definir estrategias para eliminar la causa raíz de las fallas que impactan significativamente la confiabilidad. Semanalmente se revisan indicadores y se definen planes de acción tendientes a asegurar el cumplimiento de las metas. A pesar de esto, las estrategias se conciben de manera reactiva, es decir solo cuando una falla es recurrente y se vuelve imprescindible su manejo.

Figura 3. Clasificación de fallas por sistema para la flota de tanqueros.



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil - Drummond

El desarrollo de una metodología como la que plantea el RCM para el sistema de riego de los tanqueros permitiría enfocar los esfuerzos actuales del Departamento de una manera proactiva, pues al evaluar todos los potenciales modos de falla y sus consecuencias se puede definir una política clara de manejo de fallas en estos equipos, orientada a lograr los niveles de confiabilidad deseados. Por otra parte, la

aplicación de RCM a un sistema conocido y de relativamente fácil entendimiento por parte del personal de la flota puede incentivar su desarrollo y aplicación a otros sistemas del mismo equipo e inclusive a otro tipo de flotas donde existan problemas de baja confiabilidad.

Asimismo, teniendo en cuenta que una baja confiabilidad y disponibilidad en la flota de tanqueros afecta el manejo y control de la polución por material particulado, repercute en el cumplimiento de las disposiciones medioambientales e incrementa los riesgos de las operaciones de conducción dentro de la mina, el proyecto a desarrollar va de la mano con la política de la compañía que considera “el cuidado de la salud, la seguridad y el ambiente como un valor primordial en el desarrollo de sus actividades”.²

² Drummond Ltd. Política Drummond Ltd – Colombia. 2013

5. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Introducción. A finales de los años 50 la industria de la aviación comercial enfrentaba un problema de accidentalidad ocasionado principalmente por fallas en los equipos. Para la época, las estrategias de mantenimiento se basaban en reparaciones periódicas tendientes a prevenir la aparición de fallas por desgastes en piezas y componentes. Sin embargo, la efectividad de este modelo de gestión empezó a cuestionarse pues no lograba su objetivo, ya que las fallas lejos de disminuir parecían incrementarse, sin mencionar los altos costos que acarrea este modelo.

En un esfuerzo de la industria de la Aviación Civil Norteamericana por desarrollar mejores prácticas de mantenimiento para el sector, se conformaron los “Grupos de Dirección de Mantenimiento” o “Maintenance Steering Groups – MSG”, integrados por fabricantes de aviones, representantes de las aerolíneas y la Administración Federal de Aviación (FAA – Federal Aviation Administration). A partir de allí ha sido notable la reducción de la accidentalidad en la aviación comercial a tal punto que se convirtió en el medio de transporte más seguro. Este logro fue posible debido a que la gestión del mantenimiento evolucionó hacia un proceso analítico y sistemático que dio origen a la filosofía de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.³

5.1.2 Definición del RCM. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM por sus siglas en inglés (Reliability Centered Maintenance) es una filosofía de mantenimiento que surge como un avance a las formas tradicionales de gestión del mantenimiento. Documentada por F.S. Nowlan y H.F. Heap a finales de la década de los 70 y desarrollada inicialmente para la industria de la aviación comercial, tiene

³ Reliabilityweb: A Culture of Reliability. El camino hacia el RCM. Fort Myers, EE.UU. Recuperado de <https://www.reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-camino-hacia-el-rcm>

como objetivo fundamental asegurar que los activos cumplan las funciones que de ellos se espera dentro de un contexto operacional dado. Mubray lo define como un “proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que los usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”.⁴

La efectividad comprobada de esta metodología ha motivado su extensión y aplicación en todo tipo de industrias a nivel mundial, en muchos casos con variaciones significativas que se alejan de los principios del RCM. Debido a esto y con el fin de establecer unos lineamientos para su correcta implementación, la Society of Automotive Engineers (SAE) emitió las normas SAE JA1011, que define los criterios para que un proceso de gestión pueda considerarse RCM, y la SAE JA1012 que ofrece una guía para su implementación.

5.1.3 Metodología del RCM. El RCM parte del concepto de que todo activo realiza una acción específica por la cual fue concebido o adquirido (función) y dentro de unos parámetros o expectativas de funcionamiento requeridos por el usuario (contexto operacional). A partir de allí el análisis busca determinar las tareas adecuadas de mantenimiento que deben realizarse con el fin de preservar la función de los activos.

De acuerdo con la norma SAE JA1011⁵, para que un proceso pueda ser considerado como RCM debe responder los 7 interrogantes a continuación:

- 1) ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?

⁴ Moubray, J. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centred Maintenance). Asheville, EE.UU. Ed. Aladon LLC. 1991. p. 7.

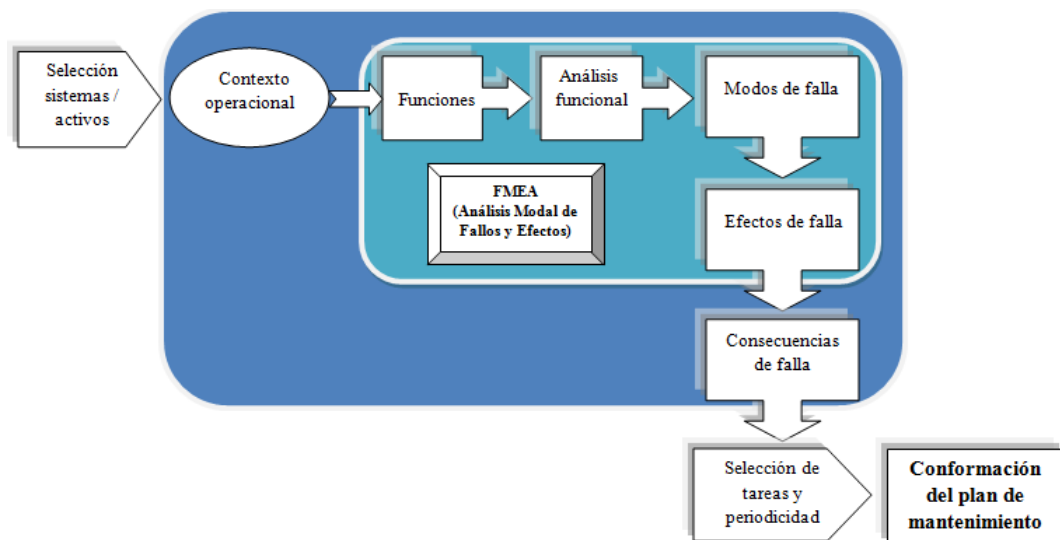
⁵ Society of Automotive Engineers. SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes. 1999.

- 2) ¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
- 3) ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
- 4) ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?
- 5) ¿De qué manera afecta cada falla (consecuencias de falla)?
- 6) ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de tareas)?
- 7) ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible (acciones predeterminadas)?

En la práctica, para responder adecuadamente a estas preguntas es deseable la conformación de un grupo interdisciplinario que integre tanto al personal de mantenimiento (departamento de mantenimiento) como a los usuarios (departamento de producción / operaciones) ya que generalmente son estos últimos quienes pueden definir de mejor manera los contextos operacionales de los activos.

La metodología RCM puede resumirse como lo muestra el diagrama de la figura 4.

Figura 4. Diagrama del proceso RCM



Fuente: El autor

5.1.4 Beneficios del RCM. La aplicación de RCM permite alcanzar 3 resultados tangibles⁶ :

- Una política adecuada de manejo de falla que definirá las tareas de mantenimiento a realizar
- Manuales y procedimientos de operación revisados y actualizados
- Una lista de cambios que deben hacerse al diseño del activo o a la manera en que es operado con el fin de manejar aquellos escenarios en los cuales el diseño actual no permite cumplir con las expectativas de funcionamiento

Por otro lado, el RCM se convierte en una herramienta útil para gestionar el conocimiento de mantenimiento pues por la forma organizada y lógica como se desarrolla crea una base de información que sirve como referencia para futuras revisiones del plan de mantenimiento⁷. El desarrollo de la metodología, además, estimula la participación activa del recurso humano, contribuye a aumentar el nivel de conocimiento que se tiene acerca de los activos y su forma de operarlos y promueve el trabajo en equipo del personal.

5.1.5 Barreras para la implementación del RCM. Debido al nivel de análisis que exige la metodología, el RCM requiere de una cantidad importante de recursos que en ocasiones las empresas no están dispuestas a invertir. Inicialmente requiere de un grupo de trabajo lo que implicará destinar un recurso humano en varios niveles (operadores, técnicos, supervisores, directivos...) y con amplios conocimientos del activo, con el consiguiente requerimiento de tiempo, el cual dependiendo de la complejidad del activo o sistema a analizar puede tomar varias semanas y hasta meses de trabajo.

⁶ Moubray, J. Op. Cit., p. 18.

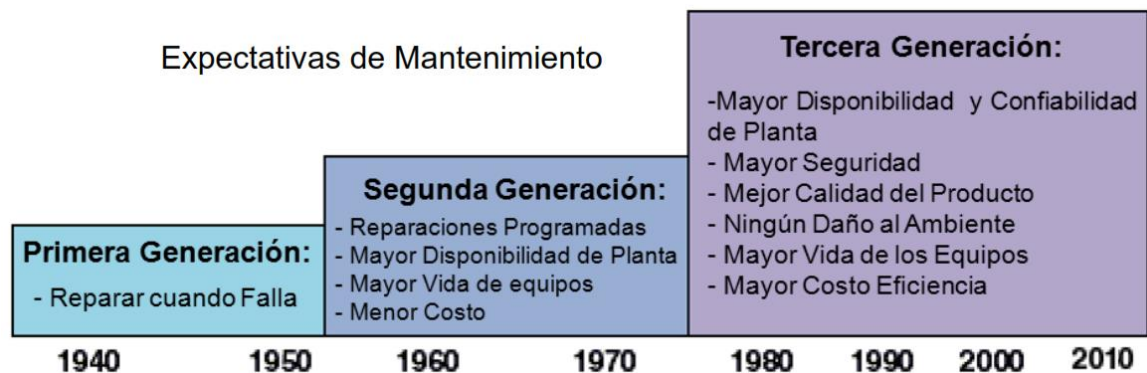
⁷ Ortiz, D. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC. Guía práctica.

Adicionalmente la necesidad de un facilitador conocedor de la metodología que se encargue de guiar y orientar todo el proceso de aplicación, es una figura que en la mayoría de las ocasiones no está disponible al interior de la empresa. Se requiere también de un entrenamiento inicial en RCM que podría demandar recursos económicos. Otros requerimientos para su implementación son información técnica de los activos, que en algunas ocasiones es insuficiente o no está disponible, instalaciones físicas para las reuniones y recursos intangibles como motivación y esfuerzo por parte de los participantes para alcanzar los objetivos propuestos.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

La figura 5 muestra como las expectativas del mantenimiento han evolucionado con el paso de los años hasta posicionar los conceptos de Confiabilidad y Disponibilidad de los activos como aspectos claves de la gestión del mantenimiento en casi todos los sectores industriales.

Figura 5. Cambios en las expectativas de Mantenimiento.



Fuente: RCM II: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (J. Mubray)

Para el Departamento de Mantenimiento de Equipo Móvil de Drummond Ltd, la Confiabilidad y la Disponibilidad hacen parte de los indicadores con los cuales se mide la gestión del mantenimiento, por lo cual las estrategias y planes de acción

deben orientarse a que los activos cumplan adecuadamente su función (Confiabilidad) en el momento en que sean requeridos (Disponibilidad), siendo el RCM una estrategia adecuada para tal fin.

En el enfoque tradicional de mantenimiento, es común definir las actividades a partir de las recomendaciones del fabricante o basados en las características técnicas de los activos, buscando conservar su capacidad nominal o de diseño. Es un enfoque presente en las estrategias de Drummond Ltd, donde los planes de mantenimiento se basan en rutinas recomendadas por Caterpillar, fabricante de los equipos, que con el tiempo se han ido actualizando y ajustando a las necesidades propias de la operación. Si bien es un enfoque válido y que ofrece resultados se orienta más a la conservación de los activos que a la preservación de su función. Generalmente este tipo de gestión considera que la confiabilidad está relacionada con la edad o el tiempo de servicio de los activos y que a mayor mantenimiento menor probabilidad de falla, por lo que es probable que se incorporen más rutinas de mantenimiento de las requeridas y con ello introducir fallas en los sistemas.

Teniendo en cuenta que no todas las fallas tienen los mismos efectos sobre la operación, sobre los costos, sobre la seguridad, etc., las actividades de mantenimiento concebidas deberían tener diferentes niveles de prioridad. El RCM se enfoca en aquellas actividades de mantenimiento con mayor incidencia en el desempeño o funcionamiento de las instalaciones y equipos, restando importancia a aquellas que tienen escaso resultado. Con esto se logra un mantenimiento más efectivo y con mejor aprovechamiento de los recursos.⁸

El enfoque mediante RCM tiene la ventaja de integrar de forma implícita aspectos como la seguridad y el medio ambiente a la gestión del mantenimiento. Esto es posible porque además de orientarse a preservar la función de los activos en su

⁸ J. Moubray. Op. Cit., p. 16

contexto operacional, concede prioridad a las consecuencias de una falla sobre sus características técnicas, por lo que las actividades de mantenimiento se conciben para evitar o reducir las consecuencias de una falla.⁹

Uno de los mitos en torno a la aplicación de RCM es que debe realizarse a todos los equipos o sistemas de una compañía. Si bien esto es posible e ideal, no es imperativo ni recomendable hacerlo de forma simultánea, pues requeriría un esfuerzo masivo e intensivo y con plazos de tiempo que usualmente se definen sin fundamento, lo que conlleva a resultados pobres. Se aconseja aplicarlo de forma gradual y selectiva, a equipos, sistemas o activos en los cuales los facilitadores con sus grupos de análisis disminuyan los niveles de insatisfacción¹⁰. Por esta razón se ha decidido delimitar las fronteras de análisis en este proyecto seleccionando uno de los sistemas del camión tanquero (sistema de riego) como objeto de estudio, por su mayor tasa de falla y porque desempeña la función principal del equipo.

⁹ J. Moubray. Op. Cit., p. 11.

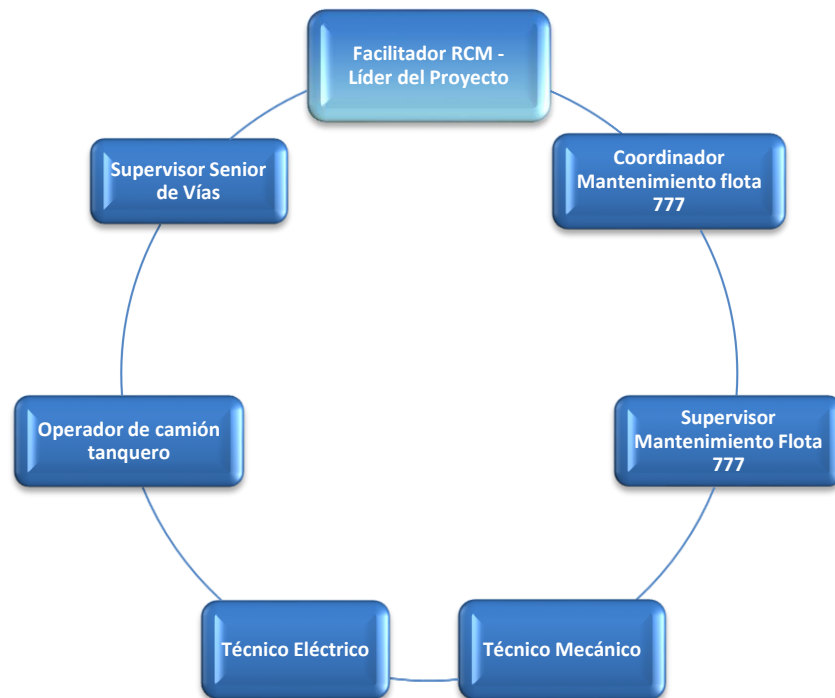
¹⁰ Reliabilityweb: A Culture of Reliability. Mitos para la implementación de RCM. Fort Myers, EE.UU. Recuperado de <https://www.reliabilityweb.com/sp/articles/entry/mitos-para-la-implementacion-de-rcm>

6. DESARROLLO METODOLÓGICO DEL RCM

6.1 PRELIMINARES

En el desarrollo de la metodología se han tenido en cuenta los lineamientos contenidos en las normas SAE JA1011 y SAE JA1012. Puesto que responder adecuadamente a las 7 preguntas planteadas en la norma exige un alto nivel de conocimiento de la máquina, se ha seleccionado un grupo interdisciplinario de trabajo conformado por diversas especialidades, de distintos niveles jerárquicos, dentro de los departamentos relacionados con la operación y mantenimiento de los camiones tanqueros. La conformación de este grupo se muestra en la figura 6.

Figura 6. Conformación del equipo de trabajo de RCM



Fuente: El autor

6.2 DELIMITACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

De acuerdo con el planteamiento del problema, la metodología será aplicada al sistema de riego de los camiones tanqueros Caterpillar, modelo 777C (serie 4XJ) y 777D (series 5ER y AGC). Una vista general de un camión tanquero en operación se presenta en la figura 7.

Figura 7. Camión tanquero Caterpillar modelo 777C

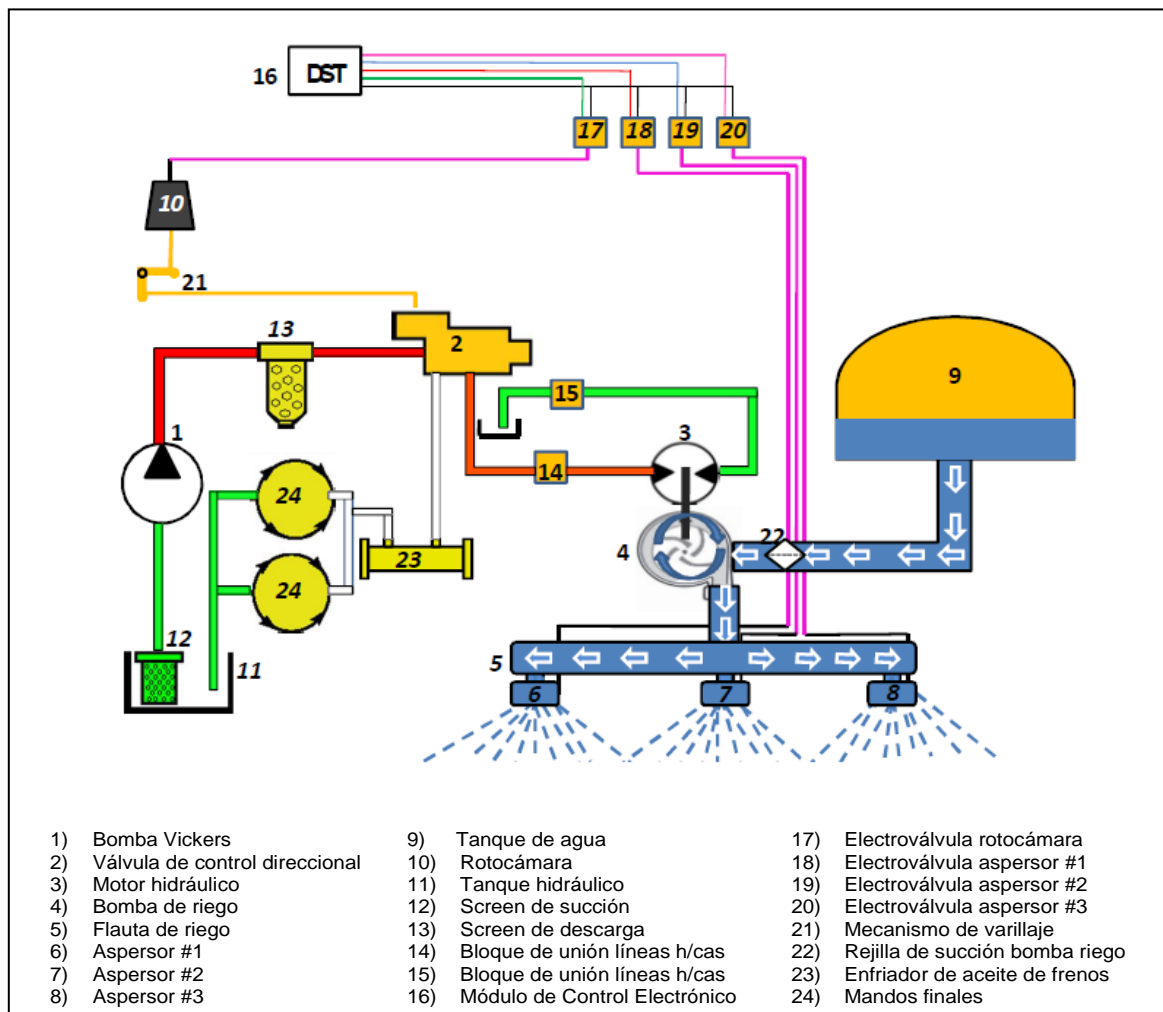


Fuente: Mina Pribbenow

La figura 8 muestra el esquema general del sistema de riego del camión tanquero. El esquema incluye algunos elementos como el enfriador de aceite hidráulico de frenos y los mandos finales, que hacen parte del circuito hidráulico del equipo, pero no del sistema de riego. De esta forma, el análisis funcional se limitará sólo a los elementos esenciales del sistema de riego, es decir aquellos cuya función primaria

está destinada a permitir el riego de agua (con excepción del tanque hidráulico, que también tiene la función de suministrar aceite a los sistemas de convertidor y frenos). No se tendrán en cuenta elementos auxiliares que interactúan con algunos componentes del sistema de riego, pero cuya función está destinada a la operación de otros sistemas del equipo (por ejemplo, no se analiza el compresor de aire que hace parte del sistema de frenos, ni los mandos finales que forman parte del tren de potencia).

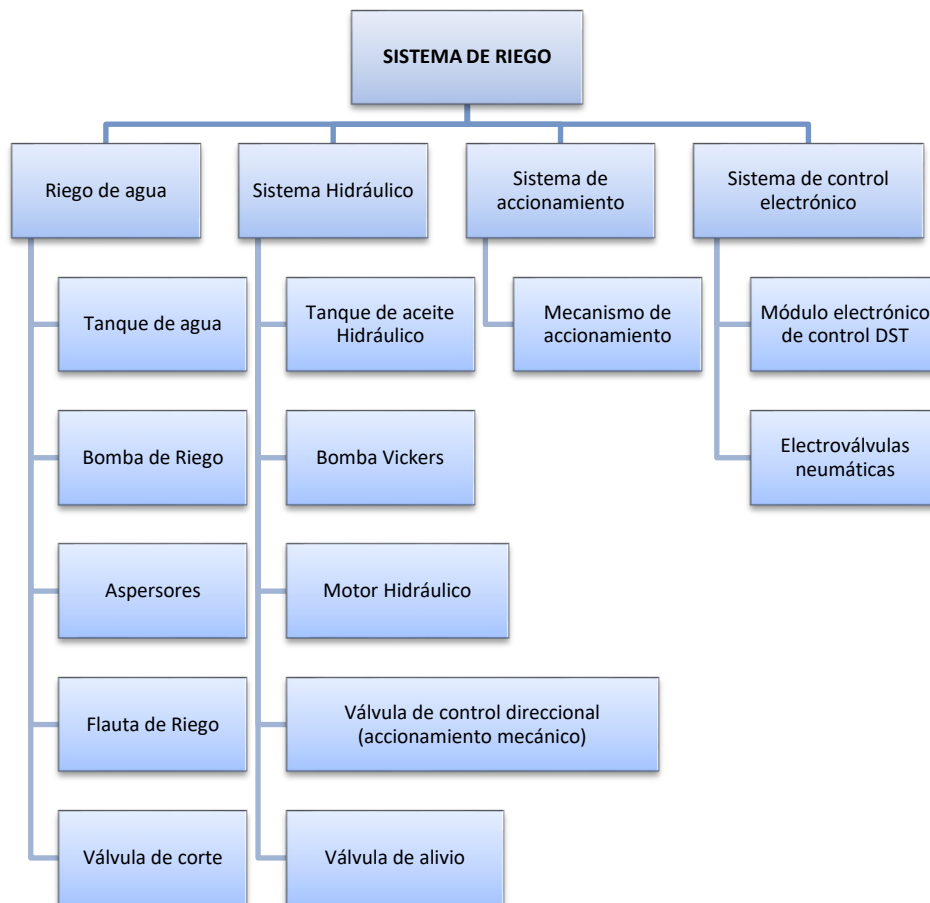
Figura 8. Esquema del sistema de riego camiones 777C/D.



Fuente: Departamento de Mantenimiento de Equipo Móvil – Drummond.

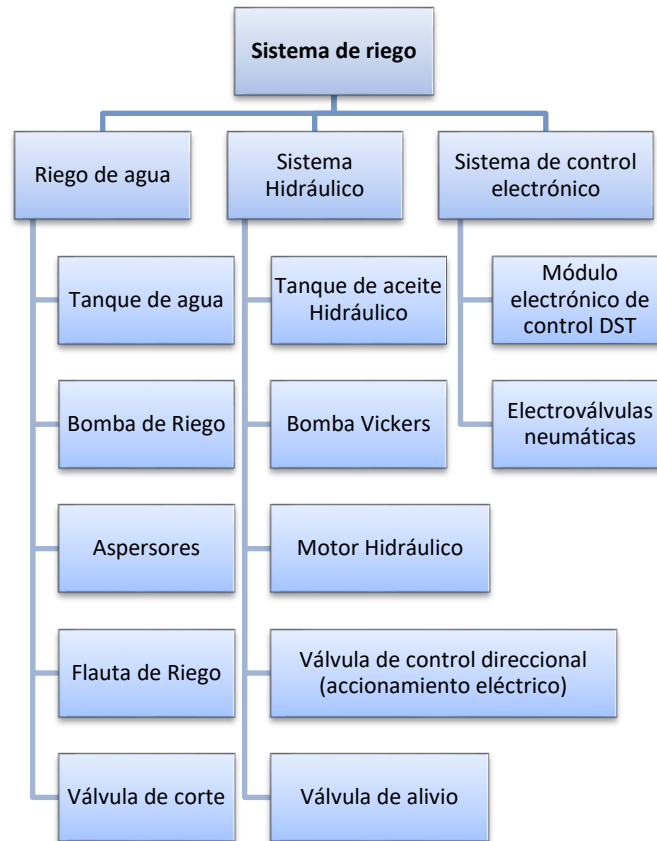
Con base en lo anterior, la taxonomía del sistema de riego se ha definido según se muestra en las figuras 9 y 10. Debido a que la serie AGC difiere de las series 4XJ y 5ER en la forma de activación de la válvula de control direccional se han establecido dos taxonomías independientes. Por lo tanto, aunque básicamente se tratan de los mismos componentes, en el desarrollo de la metodología se tendrá en cuenta esta diferencia realizando un análisis funcional para los dos tipos de válvula de control.

Figura 9. Taxonomía del sistema de riego, camiones series 4XJ y 5ER.



Fuente: El autor.

Figura 10. Taxonomía del sistema de riego, camiones serie AGC.



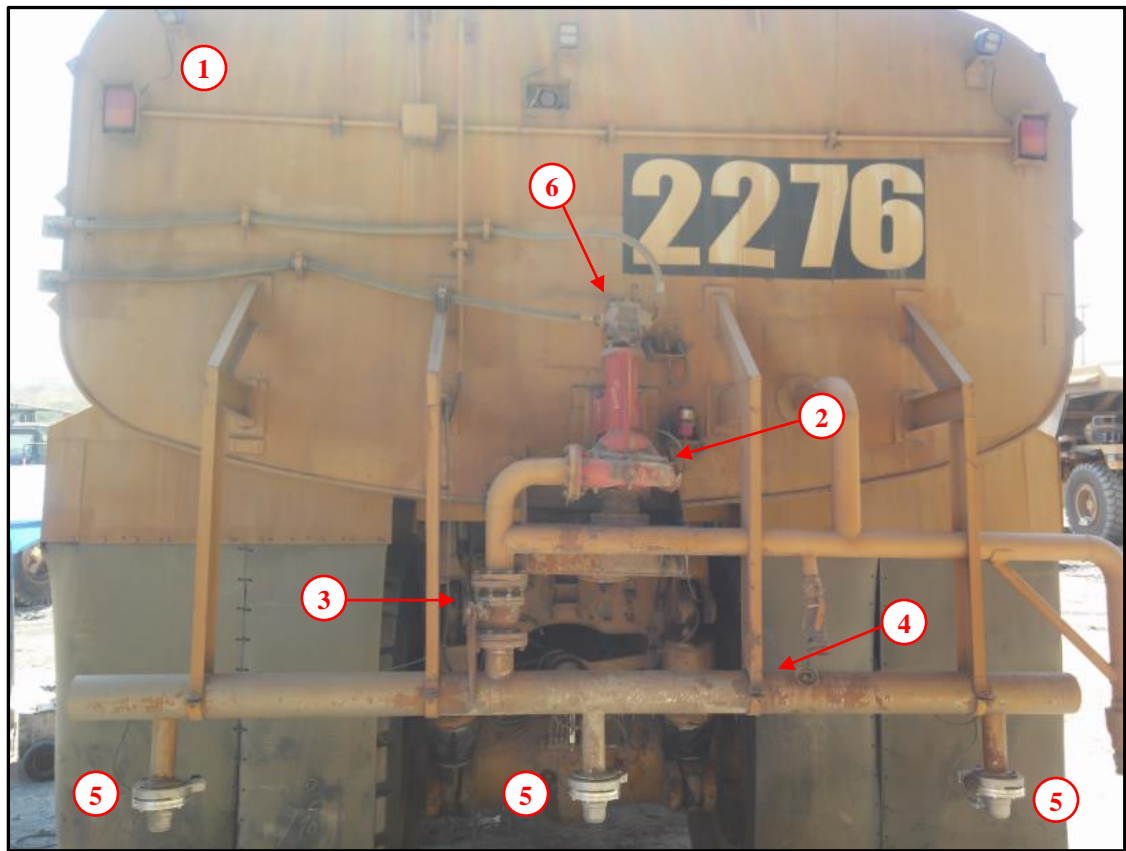
Fuente: El autor.

6.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

A continuación, se describe brevemente cada uno de los elementos que conforman el sistema de riego.

6.3.1 Tanque de agua. Funciona como reservorio para almacenar y transportar el agua que será esparcida en el área específica asignada al equipo. Con capacidades que van desde los 18.000 a los 22.000 galones, existen varias configuraciones disponibles cada una de las cuales recibe el nombre según el fabricante (figura 11).

Figura 11. Vista general del sistema de riego. Tanque de agua (1); bomba de riego (2); válvula de corte (3); flauta de riego (4); aspersores (5); Motor hidráulico (6).



Fuente: Mina Pribbenow.

6.3.2 Bomba de riego. Bomba centrífuga de impulsor abierto, ubicada en la parte trasera del tanque de agua, en posición vertical. Es accionada mediante un motor hidráulico que va montado sobre el cuerpo de la misma. Se encarga de elevar la presión del agua y conducir el flujo hacia los aspersores (figura 11).

6.3.3 Aspersores. Válvulas provistas de resorte y diafragma de accionamiento neumático y ranura de descarga ajustable para generar el efecto de spray y aumentar el alcance del agua. Cada camión posee 3 aspersores ubicados en la parte trasera del equipo (figuras 11 y 12).

Figura 12. Aspersor de riego.



Fuente: MEGA Corp - Service Manual

6.3.4 Flauta de riego. Tubería de distribución de agua que conecta la bomba de riego con los aspersores (figura 11).

6.3.5 Válvula de corte. Utilizada principalmente para aislar los aspersores del tanque de agua, por ejemplo, para labores de mantenimiento o el uso de los cañones de riego (figura 11).

6.3.6 Tanque de aceite hidráulico. Reservorio de aceite para el funcionamiento del sistema hidráulico de riego. Es compartido además con el convertidor de torque y el sistema de frenos (figura 13).

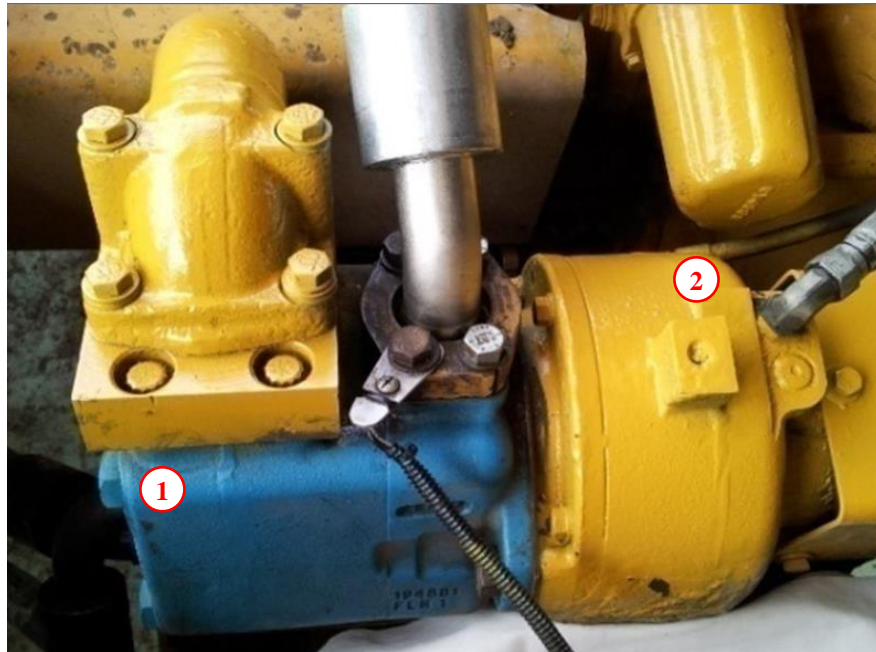
Figura 13. Tanque de aceite hidráulico.



Fuente: Mina Pribbenow.

6.3.7 Bomba hidráulica Vickers. Bomba de desplazamiento positivo de tipo paletas y accionada por un toma fuerza conectado al motor Diesel del camión. La bomba Vickers es el corazón del sistema hidráulico y la encargada de generar la potencia hidráulica necesaria para accionar el motor hidráulico que mueve la bomba de riego (figura 14).

Figura 14. Bomba hidráulica Vickers (1) y toma fuerza del motor diesel (2).



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

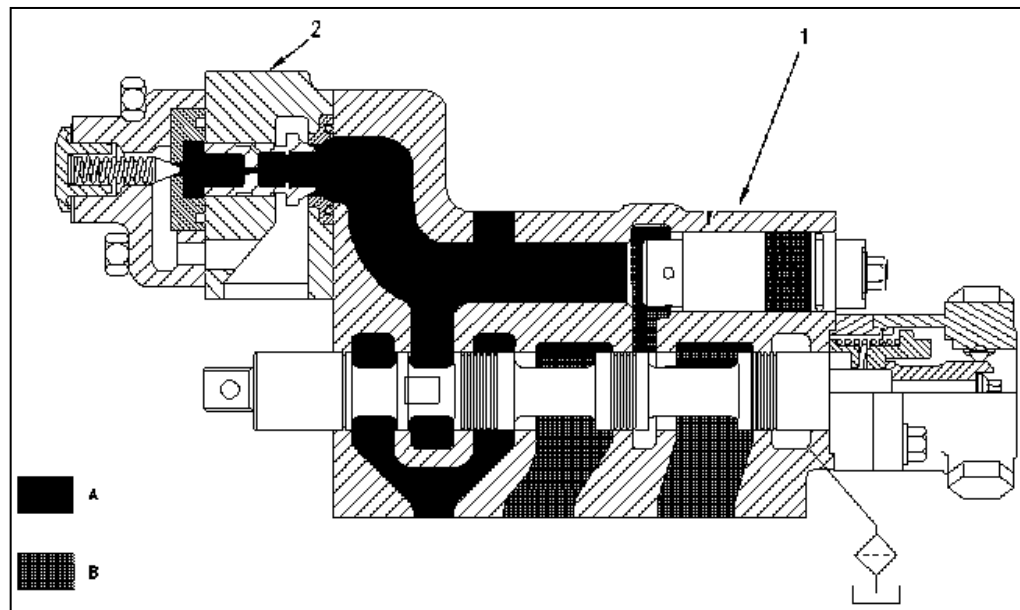
6.3.8 Motor hidráulico. De tipo piñones, transforma la potencia hidráulica proveniente de la bomba Vickers en el torque necesario para mover la bomba de riego. (Figura 11).

6.3.9 Válvula de control direccional. Es la encargada de direccionar el aceite hidráulico procedente de la bomba Vickers, bien sea hacia los mandos (para enfriamiento de los paquetes de frenos) o hacia el motor hidráulico para poner en funcionamiento el sistema de riego (figura 15). Según la serie del equipo esta válvula puede ser accionada mecánicamente a través de un sistema de varillaje (series 4XJ

y 5ER) o eléctricamente mediante un solenoide que desplaza el carrete principal (serie AGC). Adicionalmente para los equipos con accionamiento mecánico la válvula se encuentra sumergida en el tanque hidráulico mientras que para el accionamiento eléctrico se encuentra fuera de él, soportada en el chasis del camión.

6.3.10 Válvula de alivio. Encargada de proteger el sistema hidráulico contra sobrepresiones súbitas limitando la presión máxima de operación. Físicamente se encuentra integrada a la válvula de control direccional (figura 15).

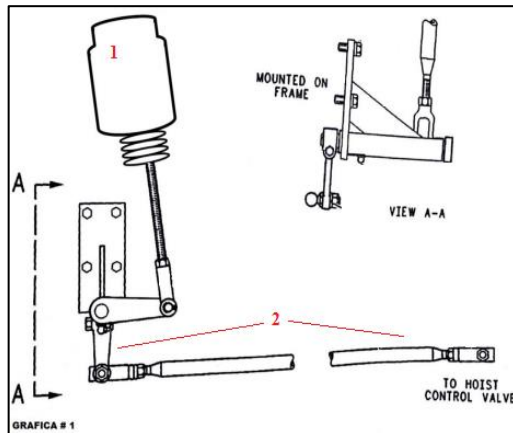
Figura 15. Esquema de la válvula de control hidráulico. Válvula direccional (1) y válvula de alivio incorporada (2).



Fuente: Caterpillar - Manual de mantenimiento camión CAT 777C/D.

6.3.11 Mecanismo de accionamiento. Es el encargado de suministrar energía mecánica para mover el carrete de la válvula de control hidráulico. Se compone de una rotocámara de aire y un sistema de levas y varillas que transmiten el movimiento hacia el carrete de la válvula. Disponible únicamente en los equipos serie 4XJ y 5ER (figura 16).

Figura 16. Mecanismo de accionamiento de la válvula de control direccional. Rotocámara (1) y sistema de varillaje (2).



Fuente: Caterpillar - Manual de mantenimiento camión CAT 777C/D.

6.3.12 Módulo de control electrónico. Es el encargado de controlar la operación del sistema de riego mediante el envío de las señales a las electroválvulas según los requerimientos del operador. Adicionalmente provee un sistema de monitoreo de variables y emisión de alarmas que permite alertar al operador cuando existe una condición anormal en el equipo como bajo nivel de agua, bajo nivel de aceite hidráulico o alta temperatura (figura 17).

Figura 17. Panel del módulo electrónico de control de riego.



Fuente: Mina Pribbenow.

6.3.13 Electroválvulas neumáticas. Encargadas de abrir y cerrar el paso del aire hacia los aspersores y hacia la rotocámara, para aquellos equipos con control hidráulico accionado mecánicamente. (Figura 18).

Figura 18. Electroválvula neumática.



Fuente: Mina Pribbenow.

6.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y CONTEXTO OPERACIONAL DE LOS ELEMENTOS

Teniendo claros los límites del análisis y a partir de la taxonomía establecida para el sistema de riego, se han definido las características técnicas y el contexto operacional de los elementos que componen el sistema de riego, para lo cual se ha tomado la información disponible en manuales de operación y mantenimiento, procedimientos y la experiencia del grupo de trabajo. En términos generales los camiones tanqueros operan 24 horas al día, 7 días a la semana suspendiendo su operación únicamente en tiempo de lluvia debido que en estas condiciones el riego de las vías se logra de manera natural. La información específica para cada componente se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas y operacionales de los elementos del sistema de riego.

SISTEMA	ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	CONDICIONES OPERACIONALES
SISTEMA DE RIEGO	Tanque de agua	Capacidad: 18000 / 20000 Galones Presión atmosférica Material: Acero al carbón Sistema de baffles internos para proporcionar rigidez y reducir efecto de oleaje	Agua cruda de estanque a presión atmosférica y temperatura ambiente, con alto grado de impurezas y material sólido (piedras, barro, partículas de tamaño considerable...)
	Bomba de riego	Marca: Berkely Modelo B-4J Caudal: 0 - 1800 gpm Presión: 35 - 165 psi Rango de velocidad: 1400 - 2400 rpm Sistema de sellado por empaquetadura Acople rígido tipo estriado directo al motor hidráulico	Bomba montada verticalmente, operación intermitente con ciclos de arranque y parada variables según la configuración establecida por el operador, presión de descarga en rango de 55-80 psi, caudal máx. 200 gpm y velocidad de giro variable en el rango de 950 - 1800 rpm según las rpm del motor del camión
	Aspersores	Material: aluminio Ranura ajustable para apertura de 1/4" y 3/8" Ángulo de spray entre 15° y 90° Cierre mediante diafragma y resorte Provisto de válvula de desfogue rápido en la entrada	Para función de apertura, los aspersores abren intermitentemente según se active la bomba de riego, apertura de la ranura y ángulo de salida prefijados antes del arranque del equipo. Para función de cierre los aspersores operan con presión de aire permanente de 90 - 120 PSI
	Flauta de riego	Material: acero al carbón Diámetro: 3" Conexiones bridadas a los elementos	Tubería sometida a desgaste abrasivo por presencia de material particulado en el agua y vibraciones continuas por desplazamiento en terreno irregular
	Válvula de corte	Tipo bola Diámetro: 3" Conexión: bridada Apertura y cierre: manual	La posición normal de la válvula de corte es abierta, para permitir el paso de agua desde la bomba hacia los aspersores
SISTEMA HIDRÁULICO	Tanque hidráulico	Capacidad: 50 Galones Tipo aceite: SAE 30	Aceite a presión atmosférica, temperatura máxima admisible del aceite de 100°C
	Bomba Vickers	Tipo: paletas Modelo: 45VQ60A11C20 Flujo nominal: 60 gpm @ 1200 rpm Desplazamiento: 11,8 in ³ /rev Acople directo al PTO mediante eje estriado Puertos de succión y descarga en línea	Bomba de montaje horizontal, con acople directo al eje del motor. Presión mín. de 680 psi (en baja rpm) y máx. de 1800 psi (alta rpm). Flujo de entrega en el rango de 35-70 gpm según las rpm del motor. Velocidad de giro de la bomba variable en el rango de 700-2000 rpm
	Motor hidráulico	Tipo: piñones Marca: Permco Modelo: serie 7500 - 2" ancho Desplazamiento: 8,2 in ³ /rev Rango de flujo: 34.5 - 78.5 gpm Velocidad: 800 - 2000 rpm	Motor hidráulico de montaje vertical, acople rígido estriado, directo con la bomba centrífuga. Velocidad de giro del motor variable en el rango de 950 - 1800 rpm según el caudal entregado por la bomba hidráulica
	Válvula de control direccional	Tipo: 5 posiciones / 7 vías Accionamiento mecánico (series 4XJ y 5ER) Accionamiento eléctrico por solenoides (serie AGC)	Válvula de control direccional opera solamente en las posiciones HOLD (permitiendo flujo hacia los mandos) y RAISE (permitiendo flujo hacia el motor hidráulico)
	Válvula de alivio	Tipo: dual (funciones de ALTA y BAJA presión) Apertura con presión piloto Integrada a la válvula de control direccional	Opera sólo para la función de alta presión (posición RAISE de la v/v de control). Presión de apertura ajustada a 1800 psi
SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	Mecanismo de accionamiento	Rotocámara marca Bendix Referencia Type 12 Puerto conexión aire: 3/8" NPT Longitud del actuador: 11" Rosca del vástago: 1/2" x 20"	Activación de rotocámara de manera intermitente según la configuración establecida por el operador. Presión de trabajo: 90 - 120 psi
MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL	Módulo electrónico de control	Marca: DST Voltaje alimentación: 24V Radio receptor para enlace con pulsador inalámbrico Memoria EEPROM de 512 kb Capacidad para almacenar 2000 alarmas Display LCD	Operación continua del módulo mientras el camión esté en funcionamiento (detectado mediante señal del alternador). Alimentación provista por el circuito de 24V del camión.
	Electroválvulas neumáticas	Marca: Lincoln Modelo: 274398 Tipo: 2 posiciones / 3 vías Voltaje alimentación: 24V Presión máx: 150 psi	Presión de trabajo: 90 - 120 psi

Fuente: El autor.

6.5 DEFINICIÓN DE FUNCIONES Y DESARROLLO DEL AMFE

Conocidas las características técnicas de los elementos de estudio y su contexto operacional, se dispone de la información mínima para realizar el análisis funcional a fin de responder las dos primeras preguntas planteadas en la metodología de la norma SAE JA1012. Se inicia entonces con la definición de las funciones, tanto primarias como secundarias, que desempeñan cada uno de los elementos del sistema de riego, así como también los estándares de desempeño esperados y las fallas funcionales.

Las preguntas 3 y 4 de la metodología se han abordado mediante las técnicas de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE). Como fuentes de información para la determinación de los modos de falla se han tenido en cuenta los registros históricos de los equipos de Drummond, obtenidos de la plataforma de gestión de mantenimiento People Soft. También se han revisado las guías caza-fallas emitidas por los fabricantes y que se encontraron disponibles para algunos de los componentes (como la bomba Vickers y la bomba de riego). Asimismo, el conocimiento y la experiencia de los miembros del grupo de trabajo permitieron identificar otros modos de falla potenciales. Finalmente, también se tuvo en cuenta el plan de mantenimiento vigente de los tanqueros a fin de identificar modos de falla que estuvieran siendo controlados en la actualidad.

Para algunos modos de falla, el análisis se ha llevado hasta un tercer nivel de causalidad, con el objetivo de identificar las partes del equipo sujetas a mantenimiento y realizar una adecuada selección de las tareas. Por su parte los efectos se han descrito con el mayor nivel de detalle posible, incluyendo la acción correctiva y el tiempo estimado de restauración del equipo.

Se debe mencionar que en el AMFE han sido identificados modos de falla causados por errores operacionales o de mantenimiento. Sin embargo, para estos modos no

se plantean tareas de mantenimiento y sólo se evalúan con el fin de determinar si las consecuencias asociadas al modo en cuestión ameritan un análisis posterior que permita controlar o eliminar la ocurrencia de éstos.

Por otra parte, algunos de los modos de falla identificados tienen su origen en sistemas externos al sistema de riego (por ejemplo, las fallas por contaminación del aceite hidráulico producto de fallas en otros sistemas de la máquina). Al igual que para los modos originados por falla humana, las consecuencias asociadas se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis más detallado, pero no se plantean tareas de mantenimiento debido a que los elementos asociados no hacen parte del alcance del presente RCM. Dichas observaciones se registran en las hojas de RCM.

Para la valoración de las consecuencias (pregunta 5) se definieron 4 criterios ajustados al contexto operacional de Drummond (descritos con mayor detalle en la matriz de la tabla 2):

- Seguridad: el impacto que tiene el modo de falla sobre la integridad del operador.
- Ambiental: el impacto que tiene el modo de falla sobre el medio ambiente y el entorno.
- Costos: el impacto que tiene el modo de falla en términos económicos, cuantificado como el costo de repuestos y mano de obra necesarios para corregir la falla.
- Impacto operacional: el tiempo (en horas) que el camión permanece fuera de servicio como resultado de la ocurrencia del modo de falla.

Como regla general se ha definido que cualquier modo de falla que cause una parada del equipo tendrá un impacto ambiental leve, por cuanto la función misma del equipo es la de controlar y mitigar el material particulado en suspensión en un

área específica del complejo minero. Se le considera leve ya que la necesidad de riego es suplida en el corto plazo por otro equipo, aunque no con la misma frecuencia pues las distancias a cubrir serán mayores.

Tabla 2. Matriz de criterios para la evaluación y valoración de las consecuencias de los modos de falla.

		CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD				
HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS (USD)	IMPACTO OPERACIONAL (Hrs)	VALORACION		EVENTUAL (A)	OCASIONAL (B)	MODERADO (C)	REGULAR (D)	FRECUENTE (E)
Puede ocasionar la muerte al operador u otras personas	Afectación ambiental severa e irreversible, con posibilidad de sanciones por la autoridad	> \$20000	> 48h	Catastrófico	5	A5	B5	C5	D5	E5
Puede ocasionar lesiones permanentes al operador u otras personas	Tiene efectos moderados y locales reversibles a mediano o largo plazo	\$10000 - \$20000	24h - 48h	Grave	4	A4	B4	C4	D4	E4
Puede ocasionar incapacidad temporal al operador u otras personas	Tiene efectos moderados y locales, reversibles a corto plazo	\$5000 - \$10000	8h - 24h	Moderado	3	A3	B3	C3	D3	E3
Puede ocasionar lesiones menores al operador u otras personas	Puede tener efectos leves y temporales sobre el medio ambiente	\$1000 - \$5000	2h - 8h	Leve	2	A2	B2	C2	D2	E2
No compromete la seguridad del operador ni de otras personas	No tiene ninguna incidencia sobre el medio ambiente	< \$1000	< 2 hora	Ninguno	1	A1	B1	C1	D1	E1
						≥ a 3 años	< 3 Años	< 1 Años	< 6 Meses	± 1 Mes

OPCIONAL	IMPORTANTE	CRÍTICO
----------	------------	---------

Fuente: El autor

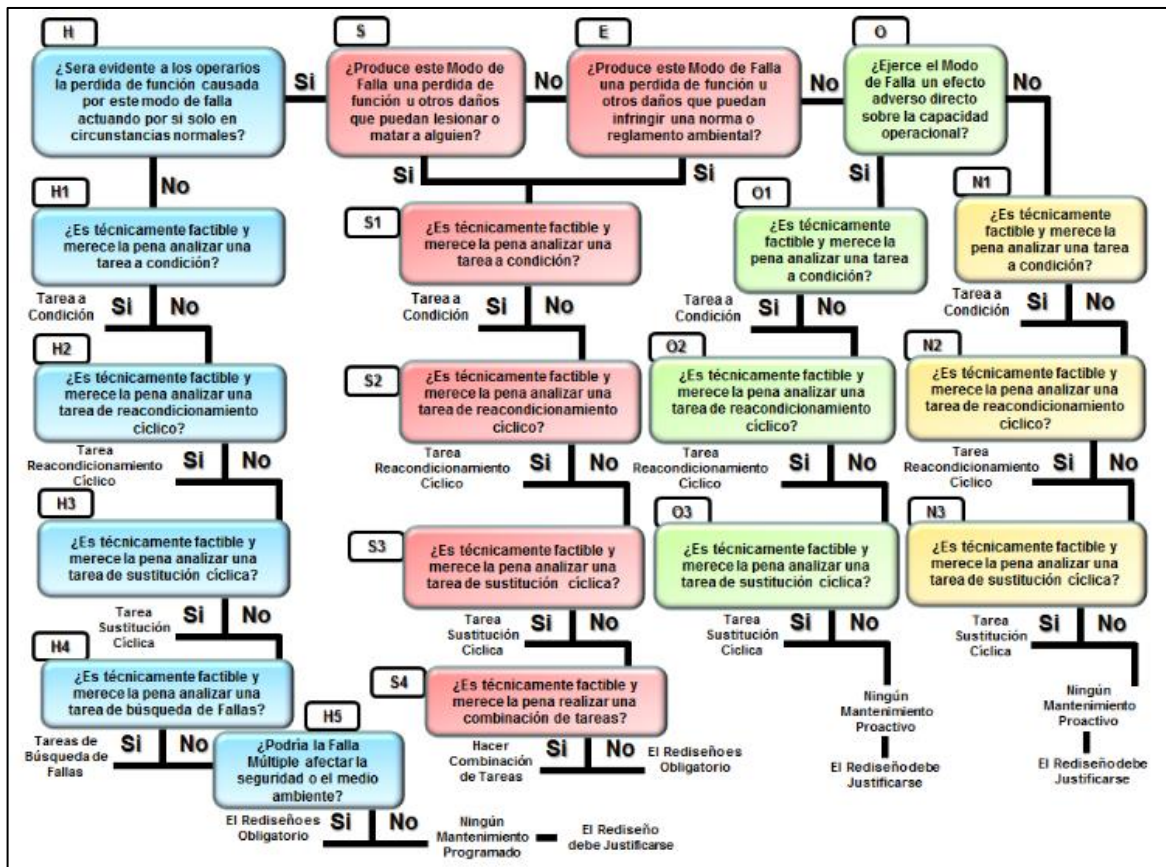
En líneas generales pudo establecerse que ninguno de los modos de falla identificados representa un riesgo para la seguridad del operador u otras personas y sólo unos pocos alcanzan un nivel de riesgo moderado sobre el medio ambiente. Los mayores niveles de criticidad tienen que ver con modos de falla que implican altos costos y/o tiempos prolongados para restablecer la operación del equipo.

El análisis funcional de los componentes del sistema de riego, el desarrollo del AMFE y la valoración de las consecuencias se muestran en el anexo A.

6.6 SELECCIÓN DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO

Una vez evaluadas las consecuencias para cada uno de los modos de falla, el paso siguiente consistió en determinar la tarea apropiada de mantenimiento (preguntas 7 y 8 de la metodología) que permita reducir el nivel de riesgo en especial para aquellos modos de falla valorados como críticos. Para tal efecto se ha empleado el Diagrama Lógico de Decisión propuesto por John Mubray (figura 16) y teniendo en cuenta si la pérdida de la función asociada a cada modo es oculta o evidente, según lo consignado en la columna “Falla Oculta” de la tabla 2.

Figura 19. Diagrama lógico de decisión RCM



Fuente: RCM II: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (J. Mubray)

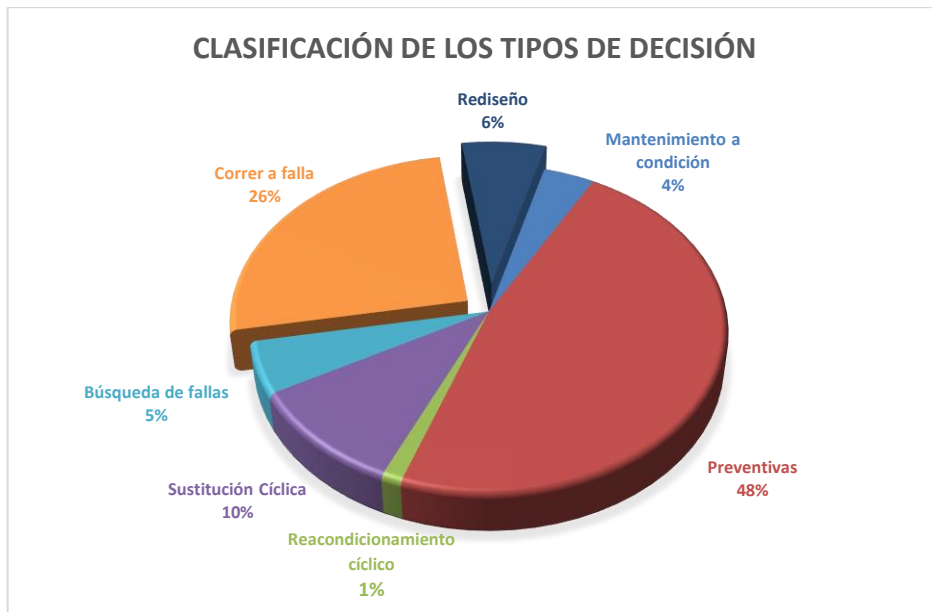
La selección de las tareas de mantenimiento se registra en el anexo B, con sus respectivas frecuencias y recursos.

En el proceso, para algunos de los modos de falla no fue posible identificar una tarea técnicamente factible por lo cual se ha seleccionado el rediseño como la opción más viable para la disminución de los riesgos. En otros casos por el costo elevado o el tiempo de ejecución no justificaba llevar a cabo ninguna tarea proactiva resultando en un costo mayor que el costo de reemplazo por lo cual se optó por no realizar ningún mantenimiento.

A primera vista podría parecer atípico que luego de aplicar el árbol de decisión sólo se haya definido una tarea de reacondicionamiento cíclico. Sin embargo, esto obedece a la estrategia del departamento de la compañía acerca de no realizar reparaciones de componentes en sitio. Por ejemplo, podría haberse optado por el reacondicionamiento cíclico de los rodamientos de la bomba de riego para tratar el modo de falla desgaste por vida útil o reemplazar periódicamente el diafragma de los aspersores para tratar con el modo de falla rotura por fatiga, sin embargo, para la Gerencia de Mantenimiento este tipo de labores incrementan excesivamente los tiempos de reparación por lo cual no resultan técnicamente factibles en el contexto de Drummond y se prefiere el reemplazo total del componente. El mismo razonamiento aplica para componentes como aspersores, bomba hidráulica y válvula de control.

Por otra parte, los resultados de aplicar la metodología plantean una serie de actividades diferentes a las que hasta ahora se han llevado a cabo para la flota de tanqueros. En la figura 20 se presenta el resumen de los tipos de decisión para el tratamiento de los modos de falla identificados y que se tomará como base para realizar un comparativo del costo – beneficio del modelo.

Figura 20. Resultados de la aplicación del Árbol Lógico de Decisión – Clasificación según tipo de decisión.



Fuente: El autor

6.7 ANÁLISIS DEL MODELO RESULTANTE

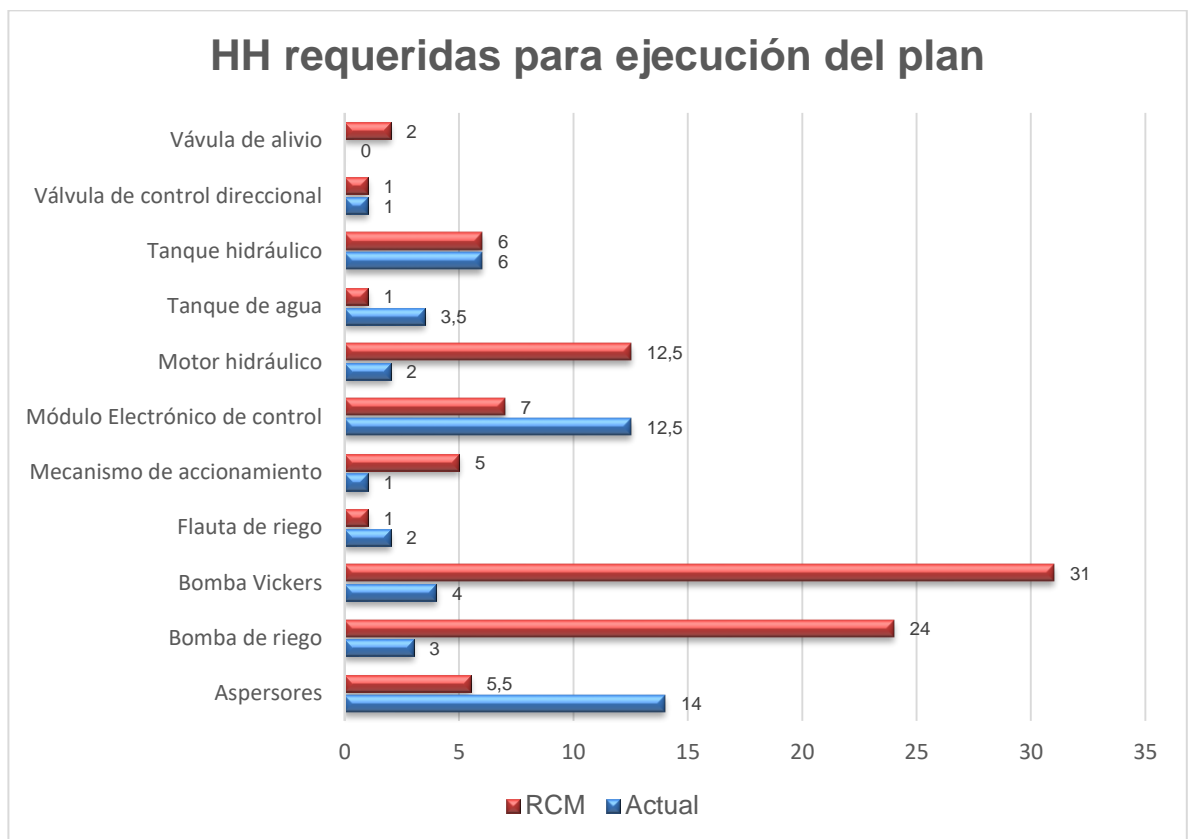
Con el fin de realizar un comparativo entre el plan de mantenimiento actual y el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, se tomará como base el requerimiento de mano de obra en términos de horas hombre. Las tareas específicas para el sistema de riego del plan actual se listan en el anexo C.

Para consolidar el plan RCM del sistema de riego, se han agrupado las tareas propuestas teniendo en cuenta la frecuencia y el componente asociado a la tarea. Se excluyen las tareas de rediseño (pues se ejecutan una sola vez) y las de correr a falla (que implican no tomar ninguna acción). Por otro lado, con el fin de facilitar su implementación, se ha incluido la columna “tipo de PM”, la cual sugiere la mejor ventana de oportunidad para la ejecución de la labor. De esta forma la programación se ajusta a la clasificación que maneja el Departamento de Mantenimiento de Equipo Móvil de Drummond, según la cual los mantenimientos tipo “X” son de corta

duración, con rutinas de inspección básicas, “B” y “F” son de duración intermedia y “D” y “H” son mantenimientos largos donde las actividades a realizar son más complejas y de mayor duración. El plan consolidado se muestra en el Anexo D.

Con base en la información de los anexos C y D se ha construido el gráfico comparativo mostrado en la figura 21.

Figura 21. Distribución de HH por componente - Plan actual vs plan RCM

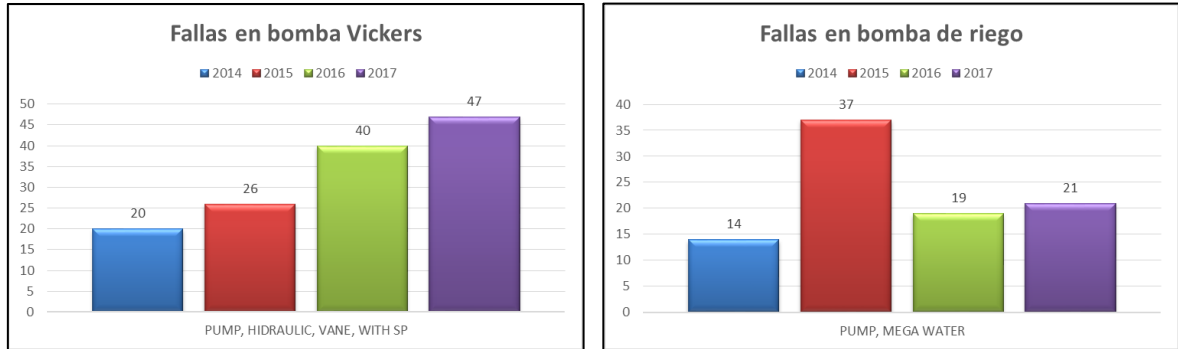


Fuente: El autor

Del gráfico anterior se puede notar que, para componentes con modos de falla con alto nivel de criticidad, como la bomba Vickers o la bomba de riego, el plan actual destina una cantidad de horas hombre relativamente baja, principalmente para tareas de tipo preventivo. La ausencia de tareas de mantenimiento para el manejo de modos de falla críticos identificados en el AMFE se refleja en los índices de falla

para estos componentes, los cuales muestran una tendencia creciente desde el año anterior según se observa en los gráficos de la figura 22.

Figura 22. Fallas en bomba Vickers y bomba de riego (período 2014 – 2017)



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

El plan RCM supone en principio un incremento del 100% en la carga de trabajo, fundamentalmente por la inclusión de tareas de sustitución cíclica para la bomba Vickers y la bomba de riego. No obstante, en la práctica el incremento ocurre de manera puntual para la frecuencia asignada (4000 horas) y resulta menor si se tiene en cuenta que con la ejecución de la tarea de sustitución se suprimen horas hombre de otras categorías como mantenimiento preventivo. Adicionalmente, las tareas de sustitución cíclica según se determinó por el árbol de decisión, permitirían tratar modos de falla cuyas consecuencias resultarían mucho más costosas que el incremento en las horas hombres del mantenimiento. Este análisis se realiza para la bomba Vickers y se describe en la tabla 3.

Tabla 3. Costo de sustitución cíclica vs correr a falla - Bomba Vickers

Estrategia	HH	Costo HH (USD)	Costo Repuestos (USD)	Costo efectos (USD)	Costo Total (USD)
Sustitución Cíclica	24	\$600	\$3.270	0	\$3.870
Reparación no programada	36 - 48	\$900 - \$1.200	\$3.270	\$1.000 - \$2.000	\$5.170 - \$6.470

Fuente: El autor

En la tabla anterior, el mayor tiempo requerido para la reparación no programada obedece a que la falla imprevista tiene asociados unos tiempos de diagnóstico, tiempos de traslado del equipo al taller y tiempos para corregir daños colaterales causados por la falla. Luego se justifica el incremento en las HH del plan pues el costo de sustitución cíclica es entre 25% - 40% menor al costo de no realizarla. El mismo análisis se aplica para la sustitución cíclica de la bomba de riego (tabla 4).

Tabla 4. Costo de sustitución cíclica vs correr a falla - Bomba de riego

Estrategia	HH	Costo HH (USD)	Costo Repuestos (USD)	Costo efectos (USD)	Costo Total (USD)
Sustitución Cíclica	16	\$400	\$6.045	0	\$6.445
Reparación no programada	24-30	\$600 - \$750	\$6.045	\$1.850	\$8.495 - \$8.645

Fuente: El autor

El modelo RCM también incluye 2 tareas de mantenimiento a condición que no están contempladas en la actualidad como son la medición de la eficiencia de la bomba Vickers y la inspección termográfica a los rodamientos de la bomba de riego. El incremento en las horas hombre por la inclusión de estas tareas (estimado en 4 HH, cada 1000 horas) no es significativo si se le compara con el beneficio de poder monitorear el desempeño de la bomba y detectar oportunamente cualquier disminución del rendimiento. Considerando que la cavitación es el modo de falla predominante de la bomba Vickers y que ésta ocasiona una pérdida de rendimiento gradual, el monitoreo se percibe como una forma razonable de anticiparse a la falla imprevista según se analiza en la tabla 5.

Tabla 5. Costo mantenimiento a condición vs correr a falla – Bomba Vickers

Estrategia	HH	Costo HH (USD)	Costo Repuestos (USD)	Costo efectos (USD)	Costo Total (USD)
Mantenimiento a condición	4	\$400	0*	0	\$400
Reparación no programada	36 - 48	\$900 - \$1.200	\$3.270	\$1.000 - \$2.000	\$5.170 - \$6.470

Fuente: El autor

En cuanto a los rediseños que plantea el modelo RCM para los modos de falla con alto nivel de consecuencias, el equipo de trabajo propuso la modificación de la rejilla de protección primaria del tanque para que esta cumpla su función sin que surja la necesidad de retirarla durante el llenado. Garantizando que la rejilla esté siempre instalada para cumplir su función se podrá reducir el nivel del riesgo asociado a los modos de falla por ingreso de material extraño al tanque. En particular, el costo de esta modificación se encuentra en el orden de USD \$700 por equipo, lo que representa entre un 7% - 14% del costo total de una falla catastrófica (tabla 6). Luego se concibe como una decisión conveniente.

Tabla 6. Comparativo costo rediseño rejilla primaria vs costo reparación por modo de falla “ingreso de material extraño”.

Concepto	Costo (USD)
Modificación rejilla del tanque (material + mano de obra)	\$800
Reparación del equipo (en caso de ocurrencia del modo de falla)	\$5,000 - \$10,000

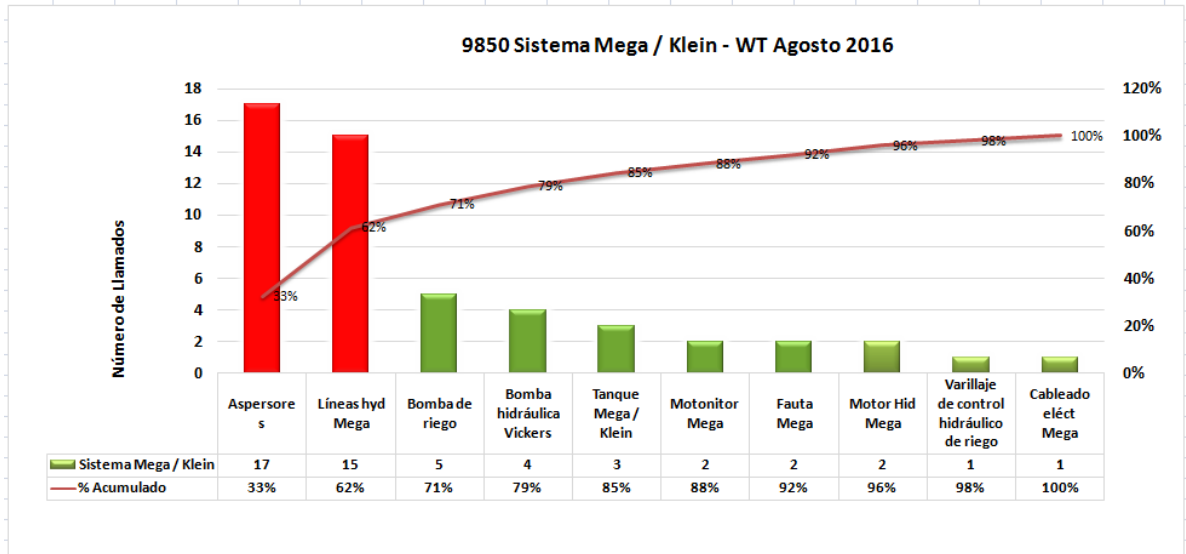
Fuente: El autor

Por su parte, el análisis para los aspersores muestra que el modo de falla predominante obedece a desgaste del housing por abrasión (modo de falla 5C2.1, Anexo A). Si bien este modo de falla no supone tiempos largos de reparación o costos elevados, tiene un alto impacto en la confiabilidad de la flota por su índice de fallas, según se observa en la figura 23.

Plantear una tarea de sustitución cíclica de los aspersores supondría cambiar el juego de 3 aspersores unas 2 o 3 veces al año por equipo. Teniendo en cuenta que la flota la conforman 30 equipos no es la solución más económica. Por esta razón y revisando las opciones en el mercado el equipo propuso el cambio del material del housing del aspersor, pasando de aluminio a acero inoxidable en un intento por obtener mayor vida útil de este componente. Esta modificación ha sido implementada durante el desarrollo del RCM en 2 equipos piloto y al revisar el

desempeño (figura 24) y los costos sobre una base de 6 meses se percibe como una decisión viable, según se observa en la tabla 7 y 8.

Figura 23. Diagrama de Pareto - fallas del sistema de riego (agosto de 2016)



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

Figura 24. Desempeño del housing del aspersor para un período de trabajo de 6 meses. En aluminio (izquierda) se evidencia desgaste avanzado; en acero inoxidable (derecha) se conserva intacto.



Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

Tabla 7. Costo de instalación y reparación de aspersores convencionales para un equipo en un período de 6 meses.

Aspersor convencional en aluminio				
Elemento	Aspersor	Diafragma	Guía	Resorte
Cantidad	6	3	3	3
Costo unitario (USD)	408,51	23,09	20,44	8,29
Costo Acumulado (USD)	2451,06	69,27	61,32	24,87
Costo total (USD)	2606,52			

Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

Tabla 8. Costo de instalación y reparación de aspersores en acero inoxidable para un equipo piloto en un período de 6 meses.

Aspersor en inoxidable				
Elemento	Aspersor	Diafragma	Guía	Resorte
Cantidad	3	3	0	0
Costo unitario (USD)	408,51	23,09	20,44	8,29
Costo Acumulado (USD)	1225,53	69,27	0	0
Costo total (USD)	1294,8			

Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

En cuanto al rediseño de la línea de succión de la bomba Vickers, su justificación radica en que la configuración actual propicia la aparición de cavitación, afectando el desempeño y generando fallas por desgaste prematuro de los componentes internos. Considerando el incremento en el número de fallas de la bomba hidráulica Vickers durante los últimos 3 años según lo mostrado en la figura 22 la propuesta de rediseño de la línea permitiría prolongar la vida útil de la bomba al eliminar los modos de falla asociados con cavitación.

Finalmente, la elección de correr a falla para algunos de los modos de falla planteados obedece a que técnicamente no fue posible plantear una tarea de mantenimiento con el fin de prevenir su ocurrencia.

7. CONCLUSIONES

- El modelo de mantenimiento desarrollado para el sistema de riego del camión tanquero se ajusta a la filosofía de RCM ya que responde a cada de una de las 7 preguntas planteadas en las normas SAE 1011 y SAE 1012.
- El análisis funcional realizado a los componentes del sistema de riego permitió identificar los parámetros operacionales de cada elemento y cuándo la función que desempeña se aleja del estándar deseado. La información recopilada puede ser utilizada en adelante por el departamento como una herramienta de consulta para fines didácticos y de carácter técnico.
- La aplicación de las herramientas de AMFE permitió consolidar un listado importante de modos de falla para los componentes del sistema de riego. Se logró además la identificación de modos de falla con causas externas al sistema de riego y que merecen un tratamiento adicional por fuera del alcance de este proyecto.
- La evaluación de las consecuencias de cada modo de falla permitió identificar aquellos con alto nivel de criticidad de forma que las acciones a tomar fueran efectivas y enfocadas a la reducción del riesgo. Se pudo establecer que ninguno de los modos de falla representa un riesgo para la seguridad del operador y sólo unos pocos medianamente para el medio ambiente.
- El uso del árbol lógico de decisión como herramienta para la selección de tareas sirvió no sólo para consolidar el plan de mantenimiento sino también para detectar mejoras potenciales en el sistema de riego a través de propuestas de rediseño.

- Las tareas seleccionadas han sido concebidas para el manejo de los modos de falla críticos tendientes a reducir el impacto operacional y lograr una mejora en los índices de confiabilidad y disponibilidad acompañados de una reducción de los costos de mantenimiento.

8. RECOMENDACIONES

- Solicitar al departamento de bombas un programa tendiente a asegurar el buen estado de los filtros de succión en las bombas de las torres de llenado con el fin de reducir la cantidad de material sólido bombeada al tanque de agua.
- Modificar la línea de succión de la bomba hidráulica Vickers, evitando los cambios bruscos de dirección principalmente en la entrada de la bomba, con el fin de reducir las posibilidades de cavitación que produzcan daños catastróficos en la bomba y en otros componentes del sistema.
- Documentar adecuadamente las fallas presentadas por fatiga torsional en el eje de la bomba Vickers y realizar el correspondiente análisis que permita identificar de forma acertada la causa raíz de la rotura del eje.
- Evaluar la posibilidad de implementar un sistema de medición en línea del flujo de la bomba Vickers que permita llevar a cabo un monitoreo de la entrega de la bomba y determinar fácilmente su eficiencia.
- Ensayar el uso de rodamientos sellados en la bomba de riego y evaluar su vida útil con miras a eliminar los modos de falla relacionados con problemas de lubricación.
- Proveer un sistema de enfriamiento adicional para el aceite hidráulico del circuito de riego, a fin de reducir su temperatura y con ello el deterioro temprano en sellos y mangueras por cristalización.
- Evaluar el modo de falla por contaminación externa para determinar las acciones adecuadas tendientes a reducir las consecuencias sobre el sistema de riego.
- Extender la metodología a los sistemas restantes de la máquina para desarrollar un plan de mantenimiento completo basado en RCM para todo el camión tanquero.

BIBLIOGRAFÍA

CATERPILLAR. 777D update (AGC) Off Highway Trucks. Service Training Meeting Guide 721. 2000

DRUMMOND LTD. Compromiso ambiental: la calidad del aire. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.drummondLtd.com/compromiso-ambiental/calidad-del-aire/>

DRUMMOND LTD. Política Drummond Ltd – Colombia. Bogotá. 2013

EATON Vickers. Vane Pump & Motor Design Guide for Mobile Equipment. 2011

MEGA CORP. Maintenance Manual MTT20 - CAT777F (2). Albuquerque. 2010

MEGA CORP. Operators Manual MTT20 - CAT777F (2). Albuquerque. 2010

MOUBRAY, JOHN. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centred Maintenance). Edición en español: Aladon LLC. Asheville, NC. 1991.

ORTIZ PLATA, DANIEL. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC. Guía práctica. 2016.

Reliabilityweb: A Culture of Reliability. El camino hacia el RCM. Fort Myers, EE.UU. Recuperado de <https://www.reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-camino-hacia-el-rcm>

Reliabilityweb: A Culture of Reliability. Mitos para la implementación de RCM. Fort Myers, EE.UU. Recuperado de <https://www.reliabilityweb.com/sp/articles/entry/mitos-para-laimplementacion-de-rcm>

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes. 1999.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE JA1012. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. 2002.

ANEXOS

Anexo A. Análisis modal de fallos y efectos para el sistema de riego

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – TANQUE DE AGUA											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
1	Contener y transportar el agua herméticamente sin fugar	1A	Incapaz de contener el agua herméticamente	1A1	Fuga de agua por tanque agrietado	1A1.1	Grietas por concentradores de esfuerzos			Elementos del tanque como los soportes de los guardabarros se convierten en concentradores de esfuerzo. El peso ejercido por el barro que se acumula durante la operación debilita la soldadura del soporte y eventualmente ocasiona grietas que permiten la fuga de agua. No genera paro inmediato ya que el goteo es pequeño en comparación con el volumen del tanque por lo que la reparación se programa para el siguiente mantenimiento	No	B1	B1	B2	B3
						1A1.2	Grietas por desprendimiento de los baffles internos	1A1.2.1	Fatiga de la soldadura de los baffles por efecto del oleaje	El oleaje en el interior del tanque impacta los baffles desprendiendo la soldadura. El goteo es visible, no genera paro inmediato ya que el goteo es pequeño en comparación con el volumen del tanque. Las grietas se reparan en un próximo mantenimiento, pero la reparación de los baffles internos implica cambio del tanque. Tiempo down por cambio de tanque: >48 horas	No	B1	B1	B5	B5
						1A1.3	Grietas por amortiguación deficiente de las suspensiones (rígidas)			La amortiguación deficiente propicia la aparición de grietas por impactos en las zonas de concentración de esfuerzos, ocasionando goteos visibles. El equipo queda fuera de servicio sólo en caso que el operador reporte la rigidez por disconfort en cuyo caso se realizará calibración de las suspensiones. La reparación de las grietas puede aplazarse para el siguiente mantenimiento. Las consecuencias se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se plantean tareas de mantenimiento debido a que no hacen parte del objeto de estudio	No	B1	B1	B1	B2
				1A2	Fuga por tapa del registro de succión de la bomba de riego	1A2.1	Empaque del registro mal instalado			Fuga de agua a través del manhole. No genera parada, pero aumenta la frecuencia de reabastecimiento. Requiere cambiar el empaque. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	A1	A1	A1	A1
2	Restringir la entrada de impurezas presentes en el agua mayores a 7 cm de diámetro promedio durante el llenado e impedir que elementos de tamaño de hasta 2 cm de diámetro promedio pasen a la bomba y/o aspersores	2A	Permite el ingreso de impurezas de gran tamaño (mayores a 7 cm de diámetro)	2A1	Bomba de la torre de llenado carece de filtro de succión					Bombeo de piedras y otros elementos hacia el tanque, con potencial de daño sobre la bomba de riego y los aspersores. Se debe asegurar la instalación y mantenimiento de los filtros por parte del Departamento a cargo de las bombas de llenado. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se definirán tareas de mantenimiento debido a que no hace parte del equipo	Sí	E1	E2	E3	E3
				2A2	Falta rejilla de protección primaria en el embudo del tanque	2A2.1	Operador remueve la rejilla por salpicar agua en exceso durante el llenado	2A2.1.2	Geometría inadecuada de la rejilla	Ingreso de impurezas presentes en el agua. Los elementos son arrastrados a la succión de la bomba de riego, ocasionando daños en partes internas, obstrucción de tuberías y/o daños en aspersores. Equipo fuera de servicio. Tiempo down 12-24 horas. Requiere cambio de bomba y aspersores	No	E1	E2	E3	E3
		2B	Permite el paso de elementos de tamaño mayor a 2 cm de diámetro promedio hacia la bomba y aspersores	2B1	Falta rejilla de protección secundaria en el registro de succión de la bomba	2B1.1	Rejilla de protección no instalada previamente, removida o desprendida			Ídem modo de falla 2A2.1.2	Sí	E1	E2	E3	E3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – BOMBA DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
3	Bombear agua hacia los aspersores a una presión mínima de 55 psi y caudal de 200 gpm permitiendo una fuga moderada por el prensaestopas (20-30 gotas por minuto) para lubricación y refrigeración de la empaquetadura	3A	Incapaz de bombear agua hacia los aspersores	3A1	Falla en el suministro de agua	3A1.1	Tanque seco sin previo aviso por falla del switch de nivel			No hay alerta al operador sobre el bajo nivel de agua. Si el operador no advierte la condición podría ocasionar daños en la empaquetadura de la bomba o el eje por operar en seco. Se debe parar el equipo para corregir la condición. Tiempo down: 2-3 horas	Sí	B1	B1	B1	B1
						3A1.2	Rejilla de protección taponada con impurezas			La bomba no succiona agua y no hay bombeo a través de los aspersores. Puede ocasionar daños en la empaquetadura o el eje de la bomba por operar en seco. Equipo fuera de servicio. Requiere destapar el registro y limpiar. Tiempo down: 2-3 horas	No	A1	A2	A2	A2
				3A2	Falla en el accionamiento de la bomba	3A2.1	Estrías del acople y/o del eje desgastadas por fatiga			El motor hidráulico gira, pero no transmite torque a la bomba por lo cual no hay riego por los aspersores. Equipo fuera de servicio. Según sea el daño requiere cambiar el acople, el motor hidráulico y/o la bomba de riego. Tiempo down: 12-24 horas	No	C1	C2	C3	C3
						3A2.2	Motor hidráulico no gira			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el motor hidráulico					
				3A3	Falla interna en la bomba de riego	3A3.1	Bomba atascada por elemento extraño	3A3.1.1	Rejillas de protección ausentes	Atascamiento de la bomba, el impulsor y otros elementos como anillos, carcasa y eje resultan con daños. No hay riego a través de los aspersores. Equipo queda fuera de servicio. Se debe desocupar el tanque de agua para reemplazar la bomba e inspeccionar la tubería y aspersores. Tiempo down: 12-24 horas	Sí	E1	E2	E3	E3
						3A3.2	Impulsor suelto por torque deficiente de la tuerca de ajuste			Atascamiento y ruido anormal en la bomba, no hay descarga a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Requiere remover la bomba para reinstalar el impulsor. Si el impulsor ha sufrido daños debe reemplazarse. Tiempo down: 12-24 horas	No	B1	B2	B2	B3
						3A3.3	Fractura del eje de la bomba por fatiga			Ruido anormal en la bomba y no se observa flujo de descarga a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio para realizar el cambio de bomba. Tiempo down: 12-24 horas	No	C1	C2	C3	C3
						3A3.4	Rodamientos frenados	3A3.4.1	Lubricación deficiente por falla en la unidad automática	Rodamientos frenados por ausencia de grasa lubricante lo cual genera fricción, desgaste y desalineación. La presión hidráulica aumenta por el mayor esfuerzo del motor hidráulico para mover la bomba de riego y hay elevación de la temperatura del aceite. La desalineación del eje de la bomba puede generar daño del sello retenedor del motor h/co. Salida con poca presión o nula a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la bomba (y el motor h/co si resulta afectado). Tiempo down: 12-24 horas.	Sí	C1	C2	C3	C3
								3A3.4.2	Lubricación excesiva por ajuste incorrecto en la unidad automática	Rodamientos frenados por la fricción que produce el exceso de grasa lubricante lo cual genera desgaste y desalineación en el eje. Incremento en la presión hidráulica por el mayor esfuerzo del motor hidráulico para mover la bomba de riego y hay elevación de la temperatura del aceite. La desalineación del eje de la bomba puede generar daño del sello retenedor del motor h/co. Salida con poca presión o nula a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la bomba (y el motor h/co si resulta afectado). Tiempo down: 12-24 horas.	Sí	C1	C2	C3	C3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – BOMBA DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
								3A3.4.3	Rodamiento frenado por vida útil	Desgaste en las pistas de rodadura por efecto de las cargas en el tiempo y la contaminación con las mismas partículas de la zona ocasionan que el rodamiento se frene. Incremento en la presión hidráulica por el mayor esfuerzo del motor hidráulico para mover la bomba de riego y hay elevación de la temperatura del aceite. La desalineación del eje de la bomba puede generar daño del sello retenedor del motor h/co. Salida con poca presión o nula a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la bomba (y el motor h/co si resulta afectado). Tiempo down: 12-24 horas.	No	B1	B2	B3	B3
				3A4	Falla en los elementos de control	3A4.1	Falla en la válvula de control direccional			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de control direccional					
						3A4.2	Falla en el mecanismo de accionamiento de la válvula direccional			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el mecanismo de accionamiento					
						3A4.3	Falla en módulo control de riego			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo electrónico de control de riego					
						3A4.4	Baja presión de bomba hidráulica			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba hidráulica Vickers					
		3B	Baja presión de riego, inferior a 55 psi	3B1	Impulsor desgastado por erosión					El agua sale con poca presión o no es capaz de abrir los aspersores y por tanto no cumple con el patrón de spray deseado. Equipo queda fuera de servicio. Se debe cambiar la bomba de riego (no se realizan cambios de impulsor en sitio). Tiempo down: 12-24 horas	No	B1	B2	B3	B3
				3B2	Velocidad de giro por debajo del rango	3B2.1	Baja presión de la bomba hidráulica			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba hidráulica Vickers					
		3C	Bajo caudal de descarga, inferior a 200 gpm	3C1	Tubería / registro de succión obstruidos por sedimentos / lodos					Se evidencia un patrón de riego inadecuado, con poco flujo y poca presión. El equipo queda fuera de servicio, se debe desocupar el agua del tanque, remover los aspersores y desacoplar la flauta de riego para efectuar limpieza. Tiempo down: 6-8 horas	No	A1	A2	A1	A2
				3C2	Velocidad de giro por debajo del rango	3C2.1	Baja presión de bomba hidráulica			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba hidráulica Vickers					
				3C3	Falla interna en la bomba	3C3.1	Impulsor desgastado por erosión			Impulsor con álabes picados y desgaste producto del contacto con los sedimentos que arrastra el agua. Se evidencia un patrón de riego inadecuado, con poco flujo y poca presión. Equipo queda fuera de servicio y debido a que no se realizan reparaciones en sitio se cambia la bomba completa. Tiempo down: 12-24 horas	No	B1	B2	B3	B3
						3C3.2	Recirculación interna del agua por anillos de la carcasa con desgaste excesivo			La bomba presenta fuga interna por recirculación del agua debido al desgaste del anillo de bronce por el contacto con sedimentos del agua. Se evidencia un patrón de riego inadecuado, con poco flujo y poca presión. El equipo queda fuera de servicio y debido a que no se realizan reparaciones en sitio se cambia la bomba completa. Tiempo down: 12-24 horas	No	B1	B2	B3	B3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – BOMBA DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
		3D	Fuga excesiva de agua a través del prensaestopas (mayor a 30 gotas por minuto)	3D1	Falta de ajuste en el prensaestopas					Los tornillos del prensaestopas no se encuentran debidamente ajustados permitiendo fuga excesiva de agua. Debido a la fuga disminuye el flujo a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para recomodar / cambiar el cordón trenzado y realizar el ajuste correspondiente. Tiempo down: 1-2 horas	No	D1	D1	D1	D1
				3D2	Tornillos del prensaestopas / prensaestopas partidos					Pérdida de ajuste del prensaestopas debido a la rotura del tornillo. Se evidencia goteo excesivo aun con la bomba apagada y fuga a chorro cuando se acciona, disminuyendo el flujo a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para cambiar el prensaestopas. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B1	B1	B1
				3D3	Empaquetadura instalada incorrectamente					Se evidencia goteo excesivo aun con la bomba apagada y fuga a chorro cuando se acciona. Debido a la fuga disminuye el flujo a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para recomodar / cambiar el cordón trenzado y realizar el ajuste correspondiente. Tiempo down: 1-2 horas	No	C1	C1	C1	C1
				3D4	Empaquetadura desgastada por vida útil					El cordón se cristaliza y no permite ajustes adicionales. Se evidencia goteo excesivo aun con la bomba apagada y fuga a chorro cuando se acciona. Debido a la fuga el nivel de agua en el tanque desciende más rápido de lo normal y disminuye el flujo a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para cambiar el cordón trenzado. Tiempo down: 2-3 horas	No	D1	D1	D1	D2
				3D5	Camisa (buje) del eje desgastada por vida útil					Se evidencia goteo excesivo aun con la bomba apagada y fuga a chorro cuando se acciona. Debido a la fuga el nivel de agua en el tanque desciende más rápido de lo normal y disminuye el flujo a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para cambiar la bomba completa (debido a que no se reparan las bombas in situ). Tiempo down: 12-24 horas	No	C1	C2	C3	C3
		3E	No permite goteo a través del prensaestopas	3E1	Prensaestopas ajustado excesivamente					No hay goteo visible a través del prensaestopas. Debido a la ausencia de goteo no hay refrigeración de la empaquetadura, acelerando el desgaste en la camisa del eje y en la empaquetadura. Se debe parar el equipo para aflojar el prensaestopas y permitir el goteo. Si la condición no se corrige eventualmente el desgaste ocasionará fuga de agua, pero esta no podrá regularse al no permitir más apriete por lo cual deberá cambiarse la bomba. Tiempo down: 12-24 horas	No	B1	B2	B3	B3
		3F	Fuga de agua a través del cuerpo de la bomba	3F1	Empaque de la carcasa mal instalado					Disminución en el flujo de salida a través de los aspersores y afectación del patrón de riego. Equipo fuera de servicio. Se requiere desmontar la bomba y cambiar el empaque. Tiempo down: 12-24 horas. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	A1	A2	A1	A3
				3F2	Carcasa de la bomba agrietada por vibración excesiva	3F2.1	Tornillos de la carcasa / base de la bomba sueltos			Se observa fuga de agua a través de la carcasa. Debido a la fuga el nivel de agua en el tanque desciende más rápido de lo normal y hay una disminución en el flujo que sale a través de los aspersores. Requiere parar el equipo para desmontar y cambiar la bomba. Tiempo down: 12-24 horas	No	A1	A2	A1	A3
4	Sostener rigidamente al motor de riego	4A	No sostiene rigidamente al motor de riego	4A1	Tornillos de sujeción del motor sueltos por vibración / roscas en mal estado					Al soltarse los tornillos, se pierde el acoplamiento del motor y no hay transmisión torque a la bomba, de tal manera que no hay riego y el equipo queda fuera de servicio. Debido a las vibraciones las roscas del mounting resultan dañadas por lo que deberán rectificarse o en el peor de los casos cambiar la bomba. Igualmente, el acople y las estrías de los ejes pueden resultar con desgaste y requerir cambio. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B3	B3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – ASPERSORES											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
5	Para el interruptor del aspersor en posición ON: permitir la salida de agua en patrón de spray con el ángulo de riego deseado al activarse la bomba de riego e interrumpir la salida de agua al desactivarse la bomba	5A	Aspersor no abre al activarse la bomba	5A1	Baja presión de la bomba de riego (ver AMFE bomba riego)					Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba de riego					
				5A2	Diafragma presurizado por obstrucción de la válvula de descarga	5A2.1	Acumulación de impurezas por mala orientación del orificio de descarga			La orientación de la válvula con la descarga hacia arriba facilita la entrada de partículas, obstruyéndola. El lado de aire del aspersor queda presurizado debido a que no puede liberar la presión de aire, por lo tanto, el aspersor permanece cerrado y no hay paso de agua. Equipo fuera de servicio. Se debe realizar la limpieza o cambio de la válvula de descarga rápida. Tiempo down: 1-2 horas	No	B1	B1	B1	B1
				5A3	Electroválvula del aspersor con pase de aire por asientos / sellos en mal estado					El aspersor queda presurizado debido a que hay paso permanente de aire a través de la electroválvula, por tanto, permanece cerrado y no permite salida de agua. El equipo queda fuera de servicio y debe realizarse el cambio de la electroválvula neumática. Tiempo down: 1-2 horas	No	A1	A1	A1	A1
		5B	La salida de agua no es en patrón de spray	5B1	Baja presión de bomba de riego					Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba de riego					
		5C	Aspersor permanece abierto al desactivarse la bomba	5C1	Aspersor atascado con material extraño	5C1.1	Alojamiento de material por orientación inadecuada el aspersor			La orientación del aspersor facilita que se alojen elementos extraños entre el diafragma y el housing. El aspersor queda fugando aun al apagarse la bomba debido a que la presencia de material le impide asentar correctamente, por lo cual el nivel de agua disminuye rápidamente. El camión queda fuera de servicio, se debe remover el aspersor para limpieza o para cambio si ha sufrido daño. Tiempo down: 2-4 horas	No	C1	C2	C1	C2
				5C2	Pérdida de sellado entre el disco guía y el housing del aspersor	5C2.1	Housing del aspersor desgastado por abrasión	5C2.1.1	Material del housing poco resistente a la abrasión de las partículas	El housing de aluminio resulta poco resistente a la abrasión causada por las partículas (arena, lodo, piedras) presentes en el agua. El desgaste generado no permite que el sello correcto entre el housing y el disco guía por lo cual el aspersor queda fugando permanentemente. El camión queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de aspersor. Tiempo down: 2-4 horas	No	E1	E2	E2	E2
				5C3	Pérdida de elasticidad en el resorte por vida útil					Debido a la pérdida de elasticidad el resorte no ejerce la fuerza suficiente para contrarrestar la presión de la columna de agua por lo cual hay fuga. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar el aspersor. Tiempo down: 2-4 horas	No	E1	E2	E2	E2
		5D	El ángulo de salida del agua no es el requerido	5D1	Anillo de ajuste suelto por torque bajo de la tuerca					El spray de agua sale en la dirección incorrecta. La parada del equipo es momentánea mientras se realiza el ajuste del anillo. Tiempo down: 1 hora	No	A1	A1	A1	A1
6	Para el interruptor del aspersor en posición OFF: Impedir la salida de agua a través del aspersor independientemente del estado de la bomba de riego (activada o desactivada)	6A	Incapaz de retener la salida de agua cuando se activa la bomba	6A1	Falla en el suministro de aire	6A1.1	Línea de suministro aire rota por cristalización			El aspersor no recibe aire y por tanto no hay presión para ayudar al resorte a contrarrestar la presión del agua cuando se activa la bomba, por lo cual abre permitiendo la salida de agua. Hay desperdicio de agua y el patrón de riego no es el deseado, por lo que el tanque se desocupará más rápido y será necesario reabastecer con mayor frecuencia. El equipo se saca de servicio y se debe realizar el cambio de la manguera fallada. Tiempo down: 1-2 horas	No	B1	B1	B1	B1
						6A1.2	Fuga de aire por conectores de línea de suministro			Ídem modo de falla 6A1.1	No	B1	B1	B1	B1
						6A1.3	Fuga de aire por la válvula de descarga rápida			La válvula de descarga rápida no es capaz de retener el aire procedente de la electroválvula. Como consecuencia la presión de aire en el lado diafragma del aspersor es insuficiente para contrarrestar la presión de agua de la bomba permitiendo la salida de agua a través del aspersor. El patrón de riego no es el deseado y hay desperdicio de agua por lo que el equipo se saca de servicio. Requiere el cambio de la válvula de descarga rápida. Tiempo down: 1-2 horas	No	B1	B1	B1	B1

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – ASPERSORES											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
						6A1.4	Falla en el sistema neumático del camión			El sistema neumático no provee la presión de aire suficiente en el aspersor para contrarrestar la presión de la bomba de agua, permitiendo por ende la salida de agua a través del aspersor. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se definirán tareas de mantenimiento debido a que no hace parte del alcance del proyecto	No	B1	B2	B1	B3
				6A2	Daño interno en el aspersor	6A2.1	Diafragma roto por material extraño			Material extraño se aloja entre el housing y el diafragma ocasionando su rotura. Al romperse, el aspersor es incapaz de mantener la presión de aire. Cuando esto ocurre la presión de la bomba de riego supera la fuerza del resorte abriendo el aspersor y permitiendo la salida (no deseada) de agua. El patrón de riego no es el deseado. El equipo se saca de servicio y se debe reemplazar / reparar el aspersor. Tiempo down: 2-4 horas	No	C1	C1	C1	C2
						6A2.2	Diafragma roto por vida útil			Aspersor incapaz de mantener la presión de aire. La presión de la bomba de riego supera la fuerza del resorte abriendo el aspersor y permitiendo la salida (no deseada) de agua. El patrón de riego no es el deseado. El equipo se saca de servicio y se debe reemplazar / reparar el aspersor. Tiempo down: 2-4 horas	No	C1	C1	C1	C2
				6A3	Falla en los elementos de control	6A3.1	Falla en módulo control riego			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control de riego					

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – FLAUTA DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
7	Conducir todo el caudal de la bomba sin restricciones hacia los aspersores, sin fugas	7A	Incapaz de conducir la totalidad del caudal de la bomba	7A1	Flauta obstruida con sedimentos / lodos					Aguas lodosas y con sedimentos ocasionan obstrucción de tuberías y/o aspersores. El flujo y la presión a través de los aspersores disminuyen afectando el patrón de riego, El equipo se saca de servicio, se debe drenar el agua del tanque y remover la flauta para limpieza. Tiempo down: 4-6 horas	No	A1	A2	A1	A2
		7B	Tubería presenta fuga	7B1	Tubería rota por corrosión / erosión					Corrosión en la tubería y erosión por los sedimentos que transporta el agua producen grietas que ocasionan fugas aun cuando la bomba no esté activada. En general las fugas pequeñas no generan paro del equipo y se puede aplicar el correctivo en el siguiente mantenimiento. Sólo en caso de una fuga considerable el equipo se saca de servicio para corregir la fuga que usualmente implica soldar la parte afectada	No	B1	B1	B2	B2
				7B2	Tubería rota por vibración excesiva	7B2.1	Soportes de la tubería sueltos / partidos			Vibraciones excesivas pueden agrietar la tubería de la flauta ocasionando fugas de agua. En general las fugas pequeñas no generan paro del equipo y se puede aplicar el correctivo en el siguiente mantenimiento. Sólo en caso de una fuga considerable el equipo se saca de servicio para corregir la fuga que usualmente implica soldar la parte afectada	No	B1	B1	B2	B2

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – VÁLVULA DE CORTE											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
8	Bloquear el paso de agua hacia los aspersores cuando se cierre manualmente y permitir el paso cuando se realice la apertura, según se requiera	8A	Permite el paso de agua hacia los aspersores cuando está cerrada	8A1	Válvula no cierra por palanca en mal estado					El cuadrante se desliza e internamente la válvula permanece en posición abierta. Generalmente esta válvula se usa para intervenciones por mantenimiento (como cambiar un aspersor con el tanque lleno) luego este mecanismo de falla en sí no genera paro del equipo pero si podría ocasionar retrasos en la labor a realizar	No	B1	B1	B1	B1
				8A2	Válvula con asientos desgastados por erosión					La válvula permite el paso de agua en posición cerrada debido al desgaste en los asientos producido por los sedimentos arrastrados en el agua. Generalmente esta válvula se cierra para intervenciones por mantenimiento (como cambiar un aspersor con el tanque lleno) luego este mecanismo de falla en sí no genera paro del equipo pero si podría ocasionar retrasos en la labor a realizar	No	A1	A1	A1	A1
		8B	No permite el paso de agua estando abierta	8B1	Válvula no abre por palanca en mal estado					El cuadrante se desliza, internamente la válvula permanece en posición cerrada. Generalmente esta válvula se usa para intervenciones por mantenimiento luego este mecanismo de falla en sí no genera paro del equipo pero si podría ocasionar retrasos en la labor a realizar	No	B1	B1	B1	B1
		8C	Válvula presenta fuga	8C1	Sello del vástago dañado por sobrepresión	8C1.1	Bomba de riego activada con los aspersores cerrados	8C1.1.1	Error operacional	Al activar la bomba de riego con todos los aspersores en función de cierre se genera una sobrepresión en la flauta que puede romper el sello de la válvula y el prensaestopas de la bomba de riego, disminuyendo el flujo por los aspersores y afectando el patrón de riego. El equipo queda fuera de servicio y se debe drenar el agua del tanque para realizar el cambio de válvula. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	A1	A1	A2	A3

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – TANQUE HIDRÁULICO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
9	Contener el aceite hidráulico herméticamente y manteniendo el nivel correcto	9A	Incapaz de contener el aceite herméticamente	9A1	Fuga de aceite por grieta en el tanque	9A1.1	Grieta en soporte del mecanismo de accionamiento por fatiga			En principio un goteo mínimo no afecta la operación del equipo, si no se activa la alarma por bajo nivel de aceite. Si la alarma se activa, el módulo de control desconecta la señal del acelerador y el equipo queda fuera de servicio. Se debe drenar el tanque para reparar la grieta. Impacto ambiental moderado. Tiempo down: 3-6 horas	No	B1	B3	B1	B2
				9A2	Fuga por sello de labio del mecanismo de accionamiento de la válvula de control	9A2.1	Sello desgastado por vida útil			Goteo visible a través del sello de labio del mecanismo. En principio un goteo mínimo no afecta la operación del equipo si no se activa la alarma por bajo nivel de aceite. Si la alarma se activa, el módulo de control desconecta la señal del acelerador y el equipo queda fuera de servicio. Se debe drenar el tanque para cambiar el sello afectado. Impacto ambiental moderado. Tiempo down: 3-6 horas	No	B1	B3	B2	B2
				9A3	Fuga por puertos de conexión de las mangueras	9A3.1	Sellos cristalizados por vida útil			Goteo visible a través del sello de la(s) manguera(s). En principio un goteo mínimo no afecta la operación del equipo si no se activa la alarma por bajo nivel de aceite. Si la alarma se activa, el módulo de control desconecta la señal del acelerador y el equipo queda fuera de servicio. Se debe drenar el tanque para cambiar el sello afectado. Impacto ambiental moderado. Tiempo down: 3-6 horas	No	B1	B3	B2	B2
				9A4	Válvula de drenaje del tanque con fuga					El nivel de aceite hidráulico disminuye hasta activar la alarma por bajo nivel y/o por alta temperatura del aceite, el módulo de control desconecta la señal del acelerador y el equipo queda fuera de servicio. Se requiere cambiar la válvula. Impacto ambiental moderado. Tiempo down: 8-12 horas	No	A1	A3	A2	A2

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – BOMBA HIDRÁULICA VICKERS											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
10	Bompear aceite hidráulico desde el tanque hacia la válvula de control direccional sin fugas. Para la válvula en posición RAISE el rango de presiones es de 700 psi - 1800 psi (entre min y máx rpm del motor). La pérdida de flujo en una prueba de eficiencia no debe ser superior al 10%.	10A	Incapaz de bompear aceite hidráulico	10A1	Falla en suministro de aceite a la bomba	10A1.1	Bajo nivel de aceite hidráulico en el tanque			Cualquier fuga en el sistema que ocasione un descenso en el nivel del aceite hasta el mínimo permisible activará la alarma por bajo nivel en el módulo electrónico de control. Cuando esto ocurre el sistema desconecta la señal del acelerador y el sistema de riego queda inhabilitado. Equipo fuera de servicio, se debe reponer el nivel de aceite y determinar la causa del bajo nivel. Tiempo down: 1-2 horas	No	B1	B3	B2	B2
						10A1.2	Línea / tubo de succión roto por roce			Fuga de aceite y entrada de aire al sistema afectando el bombeo. Se acelera el desgaste de las piezas internas de la bomba por el fenómeno de aireación y recalentamiento. No hay flujo de aceite de enfriamiento hacia los mandos finales ni para accionar el motor h/co de la bomba de riego. El equipo queda fuera de servicio. Tiempo down: 3-6 horas.	No	B1	B3	B2	B3
						10A1.3	Screen de succión obstruido con suciedad	10A1.3.1	Desgaste en componentes del sistema (mandos, convertidor, bombas, válvulas)	Partículas contaminantes saturan el screen de succión restringiendo el flujo de aceite hacia la bomba. La bomba no puede succionar aceite adecuadamente y se presenta cavitación, se genera ruido anormal, desgaste en la bomba, elevación de la temperatura del aceite y activación de alarma por temperatura, inhabilitando el equipo.	Sí	B1	B2	B4	B5
				10A2	Falla en el accionamiento de la bomba	10A2.1	Estrías del eje / acople de la bomba desgastadas por fatiga			No hay transmisión de torque desde el PTO del motor diesel al eje de la bomba, por tanto, no hay flujo de aceite hacia los mandos ni hacia el motor hidráulico. En consecuencia, la bomba de riego no gira y no hay salida de agua por los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se requiere el cambio de la bomba h/ca, el acople y/o PTO. Tiempo down: 24 -36 horas	No	C1	C2	C4	C4
						10A2.2	Falla en PTO del motor			No hay transmisión de torque hacia el eje de la bomba, de tal forma que no hay flujo de aceite ni hacia los mandos finales ni al motor hidráulico. La bomba de riego no gira por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. Equipo fuera de servicio. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se definirán tareas de mantenimiento debido a que no hace parte del alcance del proyecto	No	B1	B2	B3	B3
				10A3	Falla interna en la bomba	10A3.1	Fractura del eje de la bomba por fatiga torsional			No hay transmisión de torque, la bomba no puede generar presión por lo cual se activa la alarma de baja presión en el módulo de control. Las partículas metálicas resultantes contaminan el aceite hidráulico. El motor hidráulico no gira y no se acciona la bomba de riego por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se requiere cambiar la bomba Vickers y realizar un flushing al sistema hidráulico. Tiempo down: 24 - 48 horas	No	B1	B2	B3	B4
		10B	Baja presión de descarga (inferior a 400 psi para mínima rpm o inferior a 1500 psi para máxima rpm del camión) o bajo caudal de entrega (pérdida superior al 10%)	10B1	Desgaste en elementos internos de la bomba por cavitación / aireación en el sistema	10B1.1	Línea de succión demasiado larga, con restricciones y cambios bruscos de dirección en el recorrido			Desgaste progresivo en platos, bujes y sellos con desprendimiento de partículas que contaminan el aceite. Eventualmente se presenta fuga interna en la bomba y la temperatura del aceite aumenta activando la alarma por alta temperatura de aceite. El SOS del aceite indica valores fuera de parámetros. La condición empeora hasta que la bomba no puede generar presión para mover el motor h/co y la bomba de riego. Equipo fuera de servicio. Requiere cambio de la bomba hidráulica y en ciertos casos flushing al sistema hidráulico. Tiempo down: 18-36 horas	Sí	D1	D2	D3	D4

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – BOMBA HIDRÁULICA VICKERS											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
				10B2	Desgaste en elementos internos de la bomba por vida útil					Ídem Modo de falla 10B1.1.1	No	C1	C2	C3	C3
				10B3	Desgaste en las piezas internas por aceite contaminado	10B3.1	Falla en el convertidor / paquete de frenos de los mandos (AMFE fuera del alcance)			El aceite hidráulico es compartido entre el sistema de riego, frenos y convertidor, al ocurrir una falla externa el aceite contaminado es succionado por la bomba Vickers generando desgaste progresivo en las superficies y sellos y en consecuencia fuga interna. La temperatura del aceite aumenta, pudiendo activar la alarma por temperatura. Con el tiempo la condición empeora hasta que la bomba no puede generar la presión suficiente para mover el motor hidráulico y la bomba de riego. Equipo fuera de servicio. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se proponen tareas de mantenimiento	No	C1	C2	C4	C5
				10B4	Líneas de la bomba Vickers al screen rotas por roce con la estructura	10B4.1	Base del screen suelta por tornillos partidos			No hay flujo hacia la válvula de control ni hacia el motor h/co. El sistema pierde presión, el nivel de aceite desciende gradualmente hasta activar la alarma por bajo nivel lo cual ocasiona el paro del equipo. Se debe izar el tanque de agua para realizar el cambio de manguera. Tiempo down: 4-6 horas	No	E1	E3	E2	E2
		10C	Alta presión de descarga (superior a 1800 psi)	10C1	Ajuste incorrecto de presión de alivio del sistema hidráulico	10C1.1	Presión de alivio no reajustada después de cambio de bomba			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de alivio					
		10D	Bomba presenta fuga de aceite	10D1	Sellos internos mal instalados / dañados durante el ensamble					Fuga de aceite por el cuerpo de la bomba, el nivel del tanque hidráulico desciende progresivamente hasta activar la alarma por bajo nivel. El módulo de control desactiva la señal de aceleración e inhabilita el sistema de riego temporalmente hasta que se corrija la condición. Equipo fuera de servicio. Se requiere el cambio / reparación de la bomba. Tiempo down: 8-12 horas. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	C1	C3	C2	C3
				10D2	Sellos internos dañados por sobrepresión del sistema hidráulico	10D2.1	Ajuste incorrecto en la presión de alivio del sistema			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de alivio					
				10D3	Tornillos del cuerpo de la bomba sueltos por pérdida de torque					Se presenta holgura entre las secciones de la bomba permitiendo fuga de aceite debido a la presión de trabajo. El nivel de aceite hidráulico desciende progresivamente hasta activar la alarma por bajo nivel. El módulo de control desactiva la señal de aceleración e inhabilita el sistema de riego temporalmente hasta que se corrija la condición. Equipo fuera de servicio. Se requiere remover la bomba para inspección / retorqueo o cambio. Tiempo down: 8-12 horas	No	B1	B3	C2	C3
				10D4	Carcasa de la bomba agrietada por torque excesivo en los tornillos durante el ensamble					Agrietamiento de la carcasa de la bomba y fuga de aceite debido a la presión de trabajo. El nivel de aceite hidráulico desciende progresivamente hasta activar la alarma por bajo nivel. El módulo de control desactiva la señal de aceleración e inhabilita el sistema de riego temporalmente hasta corregir la condición. Equipo fuera de servicio. Se requiere cambiar la bomba. Tiempo down: 8-12 horas. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	C1	C3	C3	C3

. Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MOTOR HIDRÁULICO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
				10D5	Acople de la bomba con el PTO mal instalado					Fuga de aceite debido a asentamiento incorrecto entre las superficies de la bomba y el PTO. Genera paro del equipo y se debe remover la bomba para cambiar el sello del acople. Tiempo down: 8-12 horas. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	C1	C3	C2	C2
11	Transmitir torque y velocidad de rotación a la bomba de riego sin permitir fugas, con velocidades de giro en el rango de 1000 rpm - 1800 rpm	11A	No transmite torque a la bomba	11A1	Falla en el suministro de aceite	11A1.1	Rotura de la línea de suministro por roce	11A1.1.1	Línea mal enrutada debido a falta de clamps de sujeción	La falta del clamp de sujeción ocasiona el movimiento de la manguera cuando se presuriza el sistema generando roce con la estructura del tanque y desgastando la capa superficial hasta romperse. La fuga ocasiona que el nivel de aceite descienda hasta activar la alarma de bajo nivel, el módulo de control inhabilita el sistema de riego y no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de la manguera. Tiempo down: 2-4 horas	No	D1	D3	D2	D2
						11A1.2	Rotura de la línea por cristalización / vida útil			La manguera fuga ocasionando que el nivel de aceite descienda hasta activar la alarma de bajo nivel, el módulo de control inhabilita el sistema de riego y no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de la manguera. Tiempo down: 2-4 horas	No	C1	C3	C2	C2
						11A1.3	Rotura de sellos de la línea de suministro por cristalización / vida útil			La fuga ocasiona que el nivel de aceite descienda hasta activar la alarma de bajo nivel y desactivar el sistema de riego. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de los sellos. Tiempo down: 2-3 horas	No	D1	D3	D2	D2
						11A1.4	Falla en bomba hidráulica Vickers			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba Vickers					
						11A1.5	Presión de alivio ajustada a una presión baja	11A1.5.1	Presión de alivio no reajustada luego del cambio de bomba	Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de alivio					
						11A1.6	Válvula de alivio con fuga interna por desgaste en los asientos			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de alivio					
				11A2	Falla interna del motor	11A2.1	Atascamiento del motor por material extraño			No hay accionamiento de la bomba de riego y por tanto no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe evaluar el sistema hidráulico para determinar la procedencia del material, realizar el cambio del motor hidráulico y realizar un flushing para evitar que partículas en el sistema puedan ocasionar una nueva falla. Tiempo down: 12-24 horas	No	A1	A2	A3	A3
						11A2.2	Desgaste en los elementos internos por vida útil			Desgaste progresivo en bujes, piñones, platos de presión y sellos. El desgaste genera fuga interna hasta que el motor no es capaz de generar el torque necesario para mover la bomba de riego. En consecuencia, no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de motor hidráulico. Tiempo down: 8-10 horas	No	B1	B2	B3	B3
				11A3	Falla en el acoplamiento con la bomba	11A3.1	Desgaste en estrías de los ejes / acople por fatiga			Ídem modo de falla 3A2.1	No	C1	C2	C4	C4

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MOTOR HIDRÁULICO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
							Tornillos de fijación del motor sueltos por vibración / daño en roscas	11A3.2		Ídem modo de falla 4A1	No	A1	A2	A2	A2
			Falla en los elementos de control	11A4			Spool de válvula de control direccional atascado en posición HOLD por contaminación	11A4.1		Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de control direccional					
							Falla en el mecanismo de accionamiento de válvula control	11A4.2		Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el mecanismo de accionamiento					
							Falla eléctrica en el módulo de control de riego	11A4.3		Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control de riego					
		11B	Motor gira a una velocidad inferior a 1000 rpm		Bajo flujo / presión de entrada aceite	11B1	Falla en bomba hidráulica Vickers	11B1.1		Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba Vickers					
							Fuga interna en la válvula de control hidráulico	11B1.2		Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el control hidráulico					
					Fuga interna del motor	11B2	Desgaste en los elementos internos por vida útil	11B2.1		Ídem modo de falla 11A2.2	No	B1	B2	B3	B3
		11C	Motor presenta fuga de aceite		Falla del sello retenedor de aceite	11C1	Sello dañado por desalineación con el eje de la bomba	11C1.1	11C1.1.1	Falla en rodamientos de la bomba de riego	Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba de riego.				
							Sello roto por sobrepresión	11C1.2	11C1.2.1	Ajuste incorrecto en la presión de alivio del sistema	Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la válvula de alivio				
							Sello roto por vida útil	11C1.3		Desgaste progresivo del sello hasta que se presenta fuga de aceite. El nivel del tanque desciende gradualmente hasta activar la alarma por bajo nivel de aceite hidráulico, con lo cual inhabilita la operación del sistema de riego y la bomba no gira. Equipo fuera de servicio. Se requiere cambiar el motor hidráulico. Tiempo down: 8-12 horas	No	B1	B2	B3	B3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – VÁLVULA DE CONTROL DIRECCIONAL (CAMIONES SERIE 4XJ Y 5ER)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
12	Direccionar el flujo de aceite procedente de la bomba hidráulica hacia los mandos o hacia el motor hidráulico, según la posición del mecanismo de varillaje, sin fugar.	12A	Incapaz de direccionar el flujo hacia los mandos / motor hidráulico	12A1	La válvula no recibe flujo de aceite	12A1.1	Líneas de la bomba Vickers al screen rotas por roce con la estructura	12A1.1.1	Base del screen suelta por tornillos partidos	Ídem modo de falla 10B4.1	No	E1	E3	E2	E2
						12A1.2	Fuga a través del screen de salida de la bomba Vickers	12A1.2.1	Sello del screen mal instalado	Mal asentamiento del sello sobre la ranura. El nivel de aceite hidráulico desciende gradualmente hasta activar la alarma de bajo nivel, lo cual ocasiona el paro del equipo. Se debe cambiar el sello del screen. Tiempo down: 2-4 horas. Puesto que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	C1	C3	C2	C2
								12A1.2.2	Tornillos de la tapa del screen sueltos por torque inadecuado	Fuga continua de aceite. El nivel de aceite hidráulico desciende gradualmente hasta activar la alarma de bajo nivel, lo cual ocasiona el paro del equipo. Se deben retorquear los tornillos y eventualmente cambiar el sello. Tiempo down: 2-4 horas. Puesto que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	B1	B3	B2	B2
						12A1.3	Falla en bomba Vickers			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la bomba Vickers					
				12A2	Falla en el accionamiento del spool	12A2.1	Spool atascado en posición HOLD por contaminación del aceite			La válvula direccional no conmuta hacia la posición RAISE, no hay suministro de aceite hacia el motor hidráulico. El aceite retorna a tanque a través de la válvula de alivio. No hay movimiento en la bomba ni riego a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe drenar el aceite hidráulico y revisar / cambiar la válvula de control. Tiempo down: 18 - 24 horas	No	A1	A2	A3	A3
						12A2.2	Falla en mecanismo de accionamiento			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el mecanismo de accionamiento					
						12A2.3	Falla en el módulo de control de riego			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control electrónico de riego					
		12B	Válvula de control presenta fuga de aceite	12B1	Sellos rotos por vida útil					El nivel de aceite desciende gradualmente hasta que se activa la alarma por bajo nivel de aceite, inhabilitando el sistema de riego. El equipo queda fuera de servicio. Se debe drenar el tanque para realizar el cambio de sellos. Tiempo: 6-8 horas	No	A1	A3	A2	A2
				12B2	Rotura de la carcasa por torque excesivo en los tornillos					El nivel de aceite desciende gradualmente hasta que se activa la alarma por bajo nivel de aceite, inhabilitando el sistema de riego. El equipo queda fuera de servicio. Se debe drenar el tanque para realizar el cambio de sellos. Tiempo: 6-8 horas. Debido a que el modo de falla obedece a error humano no se plantean tareas de mantenimiento pero se evalúan las consecuencias para determinar si el riesgo asociado amerita un análisis especial	No	A1	A3	A2	A3
		12C	Permite el paso de aceite hacia el motor hidráulico en posición HOLD	12C1	Fuga interna en la válvula de control	12C1.1	Asientos / spool de la válvula desgastados por contaminación			Debido al desgaste en los asientos (o spool) hay paso de aceite hacia el motor hidráulico con la válvula en posición HOLD. El sistema de riego queda activado permanentemente y hay desperdicio de agua. El equipo sale de servicio y se debe reemplazar la válvula de control de riego. Tiempo: 12-18 horas	No	A1	A2	A3	A3
				12C2	Spool no mantiene la posición de reposo (HOLD)	12C2.1	Mecanismo de accionamiento descalibrado			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el mecanismo de accionamiento					
		12D	Permite el paso de aceite hacia los mandos en posición RAISE	12D1	Fuga interna en la válvula de control	12D1.1	Asientos / spool de la válvula desgastados por contaminación			Debido al desgaste en los asientos (o spool) hay paso de aceite hacia los mandos. El sistema de riego se activa, pero debido al menor flujo la presión de riego es menor. El equipo sale de servicio y se debe reemplazar la válvula de control de riego	No	A1	A2	A3	A3

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – VÁLVULA DE CONTROL DIRECCIONAL (CAMIONES SERIE AGC)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS												
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.								
13	Direccionar el flujo de aceite procedente de la bomba hidráulica hacia los mandos o hacia el motor hidráulico, según se active o desactive el solenoide de la posición RAISE, sin fugar.	13A	Incapaz de direccionar el flujo hacia los mandos / motor hidráulico	13A1	La válvula no recibe flujo de aceite	13A1.1	Líneas de la bomba Vickers al screen rotas por roce con la estructura	13A1.1.1	Base del screen suelta por tornillos partidos	Ídem modo de falla 10B4.1	No	E1	E3	E2	E2								
											13A1.2	Fuga a través del screen de salida de la bomba Vickers	13A1.2.1	Sello del screen mal instalado	Ídem modo de falla 12A1.2.1	No	C1	C3	C2	C2			
																13A1.2.2	Tornillos de la tapa del screen sueltos por torque inadecuado	Ídem modo de falla 12A1.2.2.	No	B1	B3	B2	B2
																			13A2	Falla en el accionamiento del spool	13A2.1	Spool atascado en posición HOLD por aceite contaminado	Ídem modo de falla 12A2.1
											13A2.2	Circuito de señal del solenoide abierto	13A2.2.1	Solenoid RAISE en corto por sobrevoltaje	El solenoide no se energiza y por tanto no es posible desplazar el spool. La válvula no puede conmutar a la posición RAISE para permitir el paso de aceite hacia el motor hidráulico y por ende el sistema de riego no se activa, generando paro del equipo. Se debe realizar el cambio del solenoide de la válvula. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2					
																13A2.2.2	Falso contacto por conexión deficiente	El solenoide no se energiza debido a que el circuito está abierto y por tanto no es posible desplazar el spool. La válvula no puede conmutar a la posición RAISE para permitir el paso de aceite hacia el motor hidráulico y por ende el sistema de riego no se activa, generando paro del equipo. Se debe revisar el cableado y corregir la conexión defectuosa. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B1
											13A2.2.3	Cable del harness aterrizado	Ídem modo de falla 13A2.2.2	No	B1				B2	B1	B1		
														13A2.5	Falla en el módulo de control de riego	Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control electrónico de riego							
13B	Válvula de control presenta fuga de aceite	13B1	Sellos rotos por vida útil	Ídem modo de falla 12A1	No	A1	A3	A1	A1														
					13B2	Rotura de la carcasa por torque excesivo en los tornillos	Ídem modo de falla 12B2	No	A1	A3	A2	A3											
14	Bloquear el flujo de aceite hacia el motor hidráulico cuando la válvula se encuentra en posición HOLD y bloquear el flujo hacia los mandos cuando se encuentra en la posición RAISE	14A	Permite el paso de aceite hacia el motor hidráulico en posición HOLD	14A1				Fuga interna en la válvula de control	14A1.1	Asientos / spool de la válvula desgastados por contaminación	Debido al desgaste en los asientos (o spool) hay paso de aceite hacia el motor hidráulico con la válvula en posición HOLD. El sistema de riego queda activado permanentemente y hay desperdicio de agua. El equipo sale de servicio y se debe reemplazar la válvula de control direccional. Tiempo down: 6-8 horas	No	A1	A2	A3	A3							
					14B	Permite el paso de aceite hacia los mandos en posición RAISE	14B1					Fuga interna en la válvula de control	14B1.1	Asientos / spool de la válvula desgastados por contaminación	Debido al desgaste en los asientos (o spool) hay paso de aceite hacia los mandos. El sistema de riego se activa, pero debido al menor flujo de aceite la presión de riego es menor. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la válvula de control. Tiempo down: 6-8 horas	No	A1	A2	A3	A3			

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – VÁLVULA DE CONTROL DIRECCIONAL (CAMIONES SERIE AGC)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
15	Para la posición RAISE: permitir el paso de aceite hacia el tanque cuando la presión del sistema alcanza un valor de 1500 psi y bloquear el puerto de apertura de la válvula de alivio de baja presión	15A	No permite el retorno de aceite a tanque cuando hay eventos de sobrepresión (por encima de 1800 psi)	15A1	Válvula de alivio atascada					En el evento en que el sistema opere muy cerca o por encima de los límites máximos de operación de la bomba y del motor (2500 psi) se acelera el desgaste de elementos internos, ocurren daños en los sellos y fugas de aceite que activarían la alarma por bajo nivel o daños catastróficos como rotura de ejes del motor y bomba inhabilitando el sistema de riego. Se debe cambiar la válvula de alivio del control hidráulico. Tiempo down: 12-24 horas	Sí	B1	B3	B4	B4
		15B	Permite el paso de aceite a tanque sin existir sobrepresiones en el sistema (por debajo de 1800 psi)	15B1	Presión de alivio ajustada a un valor inferior al estándar	15B1.1	Válvula de alivio no calibrada después del cambio de bomba			La válvula de alivio se encuentra ajustada a una presión inferior a la que demanda el sistema y en consecuencia el flujo de retorno hacia el tanque hidráulico. El motor h/co y la bomba de riego no giran y no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe drenar el aceite h/co del tanque para reajustar y calibrar la presión de alivio. Tiempo down: 4-6 horas	No	A1	A2	A1	A2
				15B2	Asientos de la válvula desgastados por vida útil					Una parte o la totalidad del flujo de la bomba es retornado a tanque a través de la válvula de alivio. La presión y el flujo de aceite hacia el motor hidráulico disminuyen y el motor gira más lento de lo normal (o no gira), por lo cual la presión de riego también disminuye. Adicionalmente ocurre un incremento gradual de la temperatura del aceite por lo que puede accionar la alarma de alta temperatura y el módulo de control inhabilitaría el sistema de riego. Se debe parar el equipo para realizar el cambio de la válvula de alivio	No	B1	B2	B2	B2

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MECANISMO DE ACCIONAMIENTO (SERIES 4XJ Y 5ER)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
16	Transformar la energía neumática en energía mecánica para desplazar completamente el spool de la válvula de control direccional hacia la posición RAISE cuando se activa el interruptor de riego y hacia la posición HOLD cuando se desactiva el interruptor	16A	No desplaza el spool hacia la posición RAISE cuando se activa el interruptor de riego	16A1	Falla en el suministro de aire a la rotocámara	16A1.1	Manguera de entrada de aire rota por cristalización			Presión de aire nula o insuficiente para desplazar el vástago de la rotocámara, el varillaje no transmite movimiento al spool de la válvula de control direccional y ésta no puede conmutar hacia la posición RAISE. Debido a esto no hay flujo de aceite hacia el motor hidráulico y la bomba de riego no se activa, por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de la manguera. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B1
						16A1.2	Manguera obstruida por impurezas en el sistema			Ídem modo de falla 16A1.1	No	B1	B2	B1	B2
						16A1.3	Válvula de descarga rápida obstruida por impurezas			Ídem modo de falla 16A1.1. Requiere el cambio de la válvula de descarga rápida y eliminar la fuente de las impurezas. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B2
						16A1.4	Válvula de descarga rápida presenta fuga			Ídem modo de falla 16A1.1. Requiere el cambio de la válvula de descarga rápida. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B2
						16A1.5	Falla en la electroválvula de aire			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la electroválvula					
						16A1.6	Falla en el módulo de control de riego			Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control					

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MECANISMO DE ACCIONAMIENTO (SERIES 4XJ Y 5R)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
						16A1.7	Baja presión de aire por falla en el sistema neumático			Ídem modo de falla 16A1.1. Las consecuencias se evalúan solo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se plantean tareas de mantenimiento debido a que no hacen parte del objeto de estudio	No	B1	B2	B1	B3
		16A2	Falla en la rotocámara	16A2.1	Diafragma de la rotocámara roto por vida útil					La rotocámara no se presuriza y por lo tanto no hay desplazamiento del vástago, el varillaje no transmite movimiento al spool de la válvula de control direccional y ésta no puede conmutar hacia la posición RAISE. Debido a esto no hay flujo de aceite hacia el motor hidráulico y la bomba de riego no se activa, por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de rotocámara. Tiempo down: 4-6 horas	No	C1	C2	C2	C2
						16A2.2	Vástago de la rotocámara doblado por sobreesfuerzo	16A2.2.1	Varillaje agarrotado por falta de lubricación	Las articulaciones del varillaje no rotan libremente por falta de lubricación generando un sobreesfuerzo que ocasiona flexión del vástago durante la carrera de salida. Al flectarse el recorrido del varillaje se altera y por tanto no puede desplazar el spool completamente hacia la posición RAISE. No hay flujo de aceite hacia el motor hidráulico y la bomba de riego no se activa, por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de rotocámara. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B2	B2
								16A2.2.2	Rotocámara desalineada por tornillos de sujeción sueltos	Con los tornillos sueltos, al extender o retraer el vástago puede pasar por posiciones de bloqueo generando sobreesfuerzos y flexión. Debido a la flexión el recorrido del varillaje se altera y por tanto no puede desplazar el spool completamente hacia la posición RAISE. No hay flujo de aceite hacia el motor hidráulico y la bomba de riego no se activa, por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de rotocámara. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B2	B2
		16A2	Falla en el mecanismo de varillaje	16A2.1	Rosca de la horquilla / vástago desgastadas por fatiga					La horquilla se suelta del vástago y no transmite movimiento al varillaje. No hay desplazamiento del spool de la válvula de control y por tanto no hay suministro de aceite al motor hidráulico. La bomba de riego no acciona y no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se requiere cambiar de la rotocámara y calibrar el mecanismo. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B2	B2
						16A2.2	Rotura del mecanismo por sobreesfuerzo	16A2.2.1	Mecanismo agarrotado por falta de lubricación	El varillaje se atasca por falta de lubricación generando un esfuerzo excesivo en la horquilla del vástago que ocasiona su rotura. Al no haber movimiento del varillaje no hay desplazamiento del spool de la válvula de control y por tanto no hay suministro de aceite al motor hidráulico. La bomba de riego no acciona y no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se requiere cambiar de la rotocámara. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B2	B2
						16A2.3	Pasador de la horquilla suelto por pérdida del cotter pin			El vástago de la rotocámara se extiende, pero no transmite movimiento al varillaje por la ausencia del pasador. No hay desplazamiento del spool en la válvula de control y por tanto no hay suministro de aceite al motor hidráulico. La bomba de riego no acciona y no hay salida de agua a través de los aspersores. Equipo fuera de servicio. Se debe instalar nuevamente el pasador y cotter pin y calibrar el varillaje. Tiempo down: 1-3 horas	No	B1	B2	B1	B1
						16A2.4	Mecanismo descalibrado			Las distancias y los recorridos del mecanismo no son correctos y por tanto no se acciona el spool de la válvula de control. No hay suministro de aceite al motor hidráulico, la bomba de riego no acciona y no hay salida de agua a través de los aspersores. El equipo queda fuera de servicio al perder la función de riego. Se debe calibrar el varillaje. Tiempo down: 1-3 horas	No	B1	B2	B1	B2

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MECANISMO DE ACCIONAMIENTO (SERIES 4XJ Y 5ER)											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
		16B	No desplaza el spool hacia la posición HOLD cuando se desactiva el interruptor de riego	16B1	Vástago de la rotocámara doblado por sobreesfuerzo	16B1.1	Mecanismo agarrotado por falta de lubricación			Las articulaciones del varillaje no rotan libremente por falta de lubricación generando un sobreesfuerzo que ocasiona flexión del vástago durante la carrera de salida. Al flectarse el recorrido del varillaje se altera y por tanto no puede desplazar el spool completamente hacia la posición RAISE . No hay flujo de aceite hacia el motor hidráulico y la bomba de riego no se activa, por lo cual no hay salida de agua por los aspersores. El equipo queda fuera de servicio y se debe realizar el cambio de rotocámara. Tiempo down: 4-6 horas	No	B1	B2	B2	B2
				16B2	Rotocámara queda presurizada	16B2.1	Válvula de descarga rápida obstruida por impurezas			Debido a obstrucción en la válvula de descarga rápida, la rotocámara no puede liberar el aire y por tanto el vástago permanecerá extendido y la válvula en posición RAISE . El aceite continúa pasando hacia el motor hidráulico y el riego queda activado permanentemente. El equipo queda fuera de servicio y se debe cambiar la válvula de descarga rápida. Tiempo down: 1-2 horas	No	B1	B2	B1	B1
						16B2.2	Electroválvula de rotocámara con pase de aire por asientos en mal estado			La rotocámara queda presurizada por el paso continuo de aire y por tanto el vástago permanece extendido y la válvula de control en posición RAISE . El aceite continúa pasando hacia el motor hidráulico y el riego queda activado permanentemente. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la electroválvula. Tiempo down: 1-3 horas	No	A1	A2	A1	A2

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
17	Controlar el encendido y apagado de la bomba de riego mediante la activación / desactivación de la electroválvula correspondiente (electroválvula de la rotocámara para los camiones serie 4XJ y 5ER o el solenoide RAISE de la válvula de control para la serie AGC)	17A	No controla el encendido / apagado de la bomba de riego	17A1	Módulo no envía señal a la electroválvula	17A1.1	Breaker de la línea de alimentación disparado por corto en electroválvula			Sobrevoltaje en el circuito causado por la falla de un solenoide ocasiona el disparo del breaker principal, por lo cual el módulo no recibe voltaje de alimentación y queda inhabilitado sin poder emitir señales. Equipo fuera de servicio. Se debe corregir la causa del sobrevoltaje. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
						17A1.2	Falla en el alternador			Debido a que el módulo debe recibir la señal del alternador para detectar cuando el camión está en funcionamiento, cualquier falla en el alternador inhabilita el módulo electrónico por lo cual el camión no puede operar hasta que se tome el correctivo. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan solo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se plantean tareas de mantenimiento debido a que el componente no hace parte del sistema de estudio	No	B1	B2	B1	B2
						17A1.3	Línea del solenoide abierta por falso contacto			El solenoide de la válvula no recibe voltaje y por tanto no se energiza. Para los camiones serie 4XJ y 5ER, no hay paso de aire hacia la rotocámara por lo que el mecanismo de accionamiento de la válvula de control no funcionará. Para los equipos serie AGC el solenoide RAISE no desplazará el spool de la válvula de control hacia la posición RAISE . Cualquiera que sea el modelo no habrá paso de aceite hacia el motor hidráulico y por tanto la función de riego no se activa (motor hidráulico y bomba de riego no giran). El equipo queda fuera de servicio para reparar la conexión defectuosa. Tiempo down: 1-3 horas	No	B1	B2	B1	B2

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
						17A1.4	Línea del solenoide aterrizada por aislamiento en mal estado			Ídem modo de falla 17A1.2	No	B1	B2	B1	B2
						17A1.5	Interruptor de la electroválvula (pedal de riego, pulsador inalámbrico o switch del panel) dañado			Ídem modo de falla 17A1.2. El correctivo de este modo de falla implica cambiar el interruptor dañado. Tiempo down: 1-3 horas	No	B1	B2	B1	B2
						17A1.6	Falla en tarjeta electrónica del módulo por daño en los mosfet			Ídem modo de falla 17A1.2 Se requiere cambiar de la tarjeta electrónica del módulo. Tiempo down: 2-4 horas	No	C1	C2	C2	C2
				17A2	Falla en la electroválvula de paso de aire					Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la electroválvula					
18	Controlar la apertura y cierre de los aspersores mediante la activación / desactivación de la electroválvula correspondiente	18A	Incapaz de controlar el cierre de los aspersores	18A1	Falla en suministro de voltaje a la electroválvula de paso de aire	18A1.1	Breaker de la línea de alimentación disparado por corto en electroválvula			Sobrevoltaje en el circuito causado por la falla de un solenoide ocasiona el disparo del breaker principal, por lo cual el módulo no recibe voltaje de alimentación y queda inhabilitado sin poder emitir señales. Equipo fuera de servicio. Se debe corregir la causa del sobrevoltaje. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
						18A1.2	Falla en el alternador			Debido a que el módulo debe recibir la señal del alternador para detectar cuando el camión está en funcionamiento, cualquier falla en el alternador inhabilita el módulo electrónico por lo cual el camión no puede operar hasta que se tome el correctivo. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan solo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se plantean tareas de mantenimiento debido a que el componente no hace parte del sistema de estudio	No	B1	B2	B1	B2
						18A1.3	Línea del solenoide abierta por falso contacto			El solenoide de la electroválvula correspondiente no se energiza y por tanto no hay paso de aire hacia el aspersor. Al activarse la bomba, el aspersor abrirá permitiendo la salida (no deseada) de agua afectando el patrón de riego. Equipo fuera de servicio. Se debe reparar la conexión defectuosa. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
						18A1.4	Línea del solenoide aterrizada por aislamiento en mal estado			La electroválvula correspondiente no se energiza y por tanto no hay paso de aire hacia el aspersor. Al activarse la bomba, el aspersor abrirá permitiendo la salida (no deseada) de agua afectando el patrón de riego. Equipo fuera de servicio. Se debe reparar la conexión defectuosa. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
						18A1.5	Interruptor de la electroválvula dañado (falla abierta)			La electroválvula correspondiente no se energiza y por tanto no hay paso de aire hacia el aspersor. Al activarse la bomba, el aspersor abrirá permitiendo la salida (no deseada) de agua afectando el patrón de riego. Equipo fuera de servicio. Se debe reparar la conexión defectuosa. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
				18A2	Falla en la tarjeta electrónica del módulo por daño e mosfets					El módulo no emite señales hacia las electroválvulas. No hay paso de aire hacia los aspersores por lo cual abrirán cada vez que se active la bomba de riego sin poder controlar el cierre. Equipo fuera de servicio. Se debe cambiar la tarjeta del módulo. Tiempo down: 3-6 horas	No	C1	C2	C2	C2
				18A3	Falla en la electroválvula de paso de aire					Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para la electroválvula					

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
19	Monitorear y mostrar en el display del módulo el estado de las variables del sistema hidráulico (presión, temperatura, restricción del screen y nivel de aceite hidráulico)	19A	Incapaz de monitorear la totalidad de las variables del sistema hidráulico	19A1	Falla en la tarjeta electrónica del módulo por daño en mosfets					El módulo de control no puede registrar ni mostrar ninguna de las variables en la pantalla ni tampoco generar las señales para controlar la apertura y cierre de las electroválvulas, por lo cual no es posible operar el equipo y queda fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de la tarjeta del módulo de control. Tiempo down: 3-6 horas	No	C1	C2	C2	C2
				19A2	Línea de señal del alternador abierta por falso contacto					El módulo de control no puede registrar ni mostrar ninguna de las variables en la pantalla ni tampoco generar las señales para controlar la apertura y cierre de las electroválvulas, por lo cual no es posible operar el equipo y queda fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de la tarjeta del módulo de control. Tiempo down: 2-3 horas	No	A1	A2	A1	A2
		19B	Incapaz de monitorear alguna variable en particular del sistema hidráulico	19B1	Línea del sensor abierta por falso contacto					El display del monitor de riego muestra un mensaje de Error para la lectura del sensor. En principio no genera paro del equipo pero al no tener indicación de la lectura se pueden generar eventos de sobrepresión que al no ser detectados ocasionarían daños en los componentes	No	B1	B2	B1	B2
				19B2	Falla interna del sensor					El display del monitor de riego muestra un mensaje de Error para la lectura del sensor. En principio no genera paro del equipo pero al no tener indicación de la lectura se pueden generar eventos de sobrepresión que al no ser detectados ocasionarían daños en los componentes	No	B1	B2	B1	B2
		19C	No muestra información en el display	19C1	Daño en los leds del display por alta vibración					La vibración en la cabina por el terreno irregular afecta los leds internos del display. El módulo de control no muestra ninguna información en la pantalla por lo que no es posible operar el equipo de manera segura y queda fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de la tarjeta del display	No	B1	B2	B2	B2
20	Detectar cuando se presente bajo nivel en el tanque de agua (para evitar que la bomba trabaje en vacío) y notificar mediante un mensaje en el display	20A	No registra bajo nivel del tanque de agua	20A1	Línea del switch abierta por falso contacto					El display del monitor de riego muestra un mensaje de Error para la indicación del switch. Al no haber indicación el operador continuará operando el sistema de riego hasta que el agua en el tanque se agote permitiendo la operación de la bomba en vacío con posibles daños en el prensaestopas y el eje. Se debe detener el equipo para prevenir daños en la bomba por mala operación. Tiempo down: 2-4 horas	Sí	B1	B2	B1	B2
				20A2	Switch de nivel pegado por acumulación de barro y lodo					El display del monitor no muestra alerta cuando se alcanza el nivel bajo. Al no haber indicación el operador continuará operando el sistema de riego hasta que el agua en el tanque se agote permitiendo la operación de la bomba en vacío con posibles daños en el prensaestopas y el eje. Se debe detener el equipo para prevenir daños en la bomba por mala operación. Tiempo down: 2-4 horas	Sí	B1	B2	B1	B2
				20A3	Falla en tarjeta del módulo por daño en mosfets					Ídem modo de falla 19A1	No	B1	B2	B1	B2
		20B	No hay notificación acerca del bajo nivel	20B1	Daño en los leds del display por alta vibración					Ídem modo de falla 19C1	No	B1	B2	B1	B2
		21	Generar alertas (visuales y sonoras) y desconectar la señal del sensor de acelerador, cuando alguno de las variables se sale del rango permisible	21A	No genera ningún tipo de alerta bajo una variable fuera de rango	21A1	Falla en la tarjeta electrónica del módulo por daño en mosfets					Ídem modo de falla 19A1	No	C1	C2
21B1	No hay indicación visual de las alarmas									Ídem modo de falla 19C1	No	B1	B2	B2	B2
21B2	Led piloto dañado							Al ocurrir una condición anormal en alguna de las variables el led no se enciende. Si el buzzer se encuentra operativo se activará alertando al operador. Adicionalmente el módulo desconectará la señal del acelerador inhabilitando el sistema de riego hasta que se corrija la condición anormal	Sí	A1	A2	A2	A2		

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
		21C	No hay indicación sonora de las alarmas	21C1	Buzzer dañado / desconectado por vibración excesiva en la cabina					La vibración en la cabina por el tránsito sobre terreno irregular genera afecta los componentes internos del buzzer. Al ocurrir una condición anormal en alguna de las variables el buzzer no se activa. Si el LED piloto se encuentra operativo se activará alertando al operador. Adicionalmente el módulo desconectará la señal del acelerador inhabilitando el sistema de riego hasta que se corrija la condición anormal	Sí	A1	A2	A2	A2
		21D	Genera alarmas con parámetros dentro de los límites permisibles	21C1	Falsa lectura por sensor / switch dañado					Debido a la falsa lectura el módulo genera la señal de alarma desconectando además la señal del sensor del acelerador, con lo cual queda deshabilitada temporalmente la operación el equipo. Se debe realizar el cambio del sensor afectado	Sí	C1	C2	C2	C2

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – ELECTROVÁLVULA NEUMÁTICA											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
22	Permitir el paso de aire hacia el elemento final (rotocámara o aspersores) al energizarse el solenoide y cortar el paso al desenergizarse el solenoide	22A	No energiza el solenoide	22A1	Solenoide en corto por sobrevoltaje					El solenoide de la electroválvula no se energiza y por tanto no paso de aire bien sea hacia la rotocámara (en cuyo caso el mecanismo de accionamiento de la válvula de control no funcionará y no habrá riego) o hacia el aspersor, en cuyo caso no mantendrá el cierre al activarse la bomba de riego. Debido a que se pierde el control sobre el sistema de riego el equipo queda fuera de servicio. Se debe cambiar el solenoide de la electroválvula. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B2
				22A2	Línea del solenoide abierta por falso contacto					La electroválvula correspondiente no se energiza y por tanto no hay paso de aire hacia el aspersor. Al activarse la bomba, el aspersor abrirá permitiendo la salida (no deseada) de agua afectando el patrón de riego. Equipo fuera de servicio. Se debe reparar la conexión defectuosa. Tiempo down: 2-4 horas	No	B1	B2	B1	B2
				22A3	Falla en la tarjeta del módulo por daño en mosfets					Los efectos y las consecuencias se analizan por separado. Ver análisis para el módulo de control electrónico de riego					
		22B	No permite el paso de aire hacia el elemento (rotocámara o aspersor) cuando se energiza el solenoide	22B1	Manguera de suministro de aire rota por cristalización					El spool de la electroválvula se desplaza, pero no hay paso de aire hacia el elemento. Si se trata de la rotocámara el mecanismo de accionamiento de la válvula de control no funcionará, no habrá paso de aceite hacia el motor hidráulico y por ende no activará el riego. Si se trata de un aspersor, no permanecerá cerrado cuando se active la bomba de riego y permitirá la salida (no deseada) de agua. Equipo fuera de servicio. Se debe realizar el cambio de la manguera de aire. Tiempo down: 2-3 horas	No	B1	B2	B1	B2
				22B2	Electroválvula obstruida por impurezas					El spool de la electroválvula se desplaza, pero no hay paso de aire hacia el elemento debido a la obstrucción. Si se trata de la electroválvula de la rotocámara el mecanismo de accionamiento de la válvula de control no funcionará, no habrá paso de aceite al motor hidráulico y no podrá activarse la función de riego. Si se trata de la electroválvula de un aspersor, no permanecerá cerrado cuando se active la bomba de riego y permitirá la salida (no deseada) de agua. Equipo fuera de servicio. Se deberá realizar la limpieza de las líneas y determinar la procedencia de las impurezas. Tiempo down: 3-5 horas	No	A1	A2	A1	A2

Anexo A. (Continuación)

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS – MÓDULO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE RIEGO											VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS				
Cód. Fun.	Funciones	Cód. FF	Descripción falla funcional	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 1	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 2	Cód. MF	Modo Falla - Nivel 3	Descripción Efectos	Falla Oculta	R. Hum	R. Amb	R. Econ	Imp. Oper.
				22B3	Baja presión de aire por falla en el sistema neumático					El sistema neumático no provee la presión de aire suficiente en el aspersor para contrarrestar la presión de la bomba de agua, permitiendo por ende la salida de agua a través del aspersor. Las consecuencias de este modo de falla se evalúan sólo para determinar la conveniencia de un análisis posterior pero no se definirán tareas de mantenimiento debido a que no hace parte del alcance del proyecto	No	B1	B2	B1	B3
		22C	Incapaz de cerrar el paso de aire cuando se desactiva el solenoide	22C1	Válvula con pase por asientos desgastados					Al desenergizar el solenoide el spool retorna a su posición de reposo, pero debido al desgaste permite el paso del aire hacia el elemento final. Si se trata de la electroválvula de la rotocámara el mecanismo de accionamiento de la válvula de control no funcionará, no habrá paso de aceite al motor hidráulico y no podrá activarse la función de riego. Si se trata de la electroválvula de un aspersor, no permanecerá cerrado cuando se active la bomba de riego y permitirá la salida (no deseada) de agua. Equipo fuera de servicio. Se deberá cambiar la electroválvula. Tiempo down: 3-5 horas	No	A1	A2	A1	A2

Fuente: Grupo de trabajo RCM

Anexo B. Selección de tareas de mantenimiento

Func.	FF	Cód. MF	Falla Oculta	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Cod. Tarea
1	1A	1A1.1	No	Rediseño	Reforzar o cambiar la geometría de los puntos concentradores de esfuerzos			
1	1A	1A1.2.1	No	Correr a falla				
1	1A	1A1.3	No					
1	1A	1A2.1	No					
2	2A	2A1.1	Sí					
2	2A	2A2.1.2	No	Rediseño	Diseñar la rejilla con una geometría adecuada que evite el salpique excesivo de agua			
2	2B	2B1.1	Sí	Preventivo	Inspeccionar que la rejilla de protección se encuentre instalada y en buen estado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-01
3	3A	3A1.1	Sí	Búsqueda de falla	Realizar prueba de funcionamiento del switch de nivel y verificar estado de conectores	500 horas	1 Téc. Eléctrico	BF-01
3	3A	3A1.2	No	Preventivo	Realizar limpieza a la rejilla de protección	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-02
3	3A	3A2.1	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de las estrías del eje / acople de la bomba	1000 horas	2 Téc. Mecánicos	PR-03
3	3A	3A3.1.1	Sí	Preventivo	Inspeccionar que la rejilla de protección se encuentre instalada y en buen estado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-01
3	3A	3A3.2	No	Correr a falla				
3	3A	3A3.3	No	Sustitución cíclica	Cambiar bomba de riego	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-01
3	3A	3A3.4.1	Sí	Búsqueda de falla	Inspeccionar que la unidad de lubricación automática funcione correctamente y dosifique la cantidad adecuada de grasa	250 horas	1 Téc. Mecánico	BF-02
3	3A	3A3.4.2	Sí	Búsqueda de falla	Inspeccionar que la unidad de lubricación automática funcione correctamente y dosifique la cantidad adecuada de grasa	250 horas	1 Téc. Mecánico	BF-02
3	3A	3A3.4.3	No	Mantenimiento a condición	Inspección termográfica a los rodamientos	500 horas	2 Téc. Mecánicos	MC-01
3	3B	3B1	No	Sustitución cíclica	Cambiar bomba de riego	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-01
3	3C	3C1	No	Correr a falla				
3	3C	3C2.1						
3	3C	3C3.1	No	Sustitución cíclica	Cambiar bomba de riego	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-01
3	3C	3C3.2	No	Sustitución cíclica	Cambiar bomba de riego	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-01
3	3D	3D1	No	Preventivo	Inspeccionar estado general del prensaestopas y verificar que el goteo sea el adecuado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-04
3	3D	3D2	No	Preventivo	Inspeccionar estado general del prensaestopas y verificar que el goteo sea el adecuado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-04
3	3D	3D3	No	Preventivo	Inspeccionar estado general del prensaestopas y verificar que el goteo sea el adecuado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-04
3	3D	3D4	No	Reacondicionamiento Cíclico	Realizar el cambio y ajuste de la empaquetadura	1000 horas	1 Téc. Mecánico	RC-01
3	3D	3D5	No	Sustitución cíclica	Cambiar bomba de riego	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-01
3	3E	3E1	No	Preventivo	Inspeccionar estado general del prensaestopas y verificar que el goteo sea el adecuado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-04
3	3F	3F2.1	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los tornillos de la carcasa y de la base y verificar que estén ajustados	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-05
4	4A	4A1	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los tornillos de sujeción y verificar que estén ajustados	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-06
5	5A	5A2.1	No	Preventivo	Verificar que la válvula se encuentra orientada hacia abajo para evitar acumulación de impurezas. Inspeccionar que el orificio no esté obstruido y que realiza la descarga con normalidad	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-07

Anexo B. (Continuación)

Func.	FF	Cód. MF	Falla Oculta	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Cod. Tarea
5	5A	5A3	No	Correr a falla				
5	5C	5C1.1	No	Rediseño	Invertir la posición de los aspersores en el distribuidor para que el material sea expulsado por gravedad			
5	5C	5C2.1.1	No	Rediseño	Cambiar el material del housing del aspersor por uno más resistente a la abrasión			
5	5D	5D1	No	Preventivo	Revisar la orientación del aspersor e inspeccionar ajuste correcto del anillo	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-08
6	6A	6A1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de la manguera de aire en toda su longitud especialmente en los puntos de roce con la estructura	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-09
6	6A	6A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de la manguera de aire en toda su longitud especialmente en los puntos de roce con la estructura	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-09
6	6A	6A1.3	No	Preventivo	Inspeccionar la válvula de descarga rápida por fugas	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-10
6	6A	6A1.4	No					
6	6A	6A2.1	No	Preventivo	Verificar apertura y cierre normal del aspersor	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-11
6	6A	6A2.2	No	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de aspersor	1000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-02
7	7A	7A1	No	Correr a falla				
7	7B	7B1	No	Correr a falla				
7	7B	7B2.1	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los soportes de la flauta y verificar que la tornillería se encuentre ajustada	1000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-12
8	8A	8A1	No	Correr a falla				
8	8A	8A2	No	Correr a falla				
8	8B	8B1	No	Correr a falla				
9	9A	9A1.1	No	Correr a falla				
9	9A	9A2.1	No	Sustitución cíclica	Cambiar sellos y rodamientos del mecanismo de accionamiento	2000 horas	1 Téc. Mecánico	SC-03
9	9A	9A3.1	No	Sustitución cíclica	Cambiar sellos de las mangueras de presión y retorno del motor hidráulico	2000 horas	1 Téc. Mecánico	SC-04
9	9A	9A4	No	Correr a falla				
10	10A	10A1.1	No	Preventivo	Verificar el nivel de aceite en el tanque hidráulico	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-13
10	10A	10A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad y estado de las líneas y el tubo de succión	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-14
10	10A	10A1.3.1	Sí	Preventivo	Realizar inspección y limpieza del screen de succión de la bomba	2000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-15
10	10A	10A2.1	No	Sustitución cíclica	Cambiar la bomba hidráulica Vickers	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-05
10	10A	10A3.1	No	Sustitución cíclica	Cambiar la bomba hidráulica Vickers	4000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-05
10	10B	10B1.1	Sí	Rediseño	Cambiar la configuración de la línea de succión para suavizar el flujo de aceite en la entrada de la bomba			
10	10B	10B2	No	Preventivo + Mantenimiento a condición	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas. Realizar prueba de medición de eficiencia de la bomba para determinar la pérdida de caudal.	1000 horas	2 Téc. Mecánicos	PR-16 MC-02
10	10B	10B3.1	No	Mantenimiento a condición	Tomar muestra de aceite para análisis	250 horas	1 Téc. Mecánico	MC-03
10	10B	10B4.1	No	Preventivo	Inspeccionar que los tornillos de la base del screen se encuentran en buen estado. Revisar la integridad de las mangueras del screen verificando que no presentan roce ni fuga	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-17
10	10D	10D3	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad y ajuste de los tornillos del cuerpo de la bomba y verificar que no existan fugas	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-18

Anexo B. (Continuación)

Func	FF	Cód. MF	Falla Oculta	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Cod. Tarea
11	11A	11A1.1.1	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad de la línea de suministro verificando que los clamps de sujeción estén debidamente instalados	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-19
11	11A	11A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad de la línea de suministro verificando que los clamps de sujeción estén debidamente instalados	250 horas	2 Téc. Mecánicos	PR-19
11	11A	11A1.3	No	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de sellos de las líneas de presión y retorno de aceite del motor h/co	2000 horas	1 Téc. Mecánico	SC-06
11	11A	11A2.1	No	Correr a falla				
11	11A	11A2.2	No	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de motor hidráulico	8000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-07
11	11A	11A3.1	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de las estrías del eje / acople de la bomba	1000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-03
11	11A	11A3.2	No	Preventivo	Inspeccionar integridad y ajuste de los tornillos que sujetan el motor a la bomba	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-06
11	11B	11B2.1	No	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de motor hidráulico	8000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-07
11	11C	11C1.3	No	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de motor hidráulico	8000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-07
12	12A	12A1.1.1	No	Preventivo	Inspeccionar que los tornillos de la base del screen se encuentran en buen estado. Revisar la integridad de las mangueras del screen verificando que no presenten roce ni fuga	250 Horas	1 Téc. Mecánico	PR-17
12	12A	12A2.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
12	12B	12B1	No	Correr a falla				
12	12C	12C1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	1000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
12	12D	12D1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	1000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
13	13A	13A1.1	No	Preventivo	Inspeccionar que los tornillos de la base del screen se encuentran en buen estado. Revisar la integridad de las mangueras del screen verificando que no presentan roce ni fuga	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-17
13	13A	13A2.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	1000 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
13	13A	13A2.2.1	No	Preventivo	Verificar el valor de resistencia en el solenoide de la válvula de control	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-20
13	13A	13A2.2.2	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de los conectores de la válvula de control y realizar limpieza	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-21
13	13A	13A2.2.3	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado del solenoide de la válvula de control	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-22
13	13B	13B1	No	Correr a falla				
14	14A	14A1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
14	14B	14B1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-16
15	15A	15A1	Sí	Búsqueda de falla	Realizar prueba de la válvula y medición de presión de alivio del sistema	2000 horas	2 Téc. Mecánicos	BF-03
15	15B	15B1.1	No	Correr a falla				
15	15B	15B2	No	Correr a falla				
16	16A	16A1.1	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de la manguera de aire en toda su longitud especialmente en los puntos de roce con la estructura	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-23
16	16A	16A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de la manguera de aire en toda su longitud especialmente en los puntos de roce con la estructura	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-23

Anexo B. (Continuación)

Func	FF	Cód. MF	Falla Oculta	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Cod. Tarea
16	16A	16A1.3	No	Preventivo	Inspeccionar que el orificio de descarga de la válvula esté orientado hacia abajo y verificar que la descarga de aire se realiza con normalidad	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-24
16	16A	16A1.4	No	Preventivo	Inspeccionar la válvula de descarga rápida por fugas	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-25
16	16A	16A2.1	No	Sustitución cíclica	Realizar cambio de rotocámara	6000 horas	2 Téc. Mecánicos	SC-08
16	16A	16A2.2.1	No	Preventivo	Realizar lubricación del mecanismo de accionamiento de la válvula	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-26
16	16A	16A2.2.2	No	Preventivo	Inspeccionar que los tornillos de fijación de la rotocámara se encuentren ajustados	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-27
16	16A	16A2.1	No	Preventivo	Inspeccionar estado del vástago y horquilla de la rotocámara	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-28
16	16A	16A2.2.1	No	Preventivo	Realizar lubricación del mecanismo de accionamiento de la válvula	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-25
16	16A	16A2.3	No	Preventivo	Revisar que el pasador de la horquilla tenga los cotter pin instalados y que estén en buen estado	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-29
16	16A	16A2.4	No	Preventivo	Inspeccionar que el varillaje desplaza completamente la válvula de control entre sus dos posiciones HOLD y RAISE	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-30
16	16B	16B1.1	No	Preventivo	Realizar lubricación del mecanismo de accionamiento de la válvula	250 horas	1 Téc. Mecánico	PR-26
16	16B	16B2.1	No	Preventivo	Inspeccionar que el orificio de descarga de la válvula esté orientado hacia abajo y verificar que la descarga de aire se realiza con normalidad	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-24
16	16B	16B2.2	No	Correr a falla				
17	17A	17A1.1.1	No	Preventivo	Verificar el valor de resistencia en el solenoide de las electroválvulas	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-31
17	17A	17A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de los conectores de la electroválvula neumática y conexiones en los interruptores	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-32
17	17A	17A1.3	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado de la electroválvula neumática	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-33
17	17A	17A1.4	No	Correr a falla				
17	17A	17A1.4	No	Correr a falla				
18	18A	18A1.1.1	No	Preventivo	Verificar el valor de resistencia en el solenoide de las electroválvulas	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-31
18	18A	18A1.2	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de conectores de la electroválvula neumática	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-32
18	18A	18A1.3	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado de la electroválvula neumática	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-33
18	18A	18A1.4	No	Correr a falla				
18	18A	18A2	No	Correr a falla				
19	19A	19A2	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado y el estado de conectores de la señal del alternador	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-34
19	19B	19B1	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado y el estado de conectores del sensor	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-35
19	19B	19B2	No	Correr a falla				
19	19C	19C1	No	Correr a falla				
20	20A	20A1	Sí	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado y estado de conectores del switch	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-36
20	20A	20A2	Sí	Búsqueda de falla	Revisar funcionamiento correcto del switch de nivel	250 horas	1 Téc. Eléctrico	BF-01
20	20A	20A3	No	Correr a falla				
20	20B	20B1	No	Correr a falla				

Anexo B. (Continuación).

Func.	FF	Cód. MF	Falla Oculta	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Cod. Tarea
21	21A	21A1	No	Correr a falla				
21	21B	21B1	No	Correr a falla				
21	21B	21B2	Sí	Búsqueda de falla	Simular una condición de alarma y verificar que se encienda el led piloto	250 horas	1 Téc. Eléctrico	BF-04
21	21C	21C1	Sí	Búsqueda de falla	Simular una condición de alarma y verificar que el buzzer emite la alerta audible	250 horas	1 Téc. Eléctrico	BF-04
21	21C	21C1	Sí	Correr a falla				
22	22A	22A1	No	Preventivo	Verificar el valor de resistencia en el solenoide de la electroválvula	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-31
22	22A	22A2	No	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado y el estado de conectores de la electroválvula neumática	250 horas	1 Téc. Eléctrico	PR-33
22	22B	22B1	No	Preventivo	Inspeccionar el estado de la manguera de aire en toda su longitud especialmente en los puntos de roce con la estructura	500 horas	1 Téc. Mecánico	PR-37
22	22B	22B2	No	Correr a falla				
22	22C	22C1	No	Correr a falla				

Fuente: Grupo de trabajo RCM

Anexo C. Plan de mantenimiento actual para el sistema de riego

Componente	Tipo decisión	Tarea	Mano de obra	Horas Hombre
Tanque de agua	Preventivo	Inspeccionar tanque de agua por grietas	1 Téc. Mecánico	1
Tanque de agua	Preventivo	Revisar tornillería de sujeción y resortes sueltos o faltantes en el tanque de agua.	1 Téc. Mecánico	1
Tanque de agua	Preventivo	Instalar o inspeccionar malla en la boca de llenado del tanque de agua. Si no tiene entonces repórtelo.	1 Téc. Mecánico	0,5
Tanque de agua	Preventivo	Remueva la tapa del reservorio de la bomba Mega y limpie la rejilla de succión de la bomba.	1 Téc. Mecánico	1
Bomba de riego	Preventivo	Revisar funcionamiento de la bomba de riego teniendo en cuenta cualquier ruido, verificar si está fugando agua excesivamente, reparar o cambiar si es necesario.	1 Téc. Mecánico	1
Bomba de riego	Búsqueda de falla	Verifique el correcto funcionamiento de los monopuntos de grasa, cambie la batería o dispositivo de ser necesario y realice un test al monopunto antes de instalarlo. Verifique visualmente que el rodamiento este recibiendo grasa (es necesario remover el motor de riego). Si no los tiene realizar engrase a los rodamientos del eje de la bomba centrífuga de riego (Ver anexo #8).	1 Téc. Mecánico	2
Aspersores	Preventivo	Verificar estado y funcionamiento de los diafragmas (spray). Identifique aquellos que presentan fugas, retardo en abrir o cerrar. Realice la prueba accionándolos todos y posteriormente uno a uno.	2 Téc. Mecánicos	2
Aspersores	Reacond/to Cíclico	Repáre aspersores que identificaron fugando por diafragma roto, resorte desajustado, válvula neumática o líneas sueltas. Orientar el aspersor de acuerdo al anexo #7, se requiere configurar los 3 sprays para que el agua salga por la ranura delgada y con el ángulo mostrado en el esquema del anexo. Si es un pm tipo H, esta labor la realiza el TECNICO C	1 Téc. Mecánico	6
Aspersores	Sustitución Cíclica	Cambiar los 3 aspersores de riego por unos reparados, esta pauta es de carácter obligatorio sin importar es estado en que se encuentren los que están instalados.	1 Téc. Mecánico	6
Flauta de riego	Preventivo	Inspeccionar flauta y tubería por grietas.	1 Téc. Mecánico	1
Flauta de riego	Preventivo	Revisar en la parte trasera del camión el área de flautas de riego, deben estar aseguradas, revisar los soportes que sujetan a la tapa trasera del tanque mega y la tornillería de las bridas.	1 Téc. Mecánico	1
Válvula de corte	Preventivo	Inspeccionar funcionamiento de válvula de cierre rápido de 4" y 2"	1 Téc. Mecánico	1
Tanque hidráulico	Mantenimiento a condición	Tomar muestra de aceite hidráulico convertidor. (Enviar al laboratorio de Mobil para su análisis "SOS")	1 Téc. Mecánico	0,5
Tanque hidráulico	Preventivo	Revise el nivel de aceite hidráulico y de dirección, completar si es necesario.	1 Téc. Mecánico	0,5
Tanque hidráulico	Sustitución Cíclica	Cambiar aceite hidráulico.	1 Téc. Mecánico	2
Tanque hidráulico	Preventivo	Cambiar respiradero del sistema hidráulico.	1 Téc. Mecánico	1
Tanque hidráulico	Reacond/to Cíclico	Realizar diálisis al aceite hidráulico, tomar una muestra antes y otra después de la diálisis. (Con excepción del PM H que se cambia el aceite)	1 Téc. Mecánico	2

Anexo C. (Continuación)

Componente	Tipo decisión	Tarea	Mano de obra	Horas Hombre
Bomba Vickers	Preventivo	Inspeccionar visualmente manguera de descarga de la bomba vickers al screen por fugas	1 Téc. Mecánico	1
Bomba Vickers	Preventivo	Inspeccionar visualmente tubo de succión de la bomba vickers por sellos malos o falla en la soldadura de empalme.	1 Téc. Mecánico	1
Bomba Vickers	Preventivo	Verifique que la base del screen de la bomba vickers esté soldada al chasis y los tornillos torquados.	1 Téc. Mecánico	1
Bomba Vickers	Preventivo	Identificar todas aquellas mangueras del sistema hidráulico en mal estado (deben estar marcadas de color rojo) y proceda a reemplazarlas, de igual manera identificar las líneas mal enrutadas y/o rosando (deben estar marcadas con color blanco) y proceda a enrutarlas y/o instalarle sus respectivos sujetadores.	1 Téc. Mecánico	1
Motor h/co	Preventivo	Revisar funcionamiento del motor hidráulico, teniendo en cuenta cualquier ruido, verificar si está fugando aceite, reparar o cambiar si es necesario.	1 Téc. Mecánico	1
Motor h/co	Preventivo	Inspeccionar visualmente mangueras que llegan al motor vickers y en la parte lateral del tanque Mega por roce, falta de grommet / clamps, sellos rotos.	1 Téc. Mecánico	1
Mecanismo de accionamiento	Preventivo	Inspeccionar y lubricar varillaje de accionamiento de riego (Si aplica).	1 Téc. Mecánico	0,5
Mecanismo de accionamiento	Preventivo	Revisar estado y funcionamiento de la rotocámara neumática de accionamiento del sistema de riego.	1 Téc. Mecánico	0,5
Módulo electrónico de control	Preventivo	Para equipos con control electrohidráulico, active el sistema de riego y mida la resistencia en el solenoide de riego, este valor debe ser 6.5 ± 0.4 ohm. Si se encuentra un valor menor revise cableado o cambie el solenoide hasta obtener el valor deseado.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Encender Módulo de Control del sistema Preventor y del sistema de riego. Si no enciende, revise el estado del breaker de protección o la conexión de la alimentación principal. Limpiar Módulo de Control.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Inspeccionar sensor de temperatura de aceite hidráulico.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Verificar funcionamiento de los Switches de Nivel en Tanque de Aceite Hidráulico. Probar conectando cada uno de los switches=CERRADO. Desconecte ambos switches=ABIERTO. Revisar conexión de switches. Limpie conectores.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Verifique los leds indicadores de funcionamiento en el módulo de control. Si no encienden correctamente revise el estado del fusible de protección o la conexión de alimentación principal.	1 Téc. Eléctrico	0,5
Módulo electrónico de control	Búsqueda de falla	En el módulo de riego revise el estado del Cable Serial Interno. Si presenta juego al conectar el Cable de comunicación, reemplácelo. Verifique el cable del Buzzer y el sonido del mismo. Verifique LED Piloto. Simule una alarma. Espere desconexión de acelerador. Verifique que, al presionar el pulsador de OK, se silencia la alarma. Pruebe que al activar el Switch OverRide, se reconecta el acelerador	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Revise el estado del Harness Sensores. Solicite labor de soldadura de BOSS para fijación de Harness en los puntos donde se necesiten y no los haya.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Revise el estado del Harness BYPASS Sensor del Acelerador. Realice la prueba de desconexión de señal de acelerador y el SWITCH Modo de Emergencia.	1 Téc. Eléctrico	1

Anexo C. (Continuación)

Componente	Tipo decisión	Tarea	Mano de obra	Horas Hombre
Módulo electrónico de control	Preventivo	Mida la impedancia de cada Electroválvula, si es menor a 30 OHMS, cámbiela. Reemplace acoples y mangueras de aire que tenga hendiduras o estén dobladas. Verifique que no exista fuga de aire. Verifique que las electroválvulas estén en el orden correcto.	1 Téc. Eléctrico	2
Módulo electrónico de control	Preventivo	Revise el estado del Switch de Filtro Screen, desmóntelo y pruebe su accionamiento. Revise la conexión de este switch. Cambie los conectores y/o el switch de ser necesario. Realice limpieza de los conectores.	1 Téc. Eléctrico	1
Módulo electrónico de control	Preventivo	Revise el estado del Switch de Nivel Tanque de Agua. Desmóntelo y pruebe su funcionamiento afuera. Aplique Teflón líquido. Verifique que no haya fuga. Revise la conexión de este switch. Cambie los conectores y/o el switch de ser necesario. Realice limpieza de los conectores.	1 Téc. Eléctrico	2

Fuente: Departamento de Mantenimiento Equipo Móvil – Drummond.

Anexo D. Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para el sistema de riego

CADA 250 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Tanque de agua	PR-01 PR-02	Preventivo	Inspeccionar que las rejillas de protección del tanque y de la bomba de riego se encuentren instaladas y en buen estado. Realizar limpieza según se requiera	Todos	1 Téc. Mecánico	1 hora	
Bomba de riego	BF-01	Búsqueda de falla	Inspeccionar que las unidades de lubricación automática (monopuntos) funcionen correctamente y dosifiquen la cantidad adecuada de grasa	Todos	1 Téc. Mecánico	1 hora	1 plataforma de trabajo
Bomba de riego	PR-04	Preventivo	Inspeccionar el estado general del prensaestopas y verificar que el goteo es el adecuado. Ajustar según se requiera	Todos	1 Téc. Mecánico	1 hora	1 plataforma de trabajo
Aspersores	PR-08 PR-11	Preventivo	Verificar apertura y cierre normal del aspersor. Revisar que la orientación del aspersor sea correcta e inspeccionar que el anillo esté bien ajustado	Todos	1 Téc. Mecánico	1 hora	
Tanque hidráulico	PR-13	Preventivo	Verificar el nivel de aceite en el tanque y reponer según se requiera	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Bomba Vickers	MC-03	Mantenimiento a condición	Tomar muestra de aceite hidráulico para análisis	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	1 Kit de muestreo
Bomba Vickers	PR-18	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los tornillos del cuerpo de la bomba, verificando que no estén partidos y que se encuentren debidamente ajustados. Inspeccionar por fugas a través del cuerpo	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	1 plataforma de trabajo
Bomba Vickers	PR-14 PR-17	Preventivo	Inspeccionar integridad de las líneas de succión y descarga de la bomba al screen y a la válvula de control. Revisar que el screen se encuentre debidamente anclado y verificar que las líneas del screen no presentan roce ni fuga	Todos	1 Téc. Mecánico	1 hora	
Motor hidráulico	PR-19	Preventivo	Inspeccionar integridad de las mangueras de suministro y retorno de aceite al motor hidráulico. Revisar si se encuentran cristalizadas, con alma de acero expuesta o rozando con otro elemento. Verificar que poseen todos sus clamps de sujeción	Todos	1 Téc. Mecánico	2 horas	
Válvula de control direccional	PR-20 PR-21 PR-22	Preventivo	Inspeccionar estado del cableado y conectores de la válvula de control (serie AGC). Verificar el valor de resistencia en el solenoide de la válvula de control. Valor mínimo: 6.5 ± 0.4 ohm	Todos	1 Téc. Eléctrico	1 hora	1 multímetro digital
Mecanismo de accionamiento	PR-27 PR-28 PR-29	Preventivo	Inspeccionar estado del vástago y horquilla de la rotocámara. Revisar que el pasador de la horquilla no presente holgura excesiva y tenga los cotter pins instalados. Verificar que los tornillos de fijación de la rotocámara se encuentren ajustados	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	

Anexo D. (Continuación)

CADA 250 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Mecanismo de accionamiento	PR-30	Preventivo	Inspeccionar la carrera del varillaje verificando que desplaza completamente el spool de la válvula direccional entre las posiciones HOLD y RAISE	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Mecanismo de accionamiento	PR-26	Preventivo	Lubricar el mecanismo de varillaje de la válvula de control	Todos	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	Grasa Mobilith SHC 100 1 engrasadora manual
Módulo Electrónico de control	PR-31 PR-32 PR-33	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado de las electroválvulas neumáticas. Revisar enrutamiento correcto, estado y limpieza de los conectores. Medir la impedancia de los solenoides y verificar que sea igual o superior a 30 Ohms	Todos	1 Téc. Eléctrico	2 horas	1 Multímetro digital
Módulo Electrónico de control	PR-34	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado de la señal del alternador al módulo. Revisar enrutamiento correcto, estado y limpieza de los conectores	Todos	1 Téc. Eléctrico	1 hora	
Módulo Electrónico de control	PR-35	Preventivo	Inspeccionar la integridad del cableado de los sensores de presión, temperatura, restricción del screen y nivel de aceite. Revisar enrutamiento correcto, estado y limpieza de los conectores	Todos	1 Téc. Eléctrico	2 horas	
Módulo Electrónico de control	PR-36 BF-01	Preventivo	Realizar prueba de funcionamiento del switch de nivel de agua. Revisar el estado y limpieza del mecanismo	Todos	1 Téc. Eléctrico	1 horas	1 plataforma de trabajo
Módulo Electrónico de control	BF-04	Búsqueda de falla	Simular una condición de alarma y verificar que el buzzer emite la alerta audible y que el led piloto del módulo se enciende	Todos	1 Téc. Eléctrico	1 hora	
CADA 500 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Bomba de riego	PR-05	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los tornillos de la carcasa y de la base y verificar que estén ajustados	X	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Bomba de riego	MC-01	Mantenimiento a condición	Realizar inspección termográfica a los rodamientos	B, F, D, H	2 Téc. Mecánicos	1 hora	1 cámara termográfica 1 plataforma de trabajo
Aspersores	PR-07 PR-10	Preventivo	Verificar que la válvula se encuentra orientada hacia abajo para evitar acumulación de impurezas. Inspeccionar que el orificio no esté obstruido y que realiza la descarga con normalidad. Revisar que no tenga fugas	B, F, D, H	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Aspersores	PR-09	Preventivo	Inspeccionar estado de las mangueras de suministro de aire en toda su longitud, verificar que no esté cristalizada y que no presentan fuga.	B, F, D, H	1 Téc. Mecánico	1 hora	
Bomba Vickers	PR-16	Preventivo	Inspeccionar el screen de descarga de la bomba Vickers por presencia de partículas contaminantes	B, F, D, H	1 Téc. Mecánico	1.5 horas	
Motor hidráulico	PR-06	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los tornillos de fijación del motor, verificando que se encuentren ajustados	X	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	

Anexo D. (Continuación)

CADA 500 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Mecanismo de accionamiento	PR-23	Preventivo	Inspeccionar estado de la línea de suministro de aire a la rotocámara en toda su longitud, verificar que no esté cristalizada y que no presentan fuga	B, F, D, H	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Mecanismo de accionamiento	PR-24 PR-25	Preventivo	Inspeccionar estado de la válvula de descarga rápida: verificar que se encuentre orientada con la descarga hacia abajo para evitar la acumulación de impurezas, revisar que realiza la descarga correctamente y verificar que no presenta fugas por los conectores	B, F, D, H	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
CADA 1000 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Bomba de riego	PR-03	Preventivo	Inspeccionar el estado de las estrías del eje de la bomba y acople	D, H	1 Téc. Mecánico	1 hora	1 Plataforma de trabajo
Bomba de riego	RC-01	Reacond/to Cíclico	Realizar el cambio y ajuste de la empaquetadura de la bomba	D, H	1 Téc. Mecánico	2 horas	1 Plataforma de trabajo 70 cm de cordón trenzado
Flauta de riego	PR-12	Preventivo	Inspeccionar la integridad de los soportes de la flauta y verificar que la tornillería se encuentre ajustada	D, H	1 Téc. Mecánico	0.5 horas	
Bomba Vickers	MC-02	Mantenimiento a condición	Realizar prueba de medición de caudal de la bomba para determinar la pérdida de eficiencia, verificando que no supere el 15%	D, H	2 Téc. Mecánicos	2 horas	1 medidor de flujo Flotech 1 set de mangueras de conexión
Motor hidráulico	PR-03	Preventivo	Inspeccionar estado de las estrías del eje del motor y del acople. Verificar que el sello del eje se encuentra en buen estado y no presenta fuga	D, H	1 Téc. Mecánico	1 hora	1 plataforma de trabajo
CADA 2000 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Aspersores	SC-02	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de los aspersores	H	1 Téc. Mecánico	3 horas	3 aspersores P/S 16153
Tanque hidráulico	SC-03	Reacond/to Cíclico	Cambiar sellos y rodamientos del mecanismo de accionamiento	H	1 Téc. Mecánico	3 horas	1 sello de labio ref. 3J-4407 1 gasket ref. 4J-8245 2 rodamientos 7F-7983
Tanque hidráulico	SC-04	Reacond/to Cíclico	Cambiar sellos de las mangueras que llegan al tanque hidráulico	H	1 Téc. Mecánico	2 horas	
Bomba Vickers	PR-15	Preventivo	Realizar inspección y limpieza del screen de succión de la bomba, verificar presencia de partículas	H	1 Téc. Mecánico	3 horas	
Motor hidráulico	SC-06	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de sellos de las líneas de presión y retorno de aceite del motor h/co	D	1 Téc. Mecánico	3 horas	1 plataforma de trabajo
Válvula de alivio	BF-03	Búsqueda de falla	Realizar prueba de la válvula y medición de presión de alivio del sistema	D	2 Téc. Mecánicos	1 hora	1 set de manómetros

Anexo D. (Continuación)

CADA 4000 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Bomba de riego	SC-01	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de la bomba de riego	H	2 Téc. Mecánicos	12 horas	1 bomba P/S 16204 1 gasket P/S 17180 1 coupling P/S 16206 12 tornillos P/S 11434 2 tuercas P/S 19176 24 arandelas P/S 21089 1 Grúa 1 plataforma de trabajo
Bomba Vickers	SC-05	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de bomba hidráulica Vickers	H	2 Téc. Mecánicos	12 horas	1 bomba P/S 88315 4 tornillos P/S 111890 1 Grúa
CADA 8000 HORAS							
Componente	Cód. Tarea	Tipo de decisión	Descripción de la tarea	TIPO PM	Mano de obra	Tiempo	Recursos
Mecanismo de accionamiento	SC-08	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de rotocámara	D	1 Téc. Mecánico	2 horas	1 Rotocámara P/S 15514
Motor hidráulico	SC-07	Sustitución cíclica	Realizar el cambio de motor hidráulico	D	2 Téc. Mecánicos	3 horas	1 motor P/S 16218 4 tornillos P/S 14016 4 arandelas P/S 21092 1 plataforma de trabajo

Fuente: Grupo de trabajo RCM