

Implementation of reliability-centered maintenance (RCM) to improve the availability of CL120 Freightliner tractors in J&J Transportes y Soluciones Integrales Inc.

Richard J. Ordoñez Gamarra¹, Sol Rodríguez² and Eduardo Yupanqui²

¹ Facultad de ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, n00117810@upn.pe

² Departamento Académico de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, sol.rodriguez@upn.edu.pe

² Departamento Académico de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, eduardo.yupanqui@upn.edu.pe

Abstract— The main objective of this work is to implement reliability-centered maintenance (RCM) to improve the availability of the CL 120 Freightliner tractors of J & J Transportes y Soluciones Integrales Inc., assessing the performance from 2020 to 2022. The investigation was carried out in the maintenance area of the company, which oversees a fleet of ten tractors. As a first step, the company's situation in the 2019-2020 period was evaluated using maintenance indicators such as MTBF (mean time between failures), MTTR (mean time to respond), availability and critical failures. The information was collected through a documentary analysis. With this baseline, corrective and preventive actions were established. The implementation of the RCM methodology allowed significant improvement in the maintenance management system. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was implemented to identify the critical points of the most frequent failures. With this, the MTBF indicator showed an increase from 16.81 (year 2019) to 35.16 hours (year 2022), and the MTTR indicator was reduced from 3.91 (year 2019) to 2.69 hours (year 2022). Additionally, the implementation of RCM improves the operational availability of tractors by up to 93%. Finally, it is concluded that the availability of tractor trucks improves significantly with the application of RCM, impacting technically and economically, achieving a higher number of services attended.

Keywords— Reliability-centered maintenance, RCM, availability, failure mode and effect analysis, tractors

Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los tractocamiones CL120 Freightliner en la empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C.

Richard J. Ordoñez Gamarra¹, Sol Rodríguez² and Eduardo Yupanqui²

¹ Facultad de ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, n00117810@upn.pe

² Departamento Académico de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, sol.rodriguez@upn.edu.pe

² Departamento Académico de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, eduardo.yupanqui@upn.edu.pe

Resumen—El objetivo principal del presente trabajo es implementar el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los tractocamiones CL 120 Freightliner de la empresa J & J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C., evaluando el periodo comprendido entre los años 2020 - 2022. La investigación se realizó en el área de mantenimiento de la empresa, quien tiene a cargo una flota de 10 tractocamiones de la marca Freightliner. Como primer paso, se evaluó la situación de la empresa en el periodo 2019-2020 mediante indicadores de mantenimiento tales como MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio entre reparaciones), disponibilidad y fallas críticas. Dicha información fue recolectada mediante un análisis documental. Con esta línea base, se establecieron acciones correctivas y preventivas. La implementación de la metodología RCM, permitió obtener mejora significativa en el sistema de gestión de mantenimiento. Se implementó el Análisis de Modal de Fallas y Efetos (AMEF) con el fin de identificar los puntos críticos de las fallas más frecuentes. Con ello, el indicador MTBF obtuvo un aumento de 16.81 (año 2019) a 35.16 horas (año 2022), y el indicador MTTR se redujo de 3.91 (año 2019) a 2.69 horas (año 2022). Adicionalmente, la implementación del RCM, mejora la disponibilidad operativa de los tractocamiones hasta un 93%. Finalmente, se concluye que la disponibilidad de los tractocamiones mejora significativamente con la aplicación de RCM, impactando técnica y económicamente dado que se pueden atender mayor cantidad de servicios.

Palabras claves—Mantenimiento centrado en la confiabilidad, RCM, disponibilidad, análisis modal de fallas, tractocamiones.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la creciente demanda mundial de productos y servicios obliga a las diversas industrias a mantenerse en condiciones óptimas con el fin de cumplir con las expectativas de los clientes y maximizar los beneficios. Como parte de ello, las industrias requieren que sus áreas de mantenimiento logren que los activos fijos de una planta o empresa trabajen en condiciones óptimas. Como resultado, se logra un trabajo de calidad que permite mantener un proceso confiable y competente, con productos y servicios adecuados [1, 2]. El mantenimiento de los sistemas de producción es un área de suma importancia debido a que debe ser capaz de identificar

problemas y/o predecir que fallas podrían presentarse [3]. Como se mencionó, el mantenimiento asegura que las funciones del sistema productivo se mantengan con la menor perturbación posible. Gracias a los estudios relacionados a los modelos de gestión de mantenimiento, las empresas han demostrado gestiones efectivas y eficientes. Según los distintos mantenimientos (predictivos, preventivos y correctivos), se han implementado diversos modelos reportados en la literatura. Por ejemplo, el Mantenimiento Productivo Total (TPM) engloba herramientas para distintos mantenimientos [4]; mientras el mantenimiento basado en condición (CBM) se enfoca en el mantenimiento predictivo (según periodicidad de inspección y monitoreo) [5, 6]. Otra estrategia es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), que es un método del mantenimiento correctivo enfocado en la funcionalidad de los equipos.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un proceso sistemático de ingeniería que permite determinar los criterios de mantenimiento preventivo y optimizar el sistema de mantenimiento [7]. De acuerdo a Moulbray (citado por [8]) es un “proceso usado para determinar qué es lo que se debe hacer para asegurar que cualquier componente físico continúe cumpliendo su función en el presente contexto de operaciones”. Ello implica que el objetivo principal de esta metodología es preservar las funciones de todo un sistema. Para ello, diversos autores explican que el análisis RCM se basa en: análisis de las funciones del sistema, fallas de las funciones y priorización de riesgos [9]. Con el análisis, las industrias pueden desarrollar estrategias de mantenimiento preventivo. Al día de hoy, el modelo RCM, es una herramienta fundamental para cualquier organización dado que prolonga de la vida útil de los activos donde se ejecute [10].

Los conceptos de RCM han sido aplicados exitosamente en múltiples industrias con el fin de preservar las funciones en una industria. Principalmente, se resalta que su aplicación reduce acciones de mantenimiento preventivo innecesarias y su aplicación permite la elaboración de planes de mantenimiento eficientes y sistemáticos. Ello se traduce en programas de mantenimientos óptimos para equipos y plantas. Como parte de la implementación del RCM, es necesario aplicar una fase de “Planificación”, donde se aplican ciertas herramientas de diagnóstico como el análisis de causa-efecto, así como herramientas de análisis como el AMFE (análisis

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

modal de fallos y efectos) [11, 12]. Con ello se pasa a la fase de “Análisis y diseño” que involucra al mantenimiento planificado [1]. Finalmente, se llega a la tercera fase “Ejecución” donde se integra el mantenimiento autónomo, gestión temprana de equipos y capacitaciones [13].

Diversos ejemplos de aplicación se han reportado en literatura previa. Fang et al. [14] aplicaron la metodología RCM dentro de la estrategia de mantenimiento para un sistema de puertas del metro. Inicialmente, se identifican los subsistemas y componentes del sistema de puertas. Luego se propone un método AMFEC (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad) para definir el grado de peligro de 10 modos de falla de 5 componentes con una alta tasa de falla para realizar un análisis de confiabilidad. Finalmente, la estrategia de mantenimiento centrada en la confiabilidad se elabora después de la decisión del modo de mantenimiento y el cálculo del ciclo de intervalo de mantenimiento. Singgih et al. [12] aplicaron la metodología RCM a una planta de generación eléctrica. El análisis modal de fallas (AMFE) sirvió para identificar y clasificar las fallas del sistema bajo la condición de trabajo; y consecuentemente se diseñó un flujo de trabajo con actividades mejoradas para casos específicos. Eriksen et al. [8] implementaron y evaluaron la aplicabilidad del método de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en las necesidades de mantenimiento y los problemas de confiabilidad en buques de carga no tripulados. El análisis mostró que el método RCM es generalmente aplicable a cuestiones de confiabilidad y mantenimiento en barcos no tripulados, pero también existen limitaciones importantes puesto que el método RCM carece de un proceso sistemático para evaluar los efectos de las medidas de mantenimiento preventivo versus correctivo. Silva et al. [10] combinaron el mantenimiento centrado en la confiabilidad con la gestión de riesgos (denominado RCM3) para mejorar la gestión del mantenimiento de sistemas de refrigeración en vehículos militares blindados. Tras el estudio, se realizó un nuevo plan de mantenimiento capaz de reducir el riesgo asociado con los modos de falla del sistema. En todos los casos, se distinguen 3 fases en la implementación RCM: análisis pre-implementación (análisis de fallas recurrentes, clasificación de fallas), diseño y planificación de la estrategia, e implementación y validación. Estas fases se apoyan en otras metodologías asociadas a la mejora continua, por lo que la implementación es un proceso de correcciones y perfeccionamiento constante [3, 15].

La empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C. (RUC 20524879191) se especializa en servicios de transporte de carga pesada, sobredimensionada, refrigerada, materiales peligrosos y paletizada a nivel nacional. La flota de la empresa se compone por 10 tractocamiones CL120 Freightliner. Dentro de los principales clientes privados están Productos Paraíso del Perú, Compañía Nacional de Chocolates de Perú S.A., Cartavio Rum Company S.A.C., Fosforera Peruana S.A., Pernord Ricard Perú S.A.; asimismo, se atienden distintas organizaciones públicas como la ONPE, el INDECI, AGRORURAL, el MINEM, el MINEDU y el SIMA. En el año 2019, se evidenció que el área de operaciones de la

empresa recibía quejas de los incumplimientos de las fechas de entregas y las citas de carga, perjudicando económicamente a la empresa con penalidades. Por otro lado, se evidenció incumplimiento en la meta de la disponibilidad de la flota. Tras un reporte inicial, se obtuvo un promedio anual de disponibilidad del 81%, siendo 90% la meta mínima estipulada por gerencia. Los primeros análisis mostraron que diversos factores como la falta de formatos de mantenimiento para una correcta gestión y la falta de procedimientos estandarizados, que generaba una distribución incorrecta de tareas en las áreas de mantenimiento. Por ello, el objetivo del trabajo de investigación es implementar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para incrementar la disponibilidad de los tractocamiones FREIGHTLINER CL 120 de la empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C.

II. METODOLOGÍA

A. Evaluación de la situación del área de mantenimiento

La evaluación del área de mantenimiento y situación de la flota de tractocamiones se realizó evaluando los indicadores del año 2019. Los indicadores evaluados fueron el tiempo medio entre fallas (MTBF) [16], tiempo medio entre reparaciones (MTTR) [17] y la disponibilidad [17]. Dichos indicadores se visualizan en las Ec. (1), Ec. (2) y Ec. (3) respectivamente.

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total Disponible} - \text{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\text{Numero de fallas}} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\text{Numero de fallas}} \quad (2)$$

$$\text{Disponibilidad}(\%) = \frac{\text{Horas disponibles}}{\text{Horas Planificadas}} \times 100\% = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (3)$$

El MTBF es un indicador de confiabilidad porque para ejecutar este indicador se requiere de un histórico de fallas generadas de un determinado tiempo para obtener un porcentaje de confiabilidad. Es el tiempo promedio de medición entre fallos de un sistema lo cual permite calcular el MTBF [16]. El MTTR es un indicador de mantenibilidad y para obtener el cálculo de MTTR se requiere tener una data histórica documentada determinando los tiempos y periodos de la falla [17]. Por otro lado, la disponibilidad de un equipo está ligado a la seguridad, dado que se tiene que tener las unidades o equipos en óptimas condiciones, por lo que se busca contar con la fiabilidad de mantener equipos operativos [3].

Los datos sobre tiempo disponible, tiempo de mantenimiento, horas disponibles, horas planificadas y números de fallas fueron obtenidos a partir de los reportes generados entre enero y diciembre del año 2019. La meta establecida por la gerencia de la empresa es de 90% para el mantenimiento. Tras la recopilación de información se realizó un análisis de causa-efecto y un diagrama de Pareto para identificar los principales puntos de mejora. Adicionalmente,

para analizar a profundidad todas las causas, se realizó una encuesta dirigida a las cuatro (04) personas que laboran en empresa, responsables de jefaturas para la identificación de la baja disponibilidad de equipos. Se trabajaron 18 preguntas

relacionadas a las principales causas, valorizando con 10 a una causa de muy importante y 0 a una causa de menos importante. Todos los datos se recopilaron y se analizaron empleando el programa Microsoft Excel 2010.

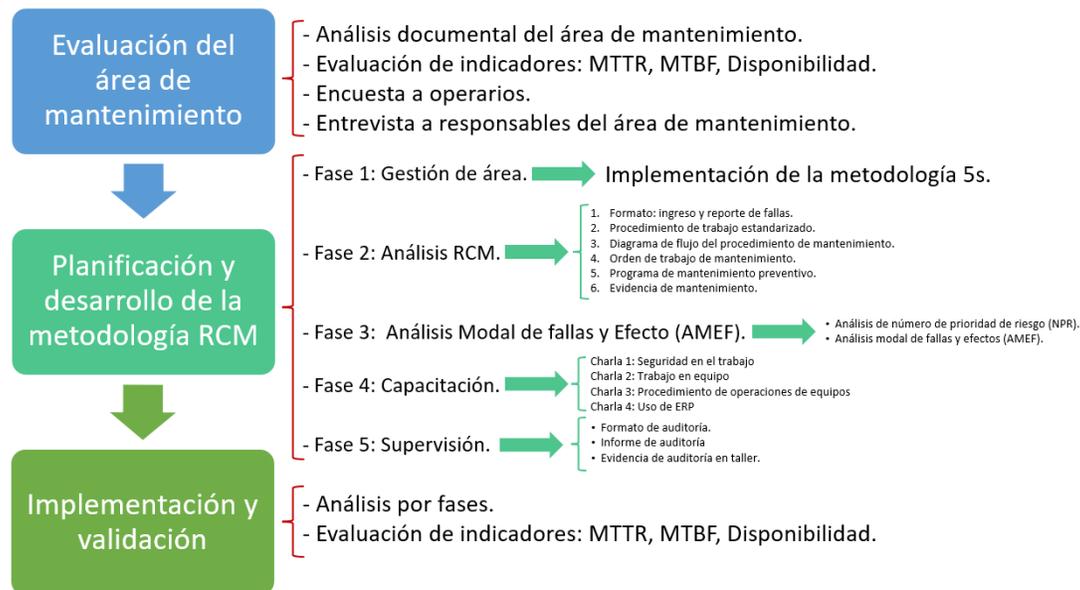


Fig. 1. Esquema de implementación de RCM aplicado al área de mantenimiento de la empresa J & J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C.

B. Planificación de la metodología RCM

Para finales del año 2022, se proyecta aumentar la disponibilidad de los tractocamiones Freightliner CL 120 mediante la implementación de la metodología RCM. La disponibilidad operativa de la flota puede verse afectada por una variedad de factores, y para determinar el contexto inicial que influye en esta disponibilidad, es necesario llevar a cabo un análisis en el año 2022. Adicional a ello, se determinaron las fallas críticas de los tractocamiones Freightliner CL 120 en el año 2022. Finalmente, se consiguió establecer las actividades correctivas y preventivas para aumentar la disponibilidad de los tractocamiones Freightliner CL 120.

La etapa de planificación se realizó en cinco fases:

- Fase 1: Gestión de área. Para una correcta implementación se busca identificar materiales para organizar y limpiar toda el área de mantenimiento. Los trabajos de clasificación de herramientas e inventarios se realizaron en fechas finales del mes saliente.
- Fase 2: Análisis RCM. En esta fase se incorporaron diferentes formatos para llevar a cabo el análisis respectivo de la flota.
- Fase 3: Análisis Modal de fallas y Efecto (AMEF). En esta fase se inicia la metodología de análisis comenzando con fichas de estudio como los números de prioridad de riesgo (NPR), hoja de decisión y el AMEF para su análisis respectivo.
- Fase 4: Capacitación. Se realizaron diversas charlas durante todo el tiempo de la implementación.

- Fase 5: Supervisión: Los formatos de supervisión se aplicaron en los dos primeros meses de la implementación. Los formatos de los sistemas de control en el mes 3 y el mes 4. La programación de auditorías se llevó a cabo cada 2 meses y, por último, la mejora continua se dio en las últimas 3 semanas. En la Fig. 1 se presenta el resumen de las actividades a desarrollar en la investigación.

C. Evaluación posterior a la implementación de la metodología RCM

Posterior a la etapa inicial, se planifica e implementa la metodología RCM con la finalidad de generar cambios permanentes y beneficios para la empresa. Esta implementación se realizó por un periodo de 6 meses iniciando en enero 2020. Posteriormente, se realizó un seguimiento por un periodo de 2 años. Durante este periodo, se realizó el seguimiento de los indicadores MTBF, MTTR y Disponibilidad.

III. RESULTADOS

A. Análisis de la situación del área de mantenimiento previa a la implementación de RCM

Como primer paso, se realizó un estudio de la situación del área de mantenimiento previo a la implementación RCM. Para ello, se analizó la data relacionada a la flota de tractocamiones del año 2019, como se muestra en la tabla 1. En dicha tabla se ha recopilado la información sobre horas en mantenimiento, horas en operación y número de paradas. En

base a ello se calcularon los valores de MTBF, MTTR y disponibilidad, como se aprecia en la Fig. 2.

Tabla 1. Análisis inicial de horas de operación y horas de mantenimiento en el periodo inicial 2019.

| Meses | Horas en operación | Horas en mantenimiento | N° Paradas |
|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| Enero | 372 | 87 | 18 |
| Febrero | 336 | 87 | 18 |
| Marzo | 372 | 53.3 | 17 |
| Abril | 360 | 83 | 20 |
| Mayo | 372 | 69 | 20 |
| Junio | 360 | 115 | 38 |
| Julio | 372 | 131 | 35 |
| Agosto | 372 | 73.3 | 27 |
| Setiembre | 360 | 110 | 27 |
| Octubre | 372 | 89 | 21 |
| Noviembre | 360 | 91 | 21 |
| Diciembre | 372 | 74.3 | 17 |

El análisis del MTBF (Fig. 2a) en el periodo inicial 2019 se halla un promedio de 16.81 horas anual que tiene una tendencia a disminuir. Las unidades han presentado fallas comunes tales como focos quemados, fuga de aire por niple, falla de motor elevallunas, entre otros. Estas reparaciones no se daban como debería de ser, ya que solo se realizaba soluciones momentáneas por consiguiente las unidades retornaban a taller con la misma falla. Alavedra et al. [17] mencionan que el indicador MTBF debe ser elevado, pues se debe de aminorar la frecuencia de fallas.

En la Fig. 2b, se observa que durante todo el año 2019 los valores de MTTR se han mantenido con una tendencia lineal, con un promedio de 3.91 horas. Estos tiempos entre reparaciones se consideran altos y se deben principalmente a la falta de disponibilidad de repuestos, de personal, herramientas inadecuadas y demoras en las aprobaciones para la compra de repuestos. Un valor elevado MTTR tiene como significado que se invierte demasiadas horas en reparar una falla y un número inferior de MTTR significa que no se está haciendo los trabajos como debería de ser.

En la Fig. 2c se muestra que la disponibilidad de los equipos durante el 2019, y en rojo se muestra la meta de disponibilidad estipulada por la gerencia, que es de 90%. La disponibilidad en el mes de julio alcanzo un valor de 64.8%, un valor bajo, lo que significa que se tuvo más unidades en taller con fallas detectadas. Al mismo tiempo, en el mes de marzo se logró un valor de 85.7%, un valor alto, el cual indica que se dedicó más tiempo para la ejecución al servicio debido a la alta demanda con los clientes. En resumen, la empresa tuvo una disponibilidad considerablemente baja en las unidades por reparaciones mecánicas y/o eléctricos lo cual ha presentado consecuencias económicas por incumplimientos de servicios, es decir, penalidades. Por ejemplo, en el periodo 2019 se presentaron penalidades en los trabajos realizados con entidades del estado tales como CUNAMAS, INDECI,

MINEDU entre otros, debido al incumplimiento de fechas de citas de carga.

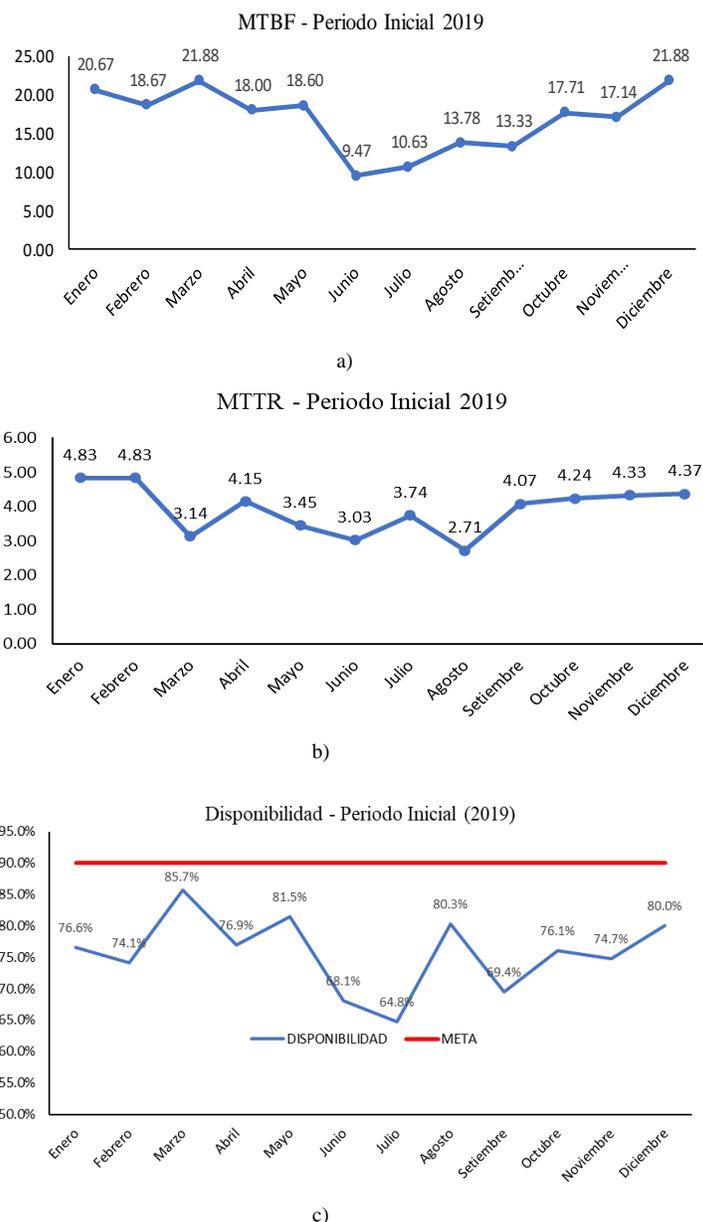


Fig. 2. Variación de los valores de a) MTBF, b) MTTR y c) disponibilidad durante los meses del año 2019 en base al análisis documental.

Luego del análisis de indicadores del año 2019, en una reunión conjunta con el área de operaciones, se aplicó la herramienta de lluvia de ideas para identificar las falencias del área de mantenimiento en el año 2019, este análisis permitió comprender, a través de comentarios, la problemática utilizando el diagrama de causa-efecto para definir la problemática principal y la causa de los principales problemas. Ello se muestra en la Fig. 3 y se reconocieron 18 causas posibles.

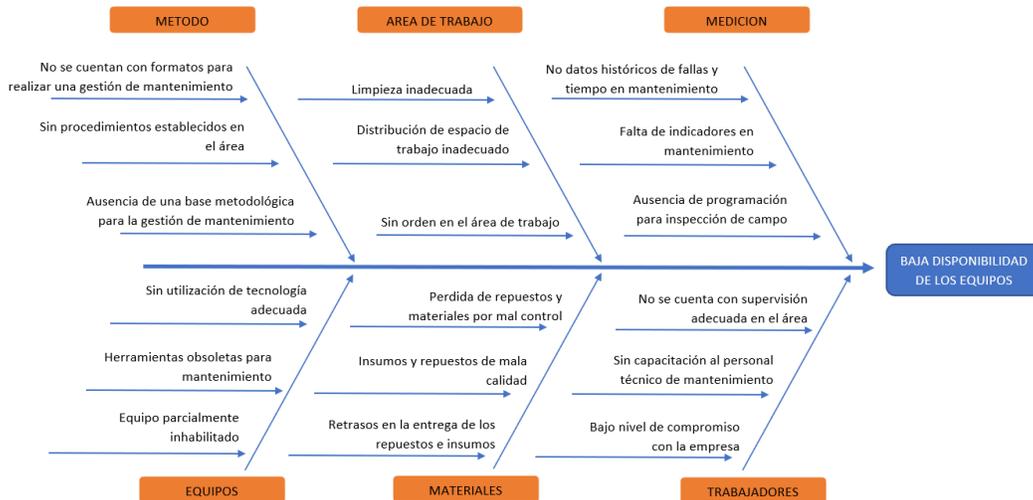


Fig. 3. Diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

Para analizar a profundidad todas las causas, se realizó una encuesta dirigida a cuatro personas que laboran en empresa, responsables de jefaturas para la identificación de la baja disponibilidad de equipos. En la Tabla 2, se muestra las causas y/o factores que influyen en la baja disponibilidad. Para cada causa se buscaron los criterios que originarían los problemas, los cuales fueron:

C1: Equipos y maquinarias de diagnóstico no actualizados.

C2: Equipos parcialmente inhabilitados.

C3: Mala gestión del almacén.

C4: Ausencia de capacitaciones.

Se trabajó con una escala de 0 a 10, siendo 10 la calificación que indica mayor relación, y 0 para un criterio con menor relación.

Se obtuvo que la causa con mayor puntaje es la ausencia de una base metodológica con 39 puntos y el 17% del total, en segundo lugar, de las causas es la falta procedimiento establecidos con 37 puntos y 16% de frecuencia relativa, seguido a esto como tercer lugar se encuentra la falta de datos históricos de fallas ni tiempos de mantenimiento con 34 puntos y 15% del total, como cuarto lugar se ubica la escasez de indicadores en mantenimiento con 34 puntos y 15% del total, como quinto lugar se ubica no se cuenta con formato para realizar una gestión de mantenimiento con 28 puntos y 12% frecuencia relativa. A partir de la sexta causa hacia adelante los valores alcanzan el menor impacto como pérdida de material por mal control (12 puntos), ausencia de programación para inspección de campo (13 puntos), retrasos en la entrega de los repuestos e insumos (9 puntos), sin utilización de tecnología adecuada (10 puntos). Se realizó un diagrama de Pareto (Fig. 4) para obtener una mayor visualización por lo descrito. Se visualiza que el 15% de las causas explica el 74% de la problemática. Los factores con mayor influencia en la problemática del bajo nivel de disponibilidad son: la falta de una metodología de trabajo, la ausencia de una base metodológica sin procedimientos

establecidos, la falta de registro datos históricos de fallas y tiempos de mantenimientos, ausencia de indicadores en mantenimiento y la falta de formatos para realizar una gestión de mantenimiento.

Tabla 2. Principales causas y valoraciones de causas según los expertos.

| | Descripción de las causas | C1 | C2 | C3 | C4 | Punt. | Frecuencia Relativa | Frecuencia Acumulada |
|----|---|----|----|----|----|------------|---------------------|----------------------|
| 1 | Ausencia de una base metodologica para la gestion de mantenimiento | 10 | 10 | 9 | 10 | 39 | 16.7% | 17% |
| 2 | Sin procedimientos establecidos | 9 | 10 | 8 | 10 | 37 | 15.9% | 33% |
| 3 | No datos historicos de fallas ni tiempos de mantenimientos | 9 | 8 | 8 | 9 | 34 | 14.6% | 47% |
| 4 | Falta de indicadores en mantenimiento | 9 | 9 | 8 | 8 | 34 | 14.6% | 62% |
| 5 | No se cuenta con formato para realizar una gestion de mantenimiento | 6 | 7 | 8 | 7 | 28 | 12.0% | 74% |
| 6 | Pérdida de materiales por mal control | 4 | 4 | 2 | 2 | 12 | 5.2% | 79% |
| 7 | Ausencia de programación para inspección de campo | 3 | 4 | 3 | 3 | 13 | 5.6% | 85% |
| 8 | Retrasos en la entrega de los repuestos e | 3 | 2 | 2 | 2 | 9 | 3.9% | 88% |
| 9 | Sin utilización de tecnología adecuada | 3 | 2 | 3 | 2 | 10 | 4.3% | 93% |
| 10 | Insumos y repuestos de mala calidad | 2 | 2 | 1 | 2 | 7 | 3.0% | 96% |
| 11 | No se cuenta con supervisión adecuada en el | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 1.3% | 97% |
| 12 | Sin capacitación técnica al personal de mantenimiento | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.9% | 98% |
| 13 | Limpieza inadecuada | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0.9% | 99% |
| 14 | Bajo nivel de compromiso con la empresa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0% | 99% |
| 15 | Herramientas obsoletas para mantenimiento | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0.4% | 99% |
| 16 | Equipos parcialmente inhabilitados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0% | 99% |
| 17 | Distribución de espacio inadecuado | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.4% | 100% |
| 18 | Sin orden en el área de trabajo | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.4% | 100% |
| | Total | | | | | 233 | | 100% |

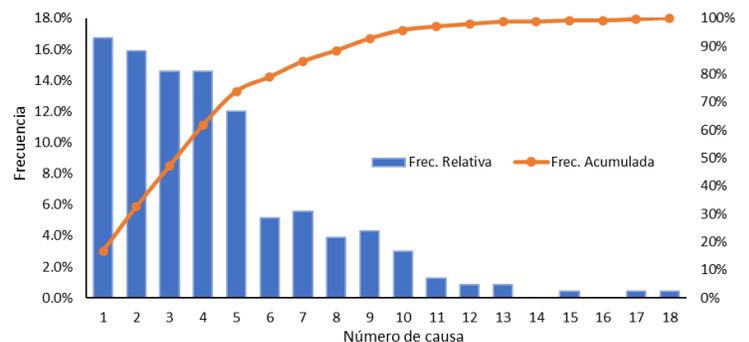


Fig. 4. Diagrama de Pareto.

B. Planificación y desarrollo de la metodología RCM.

1. Planificación de la metodología

La planificación se realizó de acuerdo con las 5 fases descritas previamente:

- Fase 1: Gestión de área. - Básicamente se enfoca en la identificar los elementos, la planificación de la limpieza, la optimización del proceso de ingreso de repuestos y accesorios, y la verificación de mejoras en el orden y la limpieza en un entorno de trabajo o producción. Estas actividades se realizan bajo el enfoque de la metodología 5s. En la tabla 3, se muestra el formato de control de orden en el área el cual se considera responsable de las 5S dentro del taller de mantenimiento, en la siguiente lista permitirá validar si el área de mantenimiento se encuentra en óptimas condiciones, para empezar, se valida si existen materiales, piezas, maquinas o equipos innecesarios, en segunda etapa de las 5S se valida la organización del área si se realiza correctamente. La tercera etapa de las 5S consta en revisar si el área de trabajo se encuentra limpia; luego se supervisará si el trabajo estandarizado está publicado además de la realización del control de documentos. Finalmente se constata que se cumplan los objetivos y procesos establecidos.

Tabla 3. Formato de control de orden en el área de mantenimiento.

| | | | |
|--|---|-----------------|----|
| Area: | Taller mecanico | Autorizado por: | |
| Fecha: | | | |
| Formato de control de orden en el area | | | |
| 5S | Descripcion | SI | NO |
| Seiri (Seleccionar) | Existen materiale o piezas innecesarias | | |
| | Exiten maquinas o equipos innecesarios | | |
| | Existen herramientas innecesarias | | |
| Seiton (Organizar) | Equipos e insumos bien ubicados | | |
| | Ubicación claramente identificada | | |
| | Material defectuoso esta bien etiquetado | | |
| Seiso (Limpiar) | Comunicación visual bien establecida | | |
| | Pisos y superficies de trabajo limpio | | |
| | Desperdicios y basura reciclable en su lugar | | |
| Seiketsu (Estandarizar) | Ambiente de trabajo bueno | | |
| | Hojas con datos de seguridad de los materiales | | |
| | Exintores y elementos de seguridad funcionando | | |
| Shitsuke (Seguimiento) | Entrenamiento en labores RCP | | |
| | El trabajo estandar esta publicado | | |
| | Procedimientos para limpieza y seguridad publicados | | |
| | Correcto control de documentacion | | |
| | Reuniones semanales | | |

- Fase 2: Análisis RCM. - En esta fase, se implementa los reportes de fallas, procedimientos de trabajos u otros análisis requeridos para realizar una correcta gestión de mantenimiento de manera eficiente. Por otro lado, se presenta el formato la hoja de decisión RCM, el cual se describe la referencia de la

información, la evaluación de consecuencias, posible solución a la tarea propuesta y el tiempo de intervalo inicial según análisis por cada unidad (TR). El resumen del procedimiento se muestra en la Tabla 4. Por ejemplo, el TR-2 cuenta con una frecuencia alta y como referencia está en fallas ocultas. Por lo que se plantea realizar el mantenimiento al sistema eléctrico en un rango de 5 días. También, se observa el activo TR-4 señala una frecuencia media para fallos, el cual también es considerado fallos ocultos y operacionales y se plantea implementar el cambio de suspensión en 3 meses, cada tarea es ejecutada el personal responsable de mantenimiento.

Tabla 4. Implementación del análisis RCM.

| | |
|--|---|
| 1. Formato: Ingreso y Reporte de fallas | •Se consigna los datos de la unidad tales como placa, conductor, kilometraje; asimismo se coloca la fecha del ingreso de la unidad luego de finalizar un servicio, además se detalla el reporte de las fallas mecánicas y/o eléctricas comunicadas por el conductor. |
| 2. Formato: Procedimiento de trabajo estandarizado. | •Comprende los procedimientos que vienen a ser los trabajos estandarizados, determinar de los componentes uso de herramientas para la implementación, beneficios de la estandarización y las auditorias. |
| 3. Formato: Diagrama de flujo del procedimiento de mantenimiento | •Este diagrama se inicia con el check-list de la unidad a recepcionar, seguidamente se evalúa la unidad según kilometraje para realizar los trabajos correspondientes preventivos o correctivos. Si no cuenta con trabajos programados según kilometraje, ingresará la unidad para realizar análisis de fallas indicadas por el conductor. Se realizan los trabajos de mantenimiento, esto incluyen reparaciones, ajustes, lubricación e inspecciones visuales para asegurar los trabajos a realizar. A su vez con todos los trabajos a realizar se hacen los formatos respectivos correspondientes al mantenimiento. Finalmente se solicita una prueba de la unidad. |
| 4. Formato: Orden de trabajo de mantenimiento (OT) | •Este indica el número de recepción del trabajo para realizar, hora y día de ingreso, hora y día de salida, placa de tracto camión, modelo de tracto camión, área de trabajo correspondiente, lugar de trabajo, responsable de la orden de trabajo, responsable del trabajo también incluye fallas mecánicas y posibles causas, el sistema a trabajar, detalle general del trabajo realizado. |
| 5. Formato: Programa de mantenimiento preventivo para un año | •El mantenimiento preventivo se ejecuta cada 15,000 km, mantenimiento transmisión se ejecuta cada 60,000 km, mantenimiento sistema eléctrico cada 12,000 km esto se da por alcance por manual de fabricante y con ayuda del análisis de modo y fallas. |
| 6. Evidencia de mantenimientos de tracto camiones | •Registro fotográfico de los trabajos realizados. |

- Fase 3: Análisis AMEF. - En esta tercera fase, se llevó a cabo el análisis modal de fallas y efectos, donde se identifican las fallas más significativas en un diagrama de Pareto; asimismo, se desarrolló un análisis de prioridad de riesgos para elaborar la matriz AMEF. Del análisis de Pareto, para el año 2019, se visualiza que las fallas del sistema eléctrico tuvieron 352 horas de fallas, lo que representa el porcentaje de 33% del total de las horas de falla; asimismo, el sistema neumático se posicionó en segundo lugar con la totalidad de 205 horas de fallas, representando el 19% del total. El motor tuvo 189 horas de fallas representando un porcentaje de 18%. Estas tres fallas representan el 70% del total de horas; es decir; que son las principales causantes de una avería.

Tabla 5. Hoja decisión RCM (elaboración propia).

| Hoja de decisiones RCM | | | | | | | | | | Area: Mantenimiento preventivo de equipos | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|----|----|-----------------------------|---|---|---|----|----|---|-------------------|----|----|-----------------|---|----|
| | | | | | | | | | | Equipo: Tracto Camiones | | | | | | |
| Equipo | Referencia de informacion] | | | Evaluacion de consecuencias | | | | H1 | H2 | H3 | Accion a falta de | | | Tarea Propuesta | Intervalo inicial (a=año,m=mes,s=semana,d=día) | |
| | FB | FM | FA | H | S | O | N | S1 | S2 | S3 | H4 | H5 | S4 | | | |
| | | | | | | | | O1 | O2 | O3 | | | | | | |
| TR-1 | | X | | X | | | | | | | | | | | Mantto transmision | 1S |
| TR-2 | | | X | X | | X | | | | | | | | | Mantto Sis. Electrico | 5D |
| TR-3 | | | X | X | | | | | | | | | | | Mantto transmision | 1S |
| TR-4 | | X | | X | | X | | | | | | | | | Cambio Suspension | 4D |
| TR-5 | | | X | X | | | | | | | | | | | Mantto Sis. Electrico | 3D |
| TR-6 | | X | | X | | X | | | | | | | | | Sistema Motor | 4D |
| TR-7 | | | X | X | | | | | | | | | | | Mantto Frenos | 1S |
| TR-8 | | X | | X | | X | | | | | | | | | Mantto Sist. Neumatico | 3D |
| TR-9 | | | X | X | | X | | | | | | | | | Mantto Sis. Electrico | 4D |
| TR-10 | | | X | X | | X | | | | | | | | | Mantto Sis. Electrico | 3D |

Donde: FB: Frecuencia Baja; FM: Frecuencia Media; FA Frecuencia alta; H: Fallas ocultas; S Fallas de seguridad y ambiente; O: Fallas operacionales; N: Fallas no operacionales

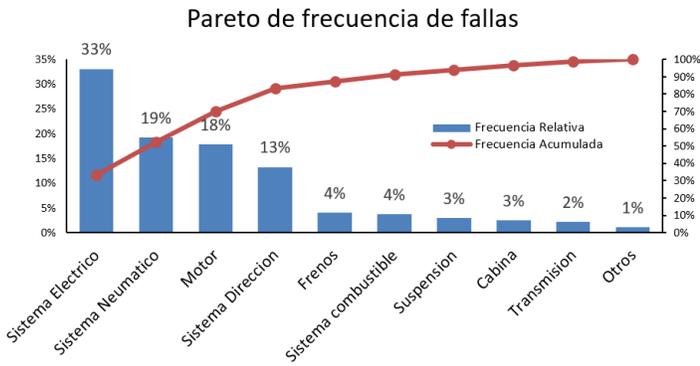


Fig. 5. Análisis de Pareto de fallas.

En la tabla 6, se muestra el cálculo del NPR, el cual se obtiene multiplicando los valores de la severidad, ocurrencia y detección para cada sistema de los tractocamiones. Se calculó el NPR para sistema eléctrico el cual se obtuvo un valor de 800 representando el 16% del total, igual se calculó el sistema neumático obtuvo un NPR de 720 siendo el 15% del total. Es importante hallar el valor NRP para realizar un correcto análisis de reparación. lo cual se identifica que el sistema eléctrico, sistema neumático, motor, sistema de transmisión, frenos representa un 70% del valor total, por lo tanto, se determina que el NPR de estos factores es prioridad para aumentar la operatividad de los tractocamiones Freightliner CL 120. Según Lean Solutions [18], valores de NPR por encima de 500 indican “Alto riesgo de falla”, mientras que valores superiores a 125 representan un “Riesgo de fallo medio”. Valores de NPR inferiores representan “Riesgo de falla bajo”.

Tabla 6. Análisis del número de prioridad de riesgo (NPR), según tipo de falla.

| Descripción de la fase | Severidad | Ocurrencia | Detección | NPR | Frecuencia relativa | Frecuencia Acumulada |
|------------------------|-----------|------------|-----------|-----|---------------------|----------------------|
| Sistema eléctrico | 10 | 10 | 8 | 800 | 16% | 16% |
| Sistema neumático | 10 | 9 | 8 | 720 | 15% | 31% |
| Motor | 9 | 9 | 8 | 648 | 13% | 44% |
| Sistema transmisión | 9 | 8 | 8 | 576 | 12% | 56% |
| Frenos | 9 | 8 | 8 | 576 | 12% | 68% |
| Sistema de combustible | 9 | 8 | 6 | 432 | 9% | 77% |
| Sistema de dirección | 8 | 7 | 7 | 392 | 8% | 85% |
| Suspensión | 8 | 8 | 6 | 384 | 8% | 92% |
| Cabina | 6 | 7 | 6 | 252 | 5% | 98% |
| Otros | 4 | 6 | 5 | 120 | 2% | 100% |

El análisis modal de fallas y efectos (AMEF) se realizó con el objetivo de identificar los efectos y causas de fallas en los sistemas y subsistemas de los tractocamiones. Esto permitirá incrementar la longevidad de los repuestos utilizados en los sistemas. Asimismo, en la tabla 6, se valorizó el NPR para identificar la falla con mayor frecuencia del cual se tendrá que realizar una acción recomendada para cada modo de falla y con ello volver a calcular un nuevo NPR. Por último, en la fase 3 se obtuvo un software ERP el cual facilita el análisis de datos en cuanto las fallas más frecuentes y los indicadores del área de mantenimiento.

Tabla 7. Matriz de análisis modal de fallas y efectos - AMEF.

| Descripción de la fase | Efectos potenciales de falla | Severidad | Causas potenciales de fallo | Ocurrencia | Verificación y/o control actual | Detección | NPR | Acción recomendada | Resultado de las acciones | | | | | |
|------------------------|--|-----------|--|------------|--|-----------|-----|--|---------------------------|-----------|------------|-----|-----|----|
| | | | | | | | | | Frecuencia de trabajo | Severidad | Ocurrencia | NPR | | |
| Sistema eléctrico | Falla de focos | 10 | Focos de mala calidad | 10 | Mantenimiento correctivo por falla | 8 | 800 | Seleccionar focos de buena calidad | Semanal | 6 | 5 | 4 | 120 | |
| Sistema neumático | Detención por fugas de aire | 10 | Cambio de acoples desgaste prematuro | 9 | Mantenimiento correctivo por falla | 8 | 720 | Cambio de niples y mantenimiento del sistema neumático | Semanal | 5 | 5 | 4 | 100 | |
| Motor | Detención de unidad sin funciones básicas | 9 | Desgaste de piezas por mal mantenimiento | 9 | Mantenimiento preventivo según kilometraje | 8 | 648 | Mantenimiento preventivo con lubricantes adecuados | Mensual | | 4 | 4 | 3 | 48 |
| Sistema transmisión | Detención del equipo por falla en crucetas | 9 | Desgaste de piezas | 8 | Mantenimiento correctivo por falla | 8 | 576 | Cambio de sistema y alineamiento de cardan | Semanal | 5 | 4 | 4 | 80 | |
| Frenos | Detención del equipo sin funciones básicas | 9 | Falta de mantenimiento | 8 | Mantenimiento correctivo por falla | 8 | 576 | Mantenimiento de sistema de frenos | Mensual | | 4 | 3 | 3 | 36 |
| Sistema de combustible | Daño de mangueras por tiempo de uso | 9 | Desgaste de piezas por uso | 8 | Mantenimiento correctivo por falla | 6 | 432 | Cambio de mangueras de combustible | Mensual | | 3 | 2 | 2 | 12 |
| Sistema de dirección | Desgaste excesivo de bocinas | 8 | Desgaste de piezas por falta de engrase | 7 | Mantenimiento correctivo por falla | 7 | 392 | Reparación y mantenimiento de sistema | Mensual | | 4 | 3 | 2 | 24 |
| Suspensión | Daño de carrocería por bolsa de aire dañadas | 8 | Desgaste de piezas prematuras | 8 | Mantenimiento correctivo por fallas | 6 | 384 | Reparación de suspensión y engrase | Mensual | | 3 | 3 | 2 | 18 |
| Cabina | Daño de sistema elevavinas | 6 | Falta de mantenimiento | 7 | Mantenimiento correctivo por falla | 6 | 252 | Reparación o cambio de sistema elevavinas | Mensual | | 2 | 2 | 2 | 8 |
| Otros | Según daño, graseras | 4 | Según daño | 6 | Mantenimiento correctivo por falla | 5 | 120 | Mantenimiento preventivo | Mensual | | 2 | 2 | 1 | 4 |

- Fase 4: Capacitación. - Para este trabajo, se realizaron cuatro capacitaciones, tales como la charla de seguridad en el trabajo donde se incentiva la cultura preventiva a los trabajos a realizar. La charla de trabajo en equipo se dio con la finalidad de desarrollar de habilidades blandas; la charla de procedimientos operaciones de equipos se propuso para actualizar a los técnicos mecánicos y con ello mejorar la productividad. Finalmente, la empresa desarrollo un ERP (sistema de planificación de recursos empresariales) que permitió medir los indicadores de disponibilidad, y se capacitó a todo el equipo de mantenimiento en el uso de un mismo ERP. El contenido se resume en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen de Capacitaciones.

| Capacitación | Charla 1 | Charla 2 | Charla 3 | Charla 4 |
|--------------------|--|--|---|---|
| Tema | Seguridad en el Trabajo | Trabajo en Equipo | Procedimientos Operaciones de equipos | Uso ERP |
| Responsable | Ingeniero industrial/especialista | RRHH (especialista) | Representante de la marca/Ingeniero Industrial | Ingeniero industrial/especialista |
| Dirigido | Personal del área de mantenimiento | | | |
| Tiempo de duración | 15 min | 40 min | 50 min | 40 min |
| Frecuencia | Diaria | Una vez al mes | Cada 3 meses - Actualización | Al finalizar la implementación |
| Objetivo | Informar y poner en práctica las Normas Básicas de Seguridad y Salud en el trabajo. Prevenir riesgos laborales en el taller. | Incrementar la productividad de un equipo y mejorar los niveles de comunicación interna. | Actualizar al personal de taller con información sobre el funcionamiento de cada tipo de sistema operativo, modelo de repuestos, software, entre otros. | Capacitar al personal operativo de taller del uso de ERP que se implementó. Concientizar al personal la importancia del uso ERP en tiempo real. |
| Desarrollo | Prevención de riesgos en el trabajo; bloqueo de maquinaria. | Dinámicas para trabajar en equipo | Presentar información actualizada de cada sistema | Paso a paso para el llenado del sistema correctamente. |

- Fase 5: Supervisión. - Durante esta fase se auditó la implementación de la metodología RCM cada 2 meses para validar mejoras continuas, lluvia de ideas para nuevo procedimiento, entre otros. Y, posterior a la implementación, el área de Sistema de Gestión de Calidad auditó y formalizó el nuevo procedimiento basado en la metodología RCM. Posterior a ello, se mantuvo una frecuencia de auditorías de forma semestral para supervisar los procedimientos.

Tabla 9. Implementación de la supervisión.

| | |
|---|---|
| 1. Formato de auditoría. | <ul style="list-style-type: none"> Este formato de auditoría donde se muestra 18 ítem que serán calificados según escala y el nivel de cumplimiento (Tabla 2). El formato es validar si en los equipos existe riesgos en seguridad y si se viene trabajando y buenas condiciones. También se valida el cumplimiento del reglamento supervisión y comunicación del personal. Esta auditoría se realiza cada fin de mes junto al equipo de mantenimiento. |
| 2. Informe de auditoría | <ul style="list-style-type: none"> Se especifica los datos de la empresa, fechas cuando se lleva a efecto la auditoría y los procesos auditados. A su vez se registra las conformidades obtenidas, su descripción y sus causas de las cuales propone las medidas correctivas, su responsable y su fecha de realización. Posterior a la implementación la auditoría se realiza cada 6 meses con los mismos responsables con el objetivo de encontrar posibilidades de mejora para el área de mantenimiento. |
| 3. Evidencias de auditoría en taller | <ul style="list-style-type: none"> Se muestra al coordinador de mantenimiento, responsable del área y/o realizando labores de supervisión en el taller, utilizando formatos establecidos por la metodología RCM. |

II. Escenario posterior de la implementación de la metodología RCM

Posterior a la etapa inicial se planifica e implementa la metodología RCM con la finalidad de generar cambios permanentes y beneficios para la empresa, esta implementación se realizó durante un periodo de 7 meses, entre enero y julio del año 2020. A partir de agosto del año 2020y, y durante un periodo de 30 meses, se realizó una evaluación de la efectividad de la implementación de RCM. Para ello, se exploraron los tres principales indicadores: MTBF, MTTR y Disponibilidad, los cuales se resumen en la Fig. 6.

En la Fig. 6a se muestra la variación del indicador MTBF durante el tiempo de estudio. Como se aprecia, previo a la implementación, el MTBF promedio en el año 2019 fue de 16.81 horas, mientras que, durante el periodo post-implementación, el promedio fue de 36.63 horas. Adicionalmente, como se observa, el tiempo medio entre fallas pasó de 17 horas a casi 53 horas. Es importante notar que cuanto más alto sea los resultados, existe mayor fiabilidad en el funcionamiento de la flota.

Según la Fig. 6b, en el MTTR se observó mejoras para el periodo final, es decir, luego de la implementación se visualiza los cambios durante el periodo de inicial en el año 2019 se llegó a un promedio 4 horas. Durante la implementación se buscó controlar y aminorar los tiempos de reparación, lo cual se obtuvo un promedio de 3.45 horas, sin embargo, aún se tiene procesos por mejorar, finalizando el año 2020 se logró

obtener mejores resultados, y en el año 2021 y 2022 se disminuyó a 2 horas.

En la Fig. 6c se muestra resultados de disponibilidad con una tendencia creciente a partir del 3° trimestre del año 2020 en el periodo post implementación. Como se logra visualizar, existe un aumento en la disponibilidad de 13% sobre el periodo inicial logrando así superar la meta solicitada por la empresa que es de 90%.

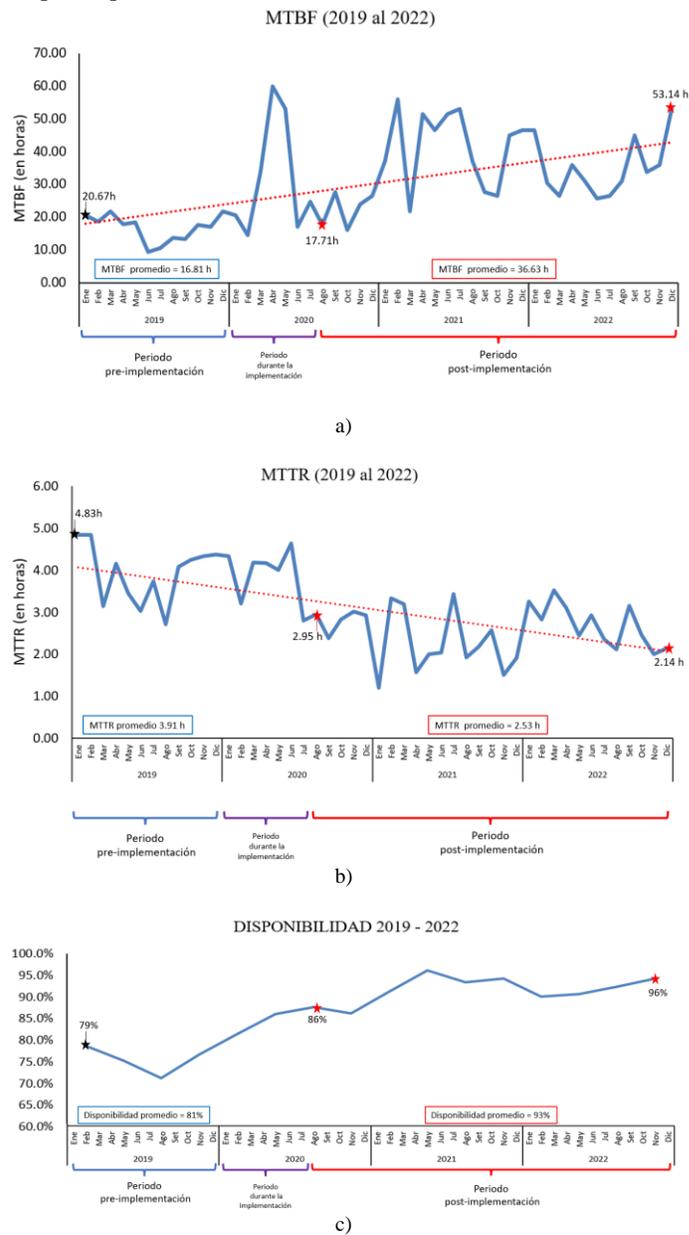


Fig. 6. Variación de los valores de a) MTBF, b) MTTR y c) Disponibilidad durante los periodos de pre-implementación, durante la implementación y post-implementación.

IV. DISCUSIÓN

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) tienen como objetivo asegurar la continuidad del funcionamiento de las instalaciones físicas [19]. Para ello, esta metodología se enfoca en desarrollar estrategias de mantenimiento englobadas dentro del mantenimiento predictivo. En el presente trabajo, ha desarrollado un esquema de implementación con tres fases:

- 1) Pre-implementación: En esta etapa se han identificado los aspectos prioritarios del mantenimiento de los tractocamiones. Se identificaron que los aspectos más importantes (en orden de frecuencia) fueron las fallas en el sistema eléctrico, fallas en el sistema neumático y fallas en el motor. Estas tres fallas representan el 70% de ocurrencias y son las principales causas de una avería. De acuerdo a Shamayleh et al. [20] es importante identificar las fallas con alta severidad y frecuencia para realizar una adecuada gestión y tomar acciones adecuadas. De manera similar, Qarahasanlou et al. [21] en una investigación similar para camiones Komatsu 5-785, indica que las fallas más frecuentes en camiones se relacionan al motor, a la caja de cambios, sistema hidráulico y transmisión, en orden de frecuencia.
- 2) Planificación y desarrollo de la metodología RCM: En esta etapa se han planteado 5 etapas en base a los datos recopilados sobre las fallas y causas de problemas más relevantes. Como se mencionó, la priorización y categorización de las fallas se realizó con el análisis AMEF a partir del estudio del número de prioridad de riesgo (NPR). A partir de las fallas se han desarrollado formatos para identificar fallas, formatos de procedimientos estandarizados y diagramas de procedimientos de mantenimiento, junto con un formato de validación y supervisión. La Matriz AMFE permite obtener un diagnóstico de las áreas de producción para poder organizar las causas para realizar un análisis de Pareto con mayor causa de incidencia [22]. Para el presente caso, se ha detectado que las fallas en el sistema eléctrico son los más recurrentes y críticos, por lo que las actividades de supervisión preventiva y mantenimiento se enfoca en estos sistemas por unidad. Incluso, se han programado frecuencias de mantenimiento preventivo por incidencia por unidad, como se detalla en la tabla 5. En paralelo, se ha realizado una gestión de trabajo apoyado en la metodología 5s; y se han organizado capacitaciones y para poder ejecutar todas las actividades. Los tractocamiones, así como cualquier vehículo para carga, atraviesan caminos urbanos y rurales durante largos periodos de tiempo, por lo que los costos de mantenimiento (adicional al kilometraje) suelen incrementarse al considerar cantidad y dinámica de las cargas (movimientos) [23]. La implementación de la metodología 5s, como parte de la cultura de trabajo, es un aspecto que se aborda dentro de los mantenimientos preventivos [24]. Esta metodología, parte de la filosofía Lean, permite mantener un área de trabajo limpia y organizada para lograr trabajos de calidad [25].

- 3) Implementación y validación: Durante los primeros 7 meses del año 2020 se realizaron los trabajos de implementación de los procedimientos y formatos de la metodología RCM. Posterior a ello, se ha realizado una supervisión mensual de los indicadores (MTBF, MTTR y disponibilidad) durante 30 meses para validar el impacto de la implementación. El indicador MTBF ha tenido un aumento promedio de 16.81 horas hasta 36.63 horas. Ello implica que se ha incrementado el tiempo operativo de los tractocamiones gracias a las acciones preventivas [20]. El indicador MTTR se redujo de 3.91 horas en el año 2019 hasta 2.53 horas en promedio en el año 2022. Ello implica que las unidades pasan menos tiempo en taller gracias a la estandarización de los procesos, específicamente la clasificación y priorización de fallas [22]. Ello sirve para poder definir una estrategia de mantenimiento. Adicionalmente, la aplicación de la metodología 5s permite un trabajo ordenado que apoya al logro de un trabajo de calidad. Finalmente, la disponibilidad operativa de los tractocamiones alcanzó un valor promedio de 93%, un incremento de 12 puntos con respecto al estadio inicial del estudio. Como se puede apreciar, los resultados alcanzados para los indicadores en el periodo post-implementación demuestran que la metodología RCM se aplicó adecuadamente y de manera sostenida durante 30 meses, similar a lo reportado por Rodriguez et al. [6].

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo desarrollado en la empresa de transportes J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C., de acuerdo con el análisis inicial, se encontró el principal problema de la empresa fue la baja disponibilidad de las unidades tractocamiones Freightliner Cl 120. Las causas principales se deben a la falta de gestión mantenimiento, falta de data histórica para mayor análisis, falta de formatos, falta de indicadores de mantenimiento, entre otros. De acuerdo al análisis inicial, el origen de este problema probablemente se encuentre en la falta de cultura en el área de mantenimiento. Como parte de la aplicación de la metodología RCM se siguieron las siguientes fases de implementación: gestión de área, análisis RCM, análisis modal de fallas y efectos, capacitación y supervisión. Dentro de la fase de gestión del área, se implementó la limpieza, el orden y optimizar procesos. En la segunda fase análisis RCM se aplicaron formatos los reportes de fallas, OT (orden de trabajo), procedimientos y programa de mantenimiento. En la tercera fase AMEF se implementaron las hojas de decisión y el NPR. En la fase de capacitación se realizaron reuniones con el personal técnico acerca de seguridad en el trabajo, trabajo en equipo, procedimientos operacionales y el uso del sistema ERP. Por último, en la fase de supervisión se desarrollaron auditorías constantes para validar el cumplimiento de la metodología RCM.

Al finalizar el estudio, se demuestra que la implementación de la metodología RCM desarrolla y organiza las actividades preventivas a aplicar en los tractocamiones de

la empresa. Las herramientas implementadas más importantes fueron el análisis AMEF y el análisis de prioridad de riesgo (NPR), las cuales se orientan a determinar y clasificar las fallas, y reconocer las alternativas de solución según la criticidad. Asimismo, se maneja un programa de mantenimiento preventivo, donde se indica el tiempo de reparación según kilometraje y falla.

Con la aplicación de las estrategias, se logran obtener resultados positivos en el indicador MTBF, ya que en el periodo inicial 2019 se llegó al valor de 16.81 horas en promedio, y en el periodo post-implementación, se alcanzaron las 36.63 horas en promedio, aumentando 18.02 horas. Esto significa que aumentó el tiempo operativo de las unidades y ello es beneficioso por que los tractocamiones están más tiempo disponibles para servicios. De manera similar, se obtienen mejores resultados en el indicador MTTR en la empresa de estudio, ya que en el periodo inicial (año 2019) se obtuvo un valor de 3.91 horas y, en el periodo post implementación (año 2022), un valor de 2.53 horas, con una disminución de 1.38 horas. Esto significa que el tiempo entre reparaciones es menor, por tanto, los vehículos están menos tiempo en taller. Asimismo, se logró medir la disponibilidad con los indicadores de MTBF Y MTTR, la cual alcanzó un valor máximo de 96% (diciembre 2022). En promedio, se observa que la disponibilidad operativa de los tractocamiones de la empresa se incrementa a un 12% en comparación del periodo inicial el cual obtuvo un valor de 81% (en el año 2019) y en el periodo final se obtuvo un promedio de 93% (en el año 2022), aumentando la utilización de unidades.

Finalmente, se validó la ejecución del RCM mediante supervisión y auditorías internas que se realizaban con el coordinador de mantenimiento y un especialista en el área de Sistema Integrado de Gestión. Tras una evaluación post-implementación de 30 meses, se concluye que la metodología RCM brinda mejoras sustanciales en el área de mantenimiento, que se ven reflejadas en un aumento de disponibilidad de los tractocamiones y mayor cobertura de servicios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Norte por el apoyo financiero y a la empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C. por permitir el uso de sus instalaciones para realizar el presente trabajo.

REFERENCIAS

[1] H. Supriyanto, N. Kurniati, and M. F. R. Supriyanto, "Maintenance Performance Evaluation of an RCM Implementation: A Functional Oriented Case Study," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 10, no. 12, pp. 702–709, 2021, doi: 10.18178/ijmerr.10.12.702-709.

[2] M. H. Nasri, S. Y. Derakhshandeh, and A. Kargar, "A Novel Method to Apply Reliability-Centered Maintenance on Over-Current Protection Systems," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 48, no. 9–10, pp. 1021–1035, 2020, doi: 10.1080/15325008.2020.1825553.

[3] A. Palomino-Valles, M. Tokumori-Wong, P. Castro-Rangel, C. Raymundo-Ibañez, and F. Domínguez, "TPM Maintenance Management Model Focused on Reliability that Enables the Increase of the Availability of Heavy Equipment in the Construction Sector," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 796, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/796/1/012008.

[4] A. Giuria-Farías, C. Noriega-Revoredo, and E. Altamirano-Flores, "Maintenance management model based on RCM and TPM to optimize times and costs within the useful life cycle of nautical assets," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2022-July, pp. 1–13, 2022, doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.747.

[5] E. Margaritopoulos and Y. Xenidis, "Condition-based Maintenance Using BIM: A Case Study of Energy Modeling for a Residential Building," *J. Eng. Proj. Prod. Manag.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–14, 2023, doi: 10.32738/JEPPM-2023-0024.

[6] S. Rodriguez, D. E. Granados, and B. C. Suarez, "Implementation of a condition-based monitoring management system for the pasta preparation area of Trupal S. A. company based on the ISO-17359: 2018 standard Implementación de un sistema de gestión de monitoreo por condición para el área de preparación," *Proc. 21st LACCEI Int. Multi-Conference Eng. Educ. Technol.*, 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.421.

[7] P. Deepak Prabhakar and A. Dharmaraj, "Implementation of reliability centered maintenance in process industry – issues and difficulties," *J. Adv. Res. Dyn. Control Syst.*, vol. 11, no. 7 Special Issue, pp. 538–547, 2019.

[8] S. Eriksen, I. B. Utne, and M. Lützen, "An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 210, no. December 2020, p. 107550, 2021, doi: 10.1016/j.res.2021.107550.

[9] R. F. da Silva, A. H. de A. Melani, M. A. de C. Michalski, and G. F. M. de Souza, "Reliability and Risk Centered Maintenance: A Novel Method for Supporting Maintenance Management," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 19, 2023, doi: 10.3390/app131910605.

[10] F. Silva, E. Chambel, V. Infante, and L. A. Ferreira, "RCM 3 Methodology Application to Armored Military Vehicle Cooling System," *U.Porto J. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 46–60, 2021, doi: 10.24840/2183-6493_007.004_0004.

[11] R. Campos-López, Omar; Tolentino-Eslava, Guilbaldio; Toledo-Velázquez, Miguel; Tolentino-Eslava, "Metodología de mantenimiento centrado en criticidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y confiabilidad de efectos," *Científica*, vol. 23, no. 1, pp. 51–59, 2019, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61458265006>.

[12] M. L. Singgih, Y. Prasetyawan, Sutikno, D. Hartanto, F. R. Kurniawan, and W. T. Wicaksana, "Maintenance management improvement based on reliability centered maintenance II in energy generating industries," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 528, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/528/1/012054.

[13] T. Endo and N. Hozumi, "Fault Analysis for Reliability Centered Maintenance (RCM) in Machining," *J. Mach. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, 2021, doi: 10.53759/7669/jmc202101004.

[14] F. Fang, Z. J. Zhao, C. Huang, X. Y. Zhang, H. T. Wang, and Y. J. Yang, "Application of reliability-centered maintenance in metro door system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 186167–186174, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960521.

[15] S. Moradi, V. Vahidinasab, M. Kia, and P. Dehghanian, "A mathematical framework for reliability-centered maintenance in microgrids," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 1–21, 2019, doi: 10.1002/etep.2691.

[16] M. Fonseca-Junior, U. Holanda-Bezerra, J. Cabral-Leite, and T. L. Reyes-Carvajal, "Programa de gestión de mantenimiento a través de la implementación de herramientas predictivas y de TPM como contribución a la mejora de la eficiencia energética en plantas termoeléctricas," *DYNA*, vol. 82, no. 194, pp. 139–149, 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n194.47642.

[17] C. Alavedra et al., "Gestión de la producción / Production Management," *Rev. la Fac. Ing. y Arquít.*, pp. 11–26, 2016, [Online]. Available: http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/529/1354.

[18] L. Solutions, "AMEF Análisis de Modo y Efecto de Falla – Lean Solutions," 2023. <https://leansolutions.co/conceptos-lean/lean-manufacturing/amef-analisis-de-modo-y-efecto-de-falla/>.

[19] R. S. Arenhart, M. Pizzolato, A. A. Mendes, and L. Braghioroli, "Contribution of Maintenance Plans in a University Laboratory," *Brazilian J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 17, no. 2, pp. 1–16, 2020, doi: 10.14488/bjopm.2020.020.

[20] A. Shamayleh, M. Awad, and A. O. Abdulla, "Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 311–334, 2020, doi: 10.1108/JQME-10-2018-0084.

[21] A. N. Qarahasanlou, A. Barabadi, and M. Saleki, "Operating Environmental Condition Effect on Reliability-Centred Maintenance," *J. Min. Environ.*, vol. 14, no. 2, pp. 667–688, 2023, doi: 10.22044/jme.2023.12767.2318.

[22] G. D. G. More, N. M. H. Ortiz, and M. E. A. Adrianzen, "Improvement proposal based on Lean Manufacturing tools to reduce overcosts in the production and maintenance areas at Molinera de cereales, Trujillo 2021," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2023-July, pp. 1–11, 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.881.

[23] S. Katreddi, A. Thiruvengadam, G. Thompson, N. Schmid, and V. Padmanaban, "Machine learning models for maintenance cost estimation in delivery trucks using diesel and natural gas fuels," *Front. Mech. Eng.*, vol. 9, no. June, pp. 1–12, 2023, doi: 10.3389/fmech.2023.1201068.

[24] C. Wagner and B. Hellingrath, "Implementing predictive maintenance in a company: Industry insights with expert interviews," *2019 IEEE Int. Conf. Progn. Heal. Manag. ICPHM 2019*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/ICPHM.2019.8819406.

[25] L. B. Jimenez and C. C. Cuadros, "Systematic Literature Review of the application of Lean methodologies in the retail sector," pp. 2056–2067, 2021.