

TEORÍA Y PRÁCTICA: UNA EXPERIENCIA CON LA ASIGNATURA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO EN UNA EMPRESA DEL ÁREA FORESTAL.

Belkys Amador Cáceres, Instituto de Diseño y Métodos Industriales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, belkys.amador@uach.cl

Sebastián Alvarado, Instituto de Diseño y Métodos Industriales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, sebastian.alvarado@alumnos.uach.cl

RESUMEN

La asignatura Ingeniería de Mantenimiento tiene por objetivo proporcionar al estudiante las herramientas para desarrollar una exitosa gestión de la función de mantenimiento y así garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos del sistema productivo. La experiencia de cursar la asignatura y en paralelo realizar el Proyecto Profesional en el área de mantenimiento en el contexto real de una empresa del área forestal, es lo que motivó el trabajo aquí descrito. Partiendo del requerimiento de la empresa de desarrollar el análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) de 5 equipos megacríticos, se elaboraron las fichas técnicas de cada equipo, se recopiló el historial de fallas, se elaboró el AMEF con base al cual se estableció el plan de mantenimiento, además de las estrategias de manejo de repuestos. Para llevar a cabo este proceso el estudiante cumplió con la función de facilitador de la metodología y a la vez, de analista de la información recopilada. Las principales lecciones aprendidas se relacionan con la importancia de comunicar el objetivo y alcance de la metodología, la conformación del equipo de trabajo, la entrevista a los actores del proceso, y la organización, síntesis y triangulación de la información. Finalmente, se concluye que los contenidos estudiados en la asignatura fueron fundamentales para abordar los requerimientos de la empresa y entregar productos para garantizar la confiabilidad y disponibilidad de equipos megacríticos.

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento, Ingeniería de Mantenimiento, Análisis de modos y efectos de fallas, Proyecto Profesional, Mantenimiento centrado en confiabilidad.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento mediante la incorporación de conocimiento, inteligencia y análisis, para servir de apoyo a la toma de decisiones en el área del mantenimiento y favorecer el resultado económico y operacional global (Viveros et al., 2013). Bajo las premisas de esta definición se desarrollan los contenidos de la asignatura Ingeniería de Mantenimiento del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica (ICM) de la Universidad Austral de Chile, cuyo objetivo es proporcionar al estudiante las herramientas necesarias para desarrollar una exitosa gestión de la función de mantenimiento, así como describir la aplicación de nuevas metodologías y tecnologías en el mantenimiento industrial.

El objetivo primordial del mantenimiento es garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos del sistema productivo de una organización, en tal sentido, las unidades de aprendizaje abordadas en la asignatura, según el programa (Amador, 2021), y que buscan fomentar las prácticas adecuadas para aportar a ese objetivo son:

- Mantenimiento, disponibilidad y análisis de fallas

- Clasificación del mantenimiento; sistema y programación de mantenimiento
- Confiabilidad
- Metodologías para mejorar el mantenimiento
- Técnicas del mantenimiento condicional
- Vibraciones mecánicas

Dentro de estas unidades de aprendizaje se destacan los contenidos incluidos en la Fig. 1, que son las bases del caso de estudio aquí reportado. Específicamente la información relacionada a los tipos de mantenimiento y sus estrategias de aplicación, los distintos procedimientos de un sistema de información para el manejo adecuado de toda la información de mantenimiento, el procedimiento para realizar un análisis de criticidad y su relevancia en la toma de decisiones sobre acciones de mantenimiento a los equipos, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) y el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) como metodologías para garantizar el funcionamiento adecuado, la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos en su contexto operacional, y finalmente, la gestión de repuestos a través de distintas estrategias para garantizar que sea un proceso eficiente.



Figura N° 1. Contenidos de la asignatura Ingeniería de Mantenimiento aplicados al caso de estudio.

A lo largo de la asignatura se aborda cada tema desde sus bases teóricas y desde la presentación de distintos ejemplos que faciliten la comprensión, también, se incluyen actividades evaluadas (evaluaciones formativas) relacionadas con la aplicación de las metodologías y herramientas estudiadas a distintos casos de estudio. Lo deseable es que los estudiantes puedan aplicar estas herramientas en contextos reales, lo cual no es fácil considerando que la asignatura se aborda en un semestre regular (último semestre de la carrera de ICM) donde se cursan otras asignaturas, además, en este semestre también se desarrolla el módulo de Proyecto Profesional.

Bajo este panorama, la oportunidad de aplicar en un contexto real lo aprendido en esta asignatura es a través del Proyecto Profesional, que según el Proyecto de Innovación Curricular de la Carrera de ICM (Escuela de ICM & DACIC, 2017, p. 218), tiene como principal objetivo “proporcionar al estudiante la oportunidad de demostrar las competencias adquiridas desarrollando una situación problemática propia de su especialidad, a partir de la cual debe ser capaz de levantar un proyecto y desarrollarlo en su totalidad, para entregar una solución a nivel profesional”.

Cuando el estudiante decide desarrollar su Proyecto Profesional en el área de mantenimiento y consigue la opción de hacerlo en una industria con necesidades en esta área, se presenta la excelente oportunidad de aplicar en simultaneo los conocimientos que se van adquiriendo en la asignatura Ingeniería de Mantenimiento, aquí el reto es trasladar y aplicar estos conocimientos a ese contexto dinámico, donde el tiempo es un recurso muy valioso y se tienen establecidas prácticas de trabajo relacionadas con la experiencia del personal a cargo.

Particularmente, la experiencia relevante reportada se da en el contexto del requerimiento de una empresa del área forestal, para la cual era necesario hacer un AMEF a 5 equipos clasificados, por la propia empresa, como 'megacríticos', de allí que se propuso como objetivos específicos del Proyecto Profesional:

- Elaborar las fichas técnicas de los equipos megacríticos
- Recopilar el historial de fallas de cada equipo
- Desarrollar el análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) de cada equipo megacrítico
- Establecer el plan de acción considerando el AMEF
- Proponer estrategias de manejo de inventario de repuestos considerando el plan de acción

La consideración de 'megacríticos' obedece a que estos equipos representan incidencias catastróficas para la planta al fallar, por ejemplo, fallos que provoquen una detención de largo tiempo (semanas) o que su coste sea muy alto en relación a fallos en otros equipos críticos.

Respecto a las competencias específicas del perfil de egreso de la carrera de ICM consideradas en el Proyecto de Innovación Curricular de la Carrera de ICM (Escuela de ICM & DACIC, 2017), este Proyecto Profesional contribuye principalmente a desarrollar las siguientes:

- ✓ Gestionar eficaz y eficientemente la producción y el mantenimiento industrial.
- ✓ Comunicar el proyecto mecánico, considerando un lenguaje técnico, gráfico y simbólico normalizado.

A través del alcance del proyecto el estudiante ha tenido la oportunidad de gestionar una parte relevante del mantenimiento industrial en la empresa, puesto que ha trabajado en la identificación de las fallas funcionales de 5 equipos de alta criticidad, los modos de falla de cada equipo y sus respectivos efectos, para luego establecer planes preventivos y de mitigación para garantizar su confiabilidad y disponibilidad. En ese proceso se ha desenvuelto en diversas reuniones y entrevistas con el personal de la empresa que tiene relación directa con los equipos en estudio, desde jefes de área, supervisores por especialidad (mecánica, eléctrica, instrumentación), personal de operación y mantenimiento directo de los equipos, hasta planificadores de mantenimiento y proveedores, lo que ha permitido entablar un exitoso proceso de comunicación empleando el lenguaje técnico adquirido en su formación a lo largo de la carrera de ICM y en particular, el adquirido en la asignatura de Ingeniería de Mantenimiento.

EL REQUERIMIENTO DE LA EMPRESA DEL ÁREA FORESTAL

La empresa del caso en estudio está en operación desde el siglo pasado, por lo cual posee en sus procesos una mezcla de máquinas y técnicas que incluyen tecnología antigua y moderna, también cuenta con variados procesos automatizados. Respecto al requerimiento, la empresa necesita contar con los AMEF y los planes preventivos y de mitigación para las fallas de cinco equipos de alta criticidad o 'megacríticos', para así asegurar la continuidad operacional de sus procesos.

Los cinco equipos estudiados, que se encuentran en el proceso de producción, son:

- Rodillo de succión de \varnothing 800 mm
- Rodillo enrollador de \varnothing 1000 mm
- Puente grúa birriel de 8 toneladas

- Rodillo portador de \varnothing 800 mm
- Rodillo portador de \varnothing 750 mm

Por ejemplo, el rodillo de succión es un equipo que extrae mediante vacíos el agua que trae el papel desde la zona de formación de cartulina, para que posteriormente pase a la zona de prensado; su función y posición es estratégica dada su relevancia en la extracción de agua, por lo cual tiene una importante incidencia a la hora de fallar dentro de la línea de producción de la planta.

El objetivo de generar los AMEF de estos cinco equipos de la planta es contar con la información necesaria para desarrollar los planes de mantenimiento preventivo y de mitigación y así poder responder ante contingencias futuras. Estos planes contemplan una organización de información asociada a las acciones de mantenimiento para responder a cada modo de falla que se pueda presentar, los proveedores, los contratistas, la disponibilidad de equipos o procesos de reparación, *stock* de repuestos en bodega, entre otros. La dotación del departamento de mantención con la documentación de mantenimiento de estos equipos, apoyará la toma de decisiones frente a los potenciales fallos.

EL ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS

El AMEF es “una herramienta que identifica los efectos y consecuencias de los modos de fallas de cada activo en su contexto operacional” (Zambrano & Leal, 2011), genera un análisis de gran utilidad para el manejo y gestión de activos, además de constituir la principal herramienta del proceso de implantación del MCC, ya que a partir del análisis realizado a los distintos activos en su contexto operacional se obtiene la información necesaria para poder prevenir las consecuencias o efectos de las posibles fallas, orientado la selección adecuada de actividades de mantenimiento (Moubray, 2004; SAE JA1012, 2002).

Para la realización de este análisis se debe definir si se está aplicando a un equipo o a un proceso, especificar algunas características del equipo, conocer su contexto de trabajo y su operación. La primera tarea de análisis es definir las funciones del equipo o sistema, para lo cual Moubray (2004, pág. 23) hace énfasis en que se debe utilizar “un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario”, en esta etapa se busca descomponer el equipo en sus funciones principales para que posteriormente se pase a establecer las maneras de indisponibilidad de dichas funciones. El objetivo es definir las fallas funcionales de cada equipo, entendiendo como falla funcional “la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario” (Moubray, 2004, pág. 50).

Luego de identificar las fallas funcionales, el análisis se centra en estudiar cada falla funcional a través de sus modos de fallo, definido modo de fallo como “cualquier evento que causa una falla funcional” (Moubray, 2004, pág. 56), pudiendo estos modos de fallo estar relacionados con:

- Los ocurridos en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto.
- Fallas que están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento existentes.
- Fallas que aún no han ocurrido, pero son consideradas altamente posibles.
- Fallas causadas por el deterioro o desgaste por uso normal.
- Fallas causadas por errores humanos (operadores o personal de mantenimiento).
- Fallas por errores de diseño (de equipos y procesos).
- Materias primas y materiales de empaque incorrectos.

Los modos de fallo son fundamentales para la toma de decisiones y para la definición de los planes de trabajo sobre el activo físico. Cada modo de fallo trae colateralmente unos efectos de falla, los cuales describen lo que pasa cuando ocurre un modo de falla, pudiendo representar amenazas a la seguridad y/o medio ambiente, problemas en la producción, entre otros.

El ejercicio del AMEF culmina en una ponderación a los efectos de fallo según tres parámetros que son detectabilidad de fallas, ocurrencia de fallas y severidad de fallos, producto de los tres se obtiene el indicador llamado número de prioridad de riesgo (NPR). La detectabilidad se entiende como la mayor o menor dificultad de asociar un suceso ocurrido a una causa o modo de fallo, la ocurrencia de fallas es el inverso del periodo o tiempo transcurrido entre fallos presentados en un equipo o instalación, finalmente, la severidad de fallo se entiende como el impacto en seguridad y medio ambiente según el fallo ocurrido (Predictiva21, 2021).

La mejor forma de llevar a cabo un AMEF es a través de un equipo natural de trabajo, integrado por personal conocedor del activo y por un facilitador especialista en la aplicación de la metodología AMEF (Moubray, 2004; SAE JA1012, 2002). De igual forma, Pistarelli (2010) resalta que el MCC aúna y consolida el saber de la gente (operadores, técnicos, mantenedores que más conocen cada equipo analizado). Esto representa particularmente un reto de esta experiencia, ya que, con los conocimientos adquiridos en la asignatura, el estudiante tuvo que cumplir un rol de 'facilitador', pero también, de 'analista' de toda la información a través del estudio detallado de cada equipo, revisión de manuales, planos y documentos propios de la empresa, y de realizar múltiples entrevistas.

APLICANDO LA TEORÍA AL REQUERIMIENTO DE LA EMPRESA

Tal como se señaló previamente, la asignatura Ingeniería de Mantenimiento se cursó en paralelo con la realización del Proyecto Profesional en la empresa del área forestal. Previo a cursar la asignatura, el estudiante no tenía información sobre el AMEF, el MCC, y gran parte de los contenidos abordados, lo que implicó que, para responder de forma adecuada al requerimiento de la empresa, el reto fue conocer, comprender e internalizar la información de la asignatura, aprovechando de manera significativa el aprendizaje alcanzado con las actividades prácticas y evaluadas planificadas en el marco del programa, para luego aplicarlas a un caso real, en un contexto muy dinámico y donde era fundamental conocer el proceso productivo de la empresa.

Los retos fueron enormes, pero de igual forma fue el aprendizaje y experiencia alcanzados. En primer lugar, se debe reiterar que el AMEF requiere del trabajo de un equipo conformado por personas relacionadas directamente con los activos del sistema productivo en estudio, esto es personal de producción, de operaciones, de mantenimiento, entre otros. En la Fig. 2 se puede observar las distintas fases y actividades que se desarrollaron en el Proyecto Profesional, para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados.

Para llevar a cabo todo el proceso, se cumplió con la función de facilitador y a la vez, de analista de toda la información requerida, ya que fue necesario:

- Estructurar según los conocimientos teóricos del AMEF el procedimiento de trabajo.
- Recopilar y revisar detalladamente los manuales, catálogos y demás documentación de equipos objeto de análisis.
- Recopilación de información del historial de fallas.
- Identificación de acciones de mantenimiento aplicadas a cada equipo.
- Análisis de la gestión de repuestos en bodega.

Para obtener esta información se emprendieron distintas actividades, entre ellas:

- ✓ Observación y estudio de cada equipo en funcionamiento para comprender el contexto operativo.
- ✓ Entrevista a operarios de los equipos sobre su funcionamiento y el aporte de cada uno a la línea productiva.
- ✓ Entrevista a personal encargado del departamento de mantención y al personal de distintas especialidades que realiza el mantenimiento de los equipos, para conocer sobre el mantenimiento aplicado y las fallas más comunes.
- ✓ Generación de listado de actividades de mantenimiento que se aplican actualmente en planta a los equipos.
- ✓ Identificación de actividades de mantenimiento que se tercerizan.
- ✓ Entrevista con planificador de planta para conocer el mantenimiento programado para los equipos objeto de estudio.
- ✓ Definición de las acciones de mantenimiento que no se realizan en planta a los equipos en estudio y las consecuencias que puede tener un fallo en estas circunstancias.
- ✓ Búsqueda de información sobre modos de fallos y acciones de mantenimiento que no se aplican en los equipos, tomando equipos similares como referencia.
- ✓ Movilizar a jefes de área del departamento de mantenimiento para contactar a los distintos proveedores de los equipos, en búsqueda de información sobre el mantenimiento de cada uno y de conocer la criticidad de los componentes que lo conforman.
- ✓ Triangulación de la información obtenida a través de las entrevistas al personal de la planta con la información técnica de cada equipo conseguida en manuales, catálogos y demás documentación de fabricantes, y con investigaciones y estudios en equipos similares disponibles en fuentes electrónicas.
- ✓ Consolidación de la información en los distintos formatos diseñados para tal fin.

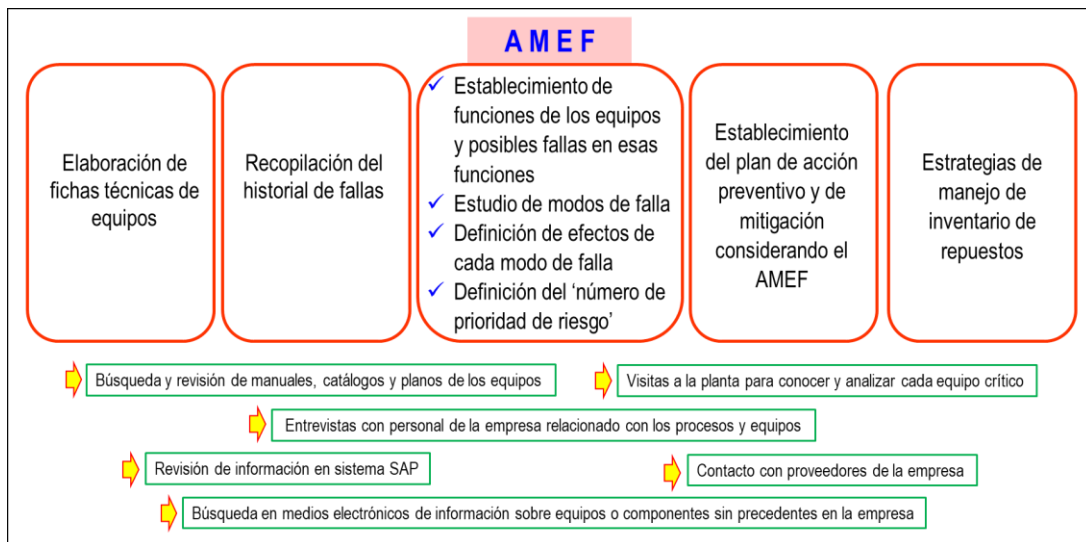


Figura N° 2. Fases y principales actividades desarrolladas en el Proyecto Profesional.

Los productos finales obtenidos y presentados a la empresa son:

1. Fichas técnicas de cada equipo, con información detallada sobre datos del fabricante, distribuidor o proveedor, características y especificaciones técnicas, manejo y cuidado, recomendaciones de uso y prevención de fallas, desagregación de cada subsistema del equipo hasta el nivel de elementos, entre otros (Covenin 3049-93).

2. Lista detallada de funciones de cada uno de los equipos objeto de estudio y sus posibles fallas funcionales.
3. Formatos detallados con los AMEF de cada equipo, incluyendo información de las funciones del equipo, las posibles fallas funcionales, los modos de fallas asociados a cada una de las fallas funcionales, los efectos que produce cada modo de falla y el NPR respectivo.
4. Plan de mantenimiento preventivo y de mitigación considerando cada modo de falla estudiado en el AMEF.
5. Las estrategias de manejo de inventario de repuestos considerando el plan de mantenimiento preventivo y de mitigación.

La empresa mostró conformidad con los resultados obtenidos y con el desempeño y proactividad del estudiante, apoyando en todo momento el proceso de obtención, manejo y síntesis de la información. Los productos generados (entregables) serán de gran ayuda en el proceso actual de gestión del mantenimiento en la planta, considerando especialmente la importancia de los equipos megacríticos.

LECCIONES APRENDIDAS

Luego de llevarse a cabo el proceso de aprendizaje en la asignatura Ingeniería de Mantenimiento y de completar el alcance requerido por la empresa del área forestal, a través del cumplimiento de los objetivos comprometidos en el Proyecto Profesional, se consideran entre las lecciones aprendidas las siguientes:

- **Comunicar el objetivo y alcance de la metodología.** La decisión de aplicar la metodología de AMEF en la empresa debe ser ampliamente conocida por todo el personal involucrado, debe quedar claro cuál es el objetivo y qué se espera al finalizar el proceso. Esto garantiza que no exista resistencia para apoyar el proceso y entregar información sobre el funcionamiento de los equipos, el historial de fallas y causas de estas fallas, y de las acciones de mantenimiento planificadas y aplicadas. Es muy importante que el personal no se sienta evaluado o que su puesto de trabajo está en riesgo por los resultados de la aplicación de la metodología. Se debe resaltar la relevancia de la participación y aporte de cada uno para que el resultado final realmente se oriente a mejorar o garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.
- **El equipo de trabajo.** Lo ideal es que la metodología de AMEF se aplique según recomienda (Moubray, 2004; SAE JA1012, 2002), esto es, por un equipo natural de trabajo, sin embargo, el trabajo planificado y coordinado de una persona responsable de tal actividad puede dar excelentes resultados, siempre y cuando incluya a todos los actores del proceso y exista verdadero compromiso y disposición de colaboración.
- **La entrevista a los actores del proceso.** Para el éxito de la recolección de información a través de entrevistas, es fundamental la selección correcta de las personas que están directamente relacionadas con los equipos o procesos en estudio, el trato respetuoso y el abordaje utilizando un discurso adecuado.
- **La organización y síntesis de la información.** Los volúmenes de información manejados son muy grandes, tanto la información técnica de los equipos (manuales, catálogos, planos) como el conocimiento técnico y experiencia propia del personal que trabaja con ellos (operaciones, producción, mantenimiento, entre otros), por lo cual el

proceso de manejo, selección y síntesis de la información es fundamental para incorporar la información adecuada y necesaria en los AMEF y en los planes de acción. Además, al tratarse de un contexto real y muy dinámico, el proceso de construcción de los distintos productos es iterativo, es decir, con altas posibilidades de actualización de la información a lo largo del proceso.

- **Triangulación de la información.** Es necesario realizar una adecuada triangulación de la información recolectada a través de entrevistas, de información técnica de los equipos obtenida de fabricantes y proveedores (catálogos y manuales), y de trabajos de investigación sobre equipos similares disponibles en fuentes electrónicas, para finalmente obtener resultados precisos y aplicables.

CONCLUSIONES

La información estudiada en la asignatura Ingeniería de Mantenimiento fue fundamental para abordar los requerimientos de la empresa, manejar el discurso adecuado, realizar las sugerencias pertinentes en las reuniones realizadas con el personal, y finalmente entregar productos que les permitirá garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos megacríticos y estar preparados en caso de contingencias por fallas, dimensionando correctamente la existencia de capacidad interna y externa de recursos para aplicar los planes de mantenimiento preventivo y de mitigación.

A través de la experiencia descrita, se evidencia la importancia de poder interactuar en un contexto real en el estudio y aplicación de los contenidos abordados en la asignatura Ingeniería de Mantenimiento para afianzar las competencias establecidas. De igual forma, se evidenció la contribución de esta experiencia en la consolidación de al menos las competencias específicas de 'gestionar eficaz y eficientemente la producción y el mantenimiento industrial' y de 'comunicar el proyecto mecánico, considerando un lenguaje técnico, gráfico y simbólico normalizado', del perfil de egreso de la carrera de ICM.

El desarrollo exitoso de este Proyecto Profesional evidencia la capacidad del estudiante para resolver problemas en un contexto real, estos resultados potenciarán en el entorno la imagen de la Escuela de ICM y de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, además de representar una excelente experiencia para el estudiante en el ambiente productivo antes de la titulación.

REFERENCIAS

Amador, B. (2021). Programa de la asignatura Ingeniería de Mantenimiento. Escuela de Ingeniería Civil Mecánica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Chile: Universidad Austral de Chile.

Covenin 3049-93. (1993). Mantenimiento-Definiciones. Venezuela: FONDONORMA.

Escuela de ICM & DACIC (2017). Proyecto de Innovación Curricular de la Carrera de Ingeniería Civil Mecánica. Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería - Universidad Austral de Chile.

Moubray, J. (2004). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Gran Bretaña: Aladon Ltd.

SAE JA1012. (2002). Una guía para la norma de mantenimiento centrado en confiabilidad. USA: Society of Automotive Engineers.

Pistarelli, A. (2010). Manual de Mantenimiento: ingeniería, gestión y organización. Buenos Aires: R y C.

Predictiva21. (29 de abril de 2021). Estudio NPR (Número de ponderación del riesgo) de modos de fallo en AMFEC. Obtenido de <https://predictiva21.com/npr-modos-fallo-amfec/>

Viveros P., et al. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 21 (1),125-138.

Zambrano, S. & Leal, S. (2011). Fundamentos básicos de mantenimiento (segunda edición). Venezuela: FEUNET.