

**Aplicación del RCM a partir de la evaluación de los modos de falla de la máquina
extrusora de PVC para la empresa Tubosa S.A.S.**

David Fernando Valencia Tenorio

Maestría en Gestión de Activos y Mantenimiento

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali 2026

Nota del autor

David F. Valencia Tenorio; Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Valle, Cali.

Este documento cuenta con la dirección de Trabajo de Profundización del Ingeniero
Mecánico MSc. Adolfo Gómez y el Doctor Luis Alberto Mora Gutiérrez.

Agradecimientos al departamento de Mantenimiento y Producción de la empresa
Tubosa S.A.S.

Cualquier mensaje con respecto a este trabajo se debe enviar a la escuela de ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-mail: david.tenorio@correounivalle.edu.co

Resumen

Este documento explora la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en una máquina de extrusión de PVC de la empresa Tubosa S.A.S.; el principal objetivo es la implementación de la táctica a la extrusora de marca Krauss Maffei de la línea no.14 de la planta, como un piloto para una eventual afectación a la gestión del mantenimiento de la empresa, y a su vez explica los principios del RCM, identifica los componentes críticos y sus modos de fallo específicos y más comunes, también presenta un procedimiento para su ejecución; y considera los beneficios y los desafíos que pueden ocurrir.

La investigación utiliza un enfoque práctico específicamente diseñado para este equipo. Se basa en la interacción directa con el equipo, entrevistas al grupo operativo y una técnica de consulta, que son los métodos principales para recopilar y organizar información sobre el estado del equipo, las características del proceso y las condiciones de uso disponibles. Este método de recolección de información directa y práctica es fundamental para llevar a cabo un análisis efectivo de RCM (Nowlan & Heap, 1978).

También fomenta la creación de un equipo RCM para la ejecución investigativa que define el análisis, conclusiones y recomendaciones para la mantenibilidad de la máquina (Mora A. -G., 2017).

La metodología se desarrolla a través de un proceso bien estructurado, respaldado por los estándares de la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE J1010, J1011 y J1012, la norma militar MIL-STD-2175, las normas UNE-EN 60812-2008 que define el FMECA, una herramienta clave del RCM, ISO 55001:2015 (Gestión de Activos), ISO 31000:2018 (Gestión de Riesgos) (ISO, 2018) y las guías técnicas UNE 60300-3-11:2017 y UNE 200001-3-11.

Este enfoque promueve actividades proactivas (Preventivas y Predictivas) para asegurar la mantenibilidad del equipo, apoyándose en la aplicación del RCM y el software iRCM. La aplicación examina el funcionamiento y las condiciones de uso, y al final, realiza una evaluación del impacto de las acciones implementadas. Esto permite ofrecer recomendaciones a la empresa y sugiere integrar estas actividades en la gestión del mantenimiento actual de la planta de producción (Al-Amri & Al-Najjar, 2018).

Palabras clave: gestión del mantenimiento, RCM, Mantenibilidad, Extrusora, planta de extrusión, línea de producción, Criticidad, Modo de falla, Gestión de activos, iRCM, Proactivas.

Abstract

This document explores the application of Reliability-Centered Maintenance (RCM) in a PVC extrusion machine of the company Tubosa S.A.S.; the main objective is the implementation of the tactic to the Krauss Maffei brand extruder of line no. 14 of the plant, as a pilot for a possible impact on the company's maintenance management, and in turn explains the principles of RCM, identifies the critical components and their specific and most common failure modes, also presents a procedure for its execution; and considers the benefits and challenges that may occur.

The research uses a practical approach specifically designed for this equipment. It is based on direct interaction with the equipment, interviews with the operating team, and a consultation technique, which are the main methods for gathering and organizing information about the equipment's condition, process characteristics, and available operating conditions. This method of direct, practical information gathering is fundamental to conducting an effective RCM analysis (Nowlan & Heap, 1978).

It also encourages the creation of an RCM team for investigative execution that defines the analysis, conclusions and recommendations for the maintainability of the machine (Mora A. - G., 2017).

The methodology is developed through a well-structured process, supported by the Society of Automotive Engineers standards SAE J1010, J1011 and J1012, the military standard MIL-STD-2175, the UNE-EN 60812-2008 standards that define FMECA, a key tool of RCM, ISO 55001:2015 (Asset Management), ISO 31000:2018 (Risk Management) (ISO, 2018) and the technical guides UNE 60300-3-11:2017 and UNE 200001-3-11.

This approach promotes proactive activities (preventive and predictive) to ensure equipment maintainability, relying on the application of RCM and iRCM software. The application examines the operation and usage conditions and, ultimately, assesses the impact of the implemented actions. This allows for recommendations to be provided to the company and suggests integrating these activities into the current maintenance management of the production plant (Al-Amri & Al-Najjar, 2018).

Keywords: maintenance management, RCM, maintainability, extruder, extrusion plant, production line, criticality, failure mode, asset management, iRCM, proactive.

Contenido

Resumen	2
Abstract.....	4
Contenido	6
Ilustraciones.....	9
Tablas.....	10
Introducción	11
Contexto operacional de la extrusora	12
Planteamiento de la oportunidad.....	14
Oportunidad	16
Ventajas de la implementación del RCM.....	18
Límites de la oportunidad	19
Justificación	21
Objetivos.....	22
General	22
Específicos.....	22
Uno - Fundamentación	22
Dos - Caracterización	22
Tres - RCM	22
Cuatro - Implementación.....	23
Cinco – Táctica	23
Seis - Conclusiones	23
Marco teórico	24
Antecedentes de la investigación o del proyecto	26
Estado del arte	27
Marco metodológico.....	30
Tipo de estudio y de análisis a desarrollar.....	30
Tipo de Estudio: estudio de caso.	30
Tipo de Análisis: Descriptivo-Analítico (Análisis de Modos de Falla, Efectos y Críticidad (FMECA))......	31
Fases del proyecto	32
Conocimiento de la táctica y de la máquina de estudio.	32
Modelación de la táctica RCM.....	34
Implementación, control y Mejora Continua	35
Desarrollo	36
Objetivo 1 – Fundamentación.....	36
Introducción del FMECA	36
El FMECA como Pilar Analítico del RCM	37
El proceso de un FMECA.....	38
Características del FMECA.....	39
Implementación del análisis de fallas y FMECA en RCM.....	40
Integración FMECA y RCM en extrusión de plástico	40
Aplicación del RCM y FMECA en la extrusora	41
Beneficios y Conclusiones	43
Objetivo 2 – Caracterización.....	45
Identificación del equipo.....	45
Descripción funcional.....	46
Contexto operativo y datos funcionales.....	48
Taxonomía jerárquica de la extrusora (línea 14)	50
Justificación de selección del equipo	54

Características técnico-productivas clave (criterios para especificación)	55
Ejemplo concreto: extrusora para fabricar tuberías	57
Conclusiones prácticas	57
Objetivo 3 – RCM	59
Marco normativo	59
Equipo RCM y responsabilidades (parámetro organizativo)	60
Requisitos de datos y herramientas (parámetro técnico)	61
Contexto y funcionalidad (parámetro característico)	62
Análisis funcional FMECA, lógica RCM (parámetro metodológico)	63
Confiabilidad y Mantenibilidad (parámetro estratégico)	67
Decisión y Selección de Tareas (parámetro de factibilidad)	68
Fase de Control y Mejora Continua (parámetro para seguimiento)	70
Integración CMMS / ERP y analítica (parámetro operativo)	71
Plan piloto, verificación y criterios de aceptación (parámetro de arranque)	71
Formación y gestión del cambio (parámetro humano)	72
Riesgos y mitigaciones (parámetro de gestión)	72
Ciclo de mejora continua (parámetro sistémico)	73
Conclusiones	73
Objetivo 4 – Implementación	74
Alcance, premisas y metodología	74
Estrategias de Mantenimiento Basadas en Confiabilidad (ISO 14224 & OREDA)	75
Metodología aplicada	78
Funciones por subsistemas	78
Falla funcional y Modos de fallas	80
FMECA y Árbol de decisión	83
Elección de la mejor tarea para el plan de mantenimiento	90
Plan de mantenimiento para la extrusora	99
Viabilidad Económica y Justificación RCM	104
Tiempos de Ejecución y Planificación	106
Repuestos Posibles y Estrategia de Inventario	107
Personal Disponible y Requerimientos de Capacitación	108
Frecuencias del Plan de Mantenimiento	109
Conclusión	111
Objetivo 5 – Táctica	112
Propósito y estructura del GPRCM (grupo primario RCM)	112
Capacitación del Personal RCM y Fomento de la Cultura de Confiabilidad	113
Plan de acción del gprcm y alineación estratégica	114
Implementación de derivaciones en el plan de mantenimiento	115
Mantenimiento industrial efectivo: el rol del RCM	117
Objetivo 6 – Conclusiones	118
Consolidación del análisis funcional y de fallas	118
Incremento de la confiabilidad y disponibilidad del proceso de extrusión	119
Integración del RCM al contexto operativo de la extrusora	119
Fortalecimiento organizacional y gestión del conocimiento	120
Impacto estratégico en la organización	120
Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos	122
Uno – Fundamentación	122
Dos - Caracterización	123
Tres – RCM	123
Cuatro – Implementación	124

Cinco – Táctica	125
Resultados más relevantes	127
Incremento en la confiabilidad operativa del equipo	127
Reducción en variabilidad del proceso y mejora en la calidad del producto	127
Implementación de tareas predictivas y eliminación de mantenimientos innecesarios	128
Mayor control del riesgo operativo y reducción de eventos críticos	128
Mejora en competencias del personal y fortalecimiento del equipo RCM	129
Bibliografía	130

Ilustraciones

Ilustración 1	Foto extrusora de PVC línea 14	13
Ilustración 2	Secuencia lógica de objetivos.....	23
Ilustración 3	Infografía de cursos de MGAM	25
Ilustración 4	Organigrama área Mtto. Empresa Tubosa S.A.S.	26
Ilustración 5	Descripción de partes de la Extrusora	47
Ilustración 6	Categorías del Mantenimiento	75
Ilustración 7	Matriz FMECA para la extrusora.....	83
Ilustración 8	Árbol lógico de decisión RCM.....	90

Tablas

Tabla 1 Toneladas de Tubería Fabricadas de la línea no. 14	14
Tabla 2 - Identificación de la máquina	45
Tabla 3 Nivel jerárquico según ISO 14224	50
Tabla 4 Sistemas principales	51
Tabla 5 Clasificación funcional (según ISO 14224 y OREDA).....	52
Tabla 6 Ejemplo de codificación jerárquica estructurada.....	53
Tabla 7 Normas de apoyo técnico.....	59
Tabla 8 Tareas de confiabilidad	76
Tabla 9 Sistemas y sus funciones de la extrusora.....	78
Tabla 10 Fallas funcionales y modos de falla de la extrusora.....	80
Tabla 11 Matriz FMECA para la extrusora de PVC	85
Tabla 12 Tabla explicativa de matriz de Decisión RCM (Moubray / Casa Oreda).....	91
Tabla 13 Análisis de Funciones, Fallas y Estrategia de Mitigación	92
Tabla 14 Rankin modos de falla más críticos identificados.....	96
Tabla 15 Propuesta del plan de mantenimiento	99
Tabla 16 Matriz de Tareas de Mantenimiento (Detalle Operativo).....	102
Tabla 18 Costo-Beneficio del RCM aplicado	105
Tabla 19 Tiempo posibles para nuevas tareas	106
Tabla 20 Posible repuestos a utilizar.....	107
Tabla 21 Frecuencia valoradas para el mantenimiento.	108
Tabla 22 Frecuencias del mantenimiento propuesto	109
Tabla 23 Roles de un Grupo Primario de RCM	112
Tabla 24 Derivaciones del análisis RCM	116

Introducción

Tubosa S.A.S. es una empresa colombiana que fabrica productos de PVC, con una trayectoria de más de 30 años en el mercado. Su planta principal está ubicada en Yumbo, Valle del Cauca donde transforma el PVC en soluciones para la infraestructura, con un enfoque en la calidad y la innovación.

La mantenibilidad y la confiabilidad de los equipos de producción son esenciales para la fabricación de productos de PVC en Tubosa S.A.S. Esto es importante para la extrusora de la línea no. 14 que es la máquina piloto de estudio, un componente clave que adquiere la empresa en el año 2021 por la rápida expansión y crecimiento que presenta, además del respaldo que ofrecen los equipos y máquinas de tecnología alemana.

Los métodos de mantenimiento tradicionales demuestran ser insuficientes para enfrentar estos retos. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una solución estratégica muy interesante. A diferencia de las prácticas tradicionales, el RCM es una táctica sistemática que busca mantener las funciones operativas de un activo y gestionar las consecuencias de sus fallas, y no solo en prevenir averías en componentes individuales (Moubray, 1997).

Este enfoque se fundamenta en un análisis exhaustivo, que permite identificar los modos de falla más críticos y crear un plan de mantenimiento que sea óptimo y alineado con los objetivos de la empresa. Esta investigación basa su implementación en normativas y estándares internacionales como la SAE J1011, J1012, MIL-STD-2175, la norma ISO 55001 para la gestión de activos, la UNE-EN 60812 para el análisis de modos de falla, las normas UNE EN 14224, Casa Oreda y las guías técnicas UNE 60300-3-11 y la 200001-3-11 para su aplicación.

La implementación del RCM en equipos de extrusión se alinea con los principios de la ISO 55001 (ISO, 2014), que promueve un enfoque integral para la gestión de activos, así como con la ISO 14224 (ISO, 2016), que facilita la recolección y el análisis de datos sobre confiabilidad y mantenimiento. Estas directrices, junto con la literatura especializada, ofrecen un marco sólido para diseñar estrategias de mantenimiento basadas en evidencia, con el objetivo de extender la vida útil de los activos y maximizar el retorno de la inversión (Crespo-Márquez, 2017), (Dhillon, 2006) y (Swanson & Rucker, 2018).

Las máquinas extrusoras de PVC, son conocida por su versatilidad y su buen rendimiento en la producción de tubos plásticos, es un ejemplo para aplicar el RCM, dado su papel en la cadena de valor de la industria. La implementación de metodologías de análisis como la FMECA no solo ayuda a identificar los modos de falla y sus consecuencias, sino que también refuerza la toma de decisiones enfocadas en la mitigación de riesgos y la mejora continua (Rausand & Hoyland, 2004).

Contexto operacional de la extrusora

Plastificar y extruir compuesto de PVC con temperaturas controladas que oscilan entre los 180C y 220C, parametrizada para fabricar 500 kg/h de tubos de alta calidad con un régimen de trabajo de continuo (24/7), lo que significa que el equipo se creó para funcionar sin parar.

Las extrusoras hacen parte de las líneas de fabricación de la planta de extrusión, un fallo funcional detiene todo el proceso de producción, lo que las vuelve el núcleo de las líneas.

Las extrusoras son máquinas especializadas y eficientes que necesitan un control preciso de sus parámetros operativos para asegurar una producción de alta calidad. Estas son el corazón de las líneas de producción; si la extrusora falla, la línea de producción se detiene,

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

ocurre pérdida de materias primas, la calidad del producto se afecta y, lo más importante, compromete la seguridad del operario.

Ilustración 1

Foto extrusora de PVC línea 14



Nota. Imagen de la máquina Extrusora Krauss Maffei de la línea No. 14 de la planta de extrusión de la empresa Tubosa S.A.S. Fuente fotografía (Maffei, 2019).

Planteamiento de la oportunidad

La línea de producción No. 14 con su extrusora es una de las de mayor impacto para la producción de la planta de extrusión de la empresa Tubosa S.A.S., pero la empresa aun no logra sacar el mayor provecho de la capacidad de la máquina, ya sea por fallos de funcionamiento o deficiencias en la implementación de las actividades de mantenimiento.

Tabla 1

Toneladas de Tubería Fabricadas de la línea no. 14

Mes	Total, Acumulado (ton)
Enero	171,02
Febrero	214,41
Marzo	214,63
Abril	129,3
Mayo	259,71
Junio	184,31
Julio	14,77
Total	1188,15

Nota. La tabla 1 muestra las toneladas fabricadas de tubería en la línea No. 14 con la extrusora Krauss Maffei entre enero y julio del año 2025, Fuente, información tomada de los indicadores de Tubosa S.A.S.

La tabla anterior indica que en promedio en la línea n. 14 fabrica 195 toneladas/mes de tubería, cuando la meta de producción son 360 toneladas por mes, esto indica que la máquina no cumple con los parámetros que da el fabricante y por la cual fue adquirida por la empresa.

De acuerdo con el análisis hecho a la inspección que se realiza a las máquinas en las líneas y a la entrevista hecha a operarios y líderes de producción en conjunto con algunos integrantes del área de mantenimiento.

Las fallas más comunes de la extrusoras son:

- Fallas en el lector de temperatura de la extrusora.
- Falla en el sistema de enfriamiento del husillo
- Falla en el sistema de alimentación y dosificación
- Falla en el sistema de desgasificación y extracción de residuos del material PVC.
- Alta temperatura en la caja de engranajes.
- Los técnicos solo atienden emergencias.
- Hay técnicos que aún no conocen el funcionamiento de los equipos.

Cuantificación del impacto de la gestión de mantenimiento actual.

Indicadores de Desempeño (KPIs Baseline)

- La Disponibilidad Operacional se sitúa en un 62%, muy por debajo del estándar mundial que supera el 90%.
- Aun no se miden indicadores claves como el MTBF (Tiempo Medio entre Fallas) y el MTTR (Tiempo Medio de Reparación) no se logra evaluar la eficiencia y efectividad de las actividades del mantenimiento.
- No existe un análisis que contenga un plan los repuestos críticos en inventario.
- La distribución del esfuerzo muestra un 65% en mantenimiento correctivo frente a un 35% en mantenimiento preventivo, según información recolectada en los archivos de la compañía, lo que refleja una cultura de "bomberismo".

Brecha de Producción y Capacidad

- La capacidad nominal es de 360 toneladas por mes.
- La producción real alcanza solo 195 toneladas por mes.

- Esto resulta en un déficit operativo de 165 toneladas por mes, lo que representa una brecha del 45.8%.

Impacto Económico y de Calidad

La tasa de scrap (desecho) es del 12% del material procesado, principalmente generado durante los arranques tras paradas no programadas, como el PVC quemado o fuera de dimensiones.

Se evidencia que las máquinas gozan de disponibilidad, pero con baja confiabilidad operativa, también se valida que no hay una estrategia clara para la atención de los equipos y no existe un plan de mantenimiento programado para las líneas de producción.

Oportunidad

La clave está en adoptar e implementar de manera sistemática el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), como un enfoque estratégico para la gestión de activos en la extrusora de PVC de la línea no. 14 con un enfoque en su mantenibilidad. Este ayuda a encontrar los factores que afectan a la máquina para que no cumpla con su función principal en su totalidad. El RCM se centra en asegurar que cualquier activo físico cumpla de manera continua lo que sus usuarios esperan de él en su contexto operativo actual (Nowlan & Heap, 1978).

La compañía cuenta con un ERP, el cual se puede optimizar alimentando el módulo de mantenimiento con los elementos taxonómicos de las máquinas y la técnica de mantenimiento indicada que ayude a mejorar la gestión de activos de la compañía.

Por tal motivo, la aplicación del RCM presenta la oportunidad de mejorar la mantenibilidad del equipo como eje central, para aumentar confiabilidad y asegurar que cumpla

con lo expuesto en su contexto operacional de manera continua. Lo que traduce en garantizar la operación y funcionamiento mediante actividades de mantenimiento específicos con indicadores que controlen cualquier alteración que lo impida (Mora-Gutiérrez, 2022).

El RCM ofrece beneficios tangibles que impactan directamente la operación, la seguridad y las finanzas de la empresa:

Alcance

- **Activo:** Extrusora Krauss Maffei de la Línea No. 14 (Tubosa S.A.S. Planta Yumbo).
- **Sistemas Analizados:** subsistemas (Alimentación, Extrusión-Husillo/Barril, Control Térmico, Cabezal, Tracción, Control/SCADA, Hidráulico/Neumático, entre otros).
- **Metodología:** Análisis funcional, FMECA (ISO 60812), Árbol de decisión RCM3 y Plan Maestro de Mantenimiento.
- **Integración:** Definición de roles para un Grupo Primario RCM (GPRCM).

¿Por qué la Extrusora Krauss Maffei?

Criticidad Nivel 1: El componente "corazón" de la línea 14 es fundamental; si presenta un fallo, toda la línea de producción se detiene por completo.

Complejidad Sistémica: Este sistema integra mecánica de alta precisión, control térmico crítico, electrónica y neumática, lo que lo hace ideal para evaluar la robustez del RCM.

Régimen de Operación 24/7: La alta demanda operativa intensifica cualquier fallo, permitiendo recopilar datos significativos en un tiempo reducido.

Efecto Multiplicador: Al ser un equipo estándar en la industria del PVC, el éxito de este piloto se puede replicar al 100% en las demás líneas de la planta y en otras ubicaciones.

Costo de Reposición y Partes: El alto valor de sus componentes, como los husillos y la caja reductora, justifica la inversión en análisis de confiabilidad proactiva.

Ventajas de la implementación del RCM

Mejora de la Confiabilidad y la Disponibilidad.

La principal ventaja del RCM es que asegura que los activos críticos desempeñen sus funciones adecuadamente en su entorno operativo.

Al enfocarse en los modos de falla funcional en lugar de la falla física, el RCM logra lo siguiente:

Aumentar el tiempo de actividad (Uptime): Al prever y evitar fallas funcionales, se reduce el tiempo de inactividad no planificado, lo que se traduce en una mayor disponibilidad de la maquinaria.

Prolongar la vida útil de los activos: Seleccionar las tareas de mantenimiento más adecuadas, basándose en el estado real del equipo en lugar de seguir calendarios rígidos, es fundamental para maximizar la vida útil de los activos (Campbell & Jardine, 2001).

Optimización y Reducción de Costos.

El RCM proporciona una justificación financiera clara para las actividades de mantenimiento. Al realizar un análisis de criticidad, la empresa puede evitar gastar de más en tareas innecesarias (como el mantenimiento preventivo genérico) y también prevenir pérdidas por fallas catastróficas (mantenimiento correctivo).

Uso eficiente de recursos: El RCM garantiza que los recursos de mantenimiento, como el personal, las piezas de repuesto y el tiempo, se asignen a los activos y modos de falla que representan el mayor riesgo para la operación.

Equilibrio Costo-Riesgo: Permite tomar decisiones más inteligentes desde el punto de vista económico, utilizando estrategias de correr hasta fallar para equipos de baja criticidad y aplicando enfoques predictivos en aquellos de alto riesgo (Vee, 2007).

Fortalecimiento de la Seguridad y el Cumplimiento

Dado que proviene de sectores de alta seguridad como la aviación, el RCM se centra en la seguridad y el riesgo ambiental como aspectos clave (Nowlan & Heap, 1978).

La mitigación de riesgos es clave: el RCM analiza a fondo las repercusiones de las fallas, considerar la seguridad del personal, el cumplimiento de normativas y el impacto ambiental. Esto garantiza que se lleven a cabo acciones específicas para evitar fallas que podrían ocasionar accidentes graves.

Decisiones documentadas y defendibles: El enfoque estructurado del RCM produce una documentación detallada y técnicamente robusta que respalda cada tarea de mantenimiento. Esto es fundamental para auditorías y para cumplir con estándares de gestión de activos, como la ISO 5500.

Límites de la oportunidad

A pesar de los evidentes beneficios que el RCM puede ofrecer para mejorar la mantenibilidad de las extrusoras de PVC, es crucial abordar de manera proactiva las limitaciones que presenta su implementación.

Aspectos para tener en cuenta:

Costo y recursos iniciales: a pesar de que metodologías como el RCM están diseñadas para mejorar la gestión de activos, llevar a cabo un análisis detallado de todos los componentes, modos de falla y efectos implica inversión de tiempo, personal capacitado y recursos (Campbell & Jardine, 2001).

Disponibilidad y calidad de datos: cuando los datos son escasos o poco confiables, las predicciones sobre fallas y la elección de tareas de mantenimiento, como la aplicación de técnicas predictivas, pierden efectividad. Esto, a su vez, disminuye la ventaja de adoptar un enfoque de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) (Mobley, 2002).

Resistencia al cambio y cultura organizacional: la falta de compromiso de cada uno de los integrantes de la compañía, una capacitación inadecuada o el rechazo a las nuevas tecnologías y procedimientos pueden poner en riesgo la implementación.

Mantenimiento de la metodología: el éxito de la implementación de la táctica va ligado al control y revisión de cada uno de los procedimientos y actividades resultantes.

Estos son elementos clave para convertir el desafío de una gestión de mantenimiento ineficiente en una oportunidad de mejora sostenible y estratégica.

Exclusiones

- Equipos auxiliares externos (Compresores de aire de planta, Chillers generales, Cortadoras, Orugas) no dedicados exclusivamente a la extrusora.
- Otras líneas de producción de la planta.
- Mantenimiento de infraestructura civil o estructural del edificio.
- Ejecución física de reparaciones mayores o rediseños de ingeniería durante la fase de análisis.
- La aplicación de la herramienta no estudia los periféricos

Justificación

La productividad en la industria manufacturera de plásticos exige una operación continua y eficiente, donde la confiabilidad de los equipos se convierte en un factor crítico. Actualmente la compañía experimenta un crecimiento considerable en el proceso productivo de la planta para la fabricación de tubería, paso de producir 500 ton/mes en tubería en 2021 a promediar 2300 ton/mes en 2025. Pero la empresa busca alcanzar y sostener las 3000 ton/mes; por tal motivo la planta paso de tener 09 líneas de producción a tener 20.

Este aumento en la producción exige una mayor capacidad de respuesta y eficiencia en su proceso de mantenimiento, lo cual debe mantener altos indicadores de disponibilidad y confiabilidad en los equipos críticos de la planta. Las extrusoras son reconocidas por su tecnología de vanguardia y capacidad de producción, y no se trata de equipos simples (Mobley, 2002).

La razón detrás del RCM es la oportunidad de adoptar una estrategia de correr hasta fallar en equipos de baja criticidad, mientras que se destina más atención al monitoreo de condición y al mantenimiento predictivo para los activos que son realmente críticos, tal como se detalla en la ingeniería de confiabilidad y mantenibilidad (Levitt, 2007).

La propuesta no solo atiende una necesidad operativa inmediata, sino que también representa una oportunidad para alinear las prácticas de mantenimiento con los estándares internacionales de gestión de activos físicos, como los establecidos por la norma ISO 55001. Con ello, la empresa podrá minimizar los riesgos de generar desperdicios de materia prima y extender la vida útil de sus activos críticos, y reduce al mismo tiempo los costos operativos asociados a fallos inesperados y mantenimientos correctivos (Smith, 1993).

Objetivos

General

Fortalecer la mantenibilidad y la confiabilidad de la máquina extrusora de la línea N.º 14 de Tubosa S.A.S., mediante la aplicación de la táctica RCM en sus principales subsistemas, aplicando todas las etapas del proceso (definición de funciones, fallas funcionales, modos de falla, análisis de consecuencias y selección de tareas), apoyado en el software iRCM, con el fin de reducir la criticidad de los modos de falla priorizados e implementar indicadores clave de desempeño en un período máximo de 6 meses a partir del inicio del proyecto.

Específicos

Uno - Fundamentación

Relacionar las principales características de la metodología del FMECA en aras de ver la implementación del RCM en la industria extrusión de PVC y su aplicación en una máquina extrusora con las normas SAE J1010-J1011-J1012, MIL-STD-2175, UNE-EN 60812-2008, ISO 55001:2015, ISO 31000: 2018 y las guías técnicas UNE 60300-3-11:2017 y UNE 200001-3-11.

Nivel 1 Conocer escala de Bloom y Gagné.

Dos - Caracterización

Definir los principales criterios y características técnico-productivas de la máquina extrusora como de su contexto operativo, en aras de alinearlos con las políticas y objetivos de la empresa. **Nivel 2 Comprender escala de Bloom y Gagné.**

Tres - RCM

Establecer los parámetros necesarios de RCM para su implementación en la máquina extrusora de PVC, con base en SAE J1010-J1011-J1012, MIL-STD-2175, UNE-EN 60812-

2008, ISO 55001:2015, ISO 31000: 2018 y las guías técnicas UNE 60300-3-11:2017 y UNE 200001-3-11. **Nivel 3 Aplicar escala de Bloom y Gagné.**

Cuatro - Implementación

Desarrollar la táctica RCM de manera específica en la máquina de extrusión de la línea no. 14, con todas sus etapas de funciones primarias y secundarias, fallas funcionales, modos de fallas, riesgos, trabajos de mantenimiento y atenuación de consecuencias, en el programa informático iRCM de la USNavy norteamericana. **Nivel 4 Analizar escala de Bloom y Gagné.**

Cinco – Táctica

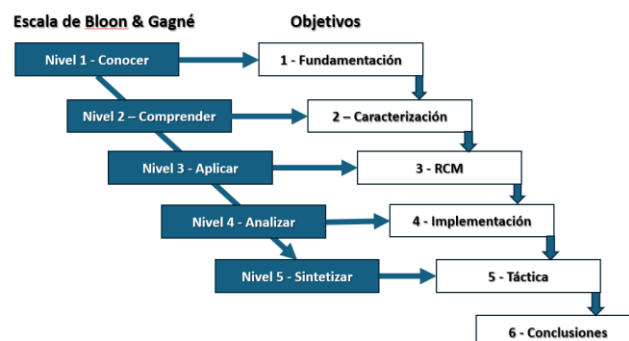
Fomentar la creación de un grupo primario RCM que capacite al resto del personal y que genere un plan de acción que implemente las derivaciones de los análisis realizados con la táctica RCM al plan de mantenimiento y que se alinee con los objetivos de empresa. **Nivel 5 Sintetizar escala de Bloom y Gagné.**

Seis - Conclusiones

Concluir los principales resultados.

Ilustración 2

Secuencia lógica de objetivos



Nota: Secuencia lógica, niveles y relación de objetivos del proyecto. Elaboración propia

Marco teórico

La evolución del RCM se divide en tres etapas fundamentales. Primero, el RCM1, expuesto por Nowlan y Heap en 1978, sentó las bases teóricas en el ámbito de la aviación, centrándose en las consecuencias de las fallas. Luego, en 1997, John Moubray formalizó el RCM2 como una metodología estructurada que se basa en siete preguntas, haciéndolo más accesible para la industria en general. Por último, el RCM3, fusionó el RCM con la gestión de riesgos y activos, alineándose con estándares contemporáneos como ISO 31000 e ISO 55000, convirtiéndolo en una herramienta táctica no estratégica que maximiza el valor de los activos para el negocio (Moubray, 1997; Nowlan & Heap, 1978; Basson, 2019).

La gestión de activos establece los principios fundamentales para maximizar su valor a lo largo de todo su ciclo de vida. El RCM se integra perfectamente con esta norma, ya que ofrece una metodología para identificar las actividades de mantenimiento que optimizan la relación entre el riesgo y el rendimiento del activo, lo que, a su vez, ayuda a generar valor. Además, el análisis del ciclo de vida es crucial en ambos enfoques, ya que las decisiones de mantenimiento se toman en cuenta según su impacto en el costo total de propiedad (TCO), desde la fase de diseño hasta la disposición final (Campbell & Jardine, 2001).

La norma UNE 60300-3-11, junto con su equivalente internacional, proporciona directrices para gestionar la confiabilidad, y sirve como base para evaluar riesgos y tomar decisiones en el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Además, el análisis de fallos se apoya en estándares como la UNE-EN 60812, que regula el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) y el Análisis de Criticidad (FMECA) como su herramienta principal.

Los Fundamentos de la SAE J1011 y J1012 introducen a la metodología RCM, que tiene sus orígenes en la industria aeronáutica y fue formalmente establecida por la Sociedad de

Ingenieros Automotrices (SAE). Estos estándares definen los principios y el proceso que forman la base metodológica para las implementaciones modernas de RCM, este proporciona un marco estructurado y riguroso. La norma militar MIL-STD-2175 (1983) se utiliza para evaluar la mantenibilidad de los componentes, especialmente en lo que respecta a los sistemas electrónicos de control.

La investigación cuenta con los alcances teóricos vistos en los cursos de la Maestría de Gestión de Activos y Mantenimiento relacionados a continuación:

Ilustración 3

Infografía de cursos de MGAM



Nota: la imagen muestra los cursos vistos en la maestría y que se involucran en la ejecución de este proyecto. Fuente (UNIVALLE, 2025).

Antecedentes de la investigación o del proyecto

En la actualidad la empresa Tubosa S.A.S. presenta deficiencias en la confiabilidad y la mantenibilidad de los equipos, gracias a su rápido crecimiento y la ausencia de un programa estratégico para las actividades de mantenimiento; esto genera que la planta no alcance a cumplir las metas de productividad, según sus indicadores. El papel de un departamento de mantenimiento industrial es mantener los equipos de planta, no repararlos tras el fallo (Mobley, 2002).

Planta de Extrusión.

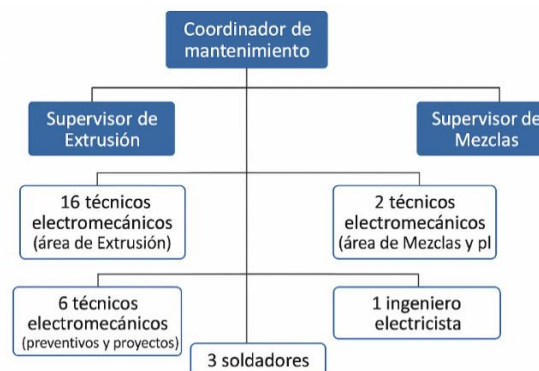
La empresa cuenta con 20 líneas de fabricación en la planta de extrusión; pero no cuenta con un programa de mantenimiento establecido que disminuya las actividades correctivas que se generan en la operación de la planta y presenta baja disponibilidad de los equipos.

Organigrama del área de mantenimiento.

El área de mantenimiento está conformada por el siguiente personal:

Ilustración 4

Organigrama área Mtto. Empresa Tubosa S.A.S.



Nota: la imagen anterior describe la composición actual del área de mantenimiento de la empresa Tubosa S.A.S. Fuente RH Tubosa S.A.S.

El coordinador de mantenimiento cumple con la jefatura del área mientras los supervisores coordinan la logística operativa y de ejecución de las tareas de mantenimiento.

Almacén de repuestos.

Frente al tema de repuestos, no se evidencia una política de máximos y mínimos, el faltante de materiales y repuestos retrasa la ejecución y corrección de fallas de manera oportuna.

Todo lo anterior genera en la empresa lo siguiente:

- Pérdidas de producción debido a tiempos de inactividad no planificados.
- Costos elevados por mantenimientos correctivos y de emergencia.
- Deterioro anticipado de los equipos y pérdida de eficiencia.
- Impacto en la calidad del producto final, como defectos en los tubos.

La compañía busca implementar una estrategia que puntualmente le permita mantener los equipos en sus condiciones ideales de operación y mermar las tareas reactivas que se relacionen a la mantenibilidad de la planta. Sin embargo, incluso equipos de alta gama requieren un plan de mantenimiento robusto para prevenir fallas y maximizar su vida útil.

Estado del arte

RCM en la Era de la Industria 4.0 (2010s - Presente)

El RCM ha dado un gran salto al adaptarse a las tecnologías de la Industria 4.0, y da origen al concepto de RCM 4.0. Esta nueva fase se distingue por un enfoque que se basa en datos en tiempo real. La fusión de tecnologías como el IoT (Internet de las Cosas Industrial), el Big Data y la Inteligencia Artificial ha revolucionado el RCM, transformándolo de un proceso manual a una estrategia dinámica y predictiva (Pérez, 2021).

El RCM3 crece más allá de su enfoque original en la seguridad, estandarizándose globalmente en la gestión de activos basado en el riesgo, a través de normas como la ISO 55000 (2014), que lo posiciona como una herramienta clave para la gestión de activos. Esta integración asegura que las decisiones de mantenimiento se alineen con los objetivos estratégicos de la empresa, y no solo con la prevención de fallas (Basson, 2019).

La aplicación del RCM va más allá de simplemente identificar tareas de mantenimiento. También se enfoca en mejorar los programas de mantenimiento que ya existen y en establecer indicadores de rendimiento. Crear métricas adecuadas para medir la efectividad de las estrategias de mantenimiento es importante para el control de la táctica (Wireman, 2005).

Además, los conceptos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (RAM) están interconectados y son aspectos que el RCM busca optimizar (Dhillon, 2006).

El RCM3 (Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad Basado en Riesgos) hoy en día aborda la viabilidad financiera de una manera más completa, va más allá de simplemente optimizar costos. A diferencia de las metodologías de mantenimiento tradicionales que se centraban en prevenir fallas, el RCM3 adopta un enfoque de gestión de activos que considera el riesgo empresarial como un elemento clave en la toma de decisiones. Una tarea se considera económicamente viable cuando el costo de llevarla a cabo es menor que el costo de las consecuencias que se buscan evitar en caso de falla (Basson, 2019).

El RCM3 busca encontrar el equilibrio perfecto entre la confiabilidad operativa y los costos a lo largo del ciclo de vida del activo. Esto permite a las empresas tomar decisiones de inversión en mantenimiento que se alineen directamente con sus objetivos estratégicos.

El RCM al aplicarlo a las extrusoras de PVC, recorre un largo camino, al pasar de ser una simple idea para convertirse en una práctica de gran avance y tecnológicamente sofisticada. La tendencia actual es bastante evidente; se busca integrar el RCM con el mantenimiento predictivo basado en datos, al aprovechar tecnologías como el IoT¹ y la IA. El objetivo es lograr una gestión de activos que sea cada vez más inteligente, proactiva y enfocada en maximizar la confiabilidad, la disponibilidad y la rentabilidad en la industria de la extrusión de PVC (Swanson & Rucker, 2018).

¹ Internet of Things (el internet de las cosas)

Marco metodológico

La presente propuesta aborda de manera específica, la oportunidad de mejorar la mantenibilidad en la planta de extrusión de la empresa Tubosa S.A.S. El objetivo será implementar de forma práctica un enfoque proactivo de mantenimiento, basado en la implementación de la táctica RCM en una máquina extrusora, enfatizándose en tareas efectivas para la contención de los fallos funcionales de la máquina y así garantizar su operación dentro de la línea de producción (Higgins, 2002).

Este marco metodológico para implementar un RCM en una extrusora se fundamenta en un enfoque sistemático y multidisciplinario, que combina tanto metodologías cualitativas como cuantitativas (Crespo-Márquez, 2017).

Se apoya en datos históricos para optimizar las estrategias de mantenimiento. Este enfoque se fundamenta en principios como los establecidos por la norma SAE JA1012, que define los criterios mínimos para un proceso de RCM. Aunque se basa en el proceso clásico del RCM de Nolan, también incorpora herramientas y consideraciones específicas para la maquinaria de extrusión de PVC.

Tipo de estudio y de análisis a desarrollar

Para llevar a cabo este proyecto, se adopta un enfoque metodológico que integra tanto elementos cualitativos como cuantitativos. Este enfoque se enmarca en un estudio de caso que sea aplicado y descriptivo-analítico.

Tipo de Estudio: estudio de caso.

La aplicación de la táctica RCM a un equipo específico, como la extrusora de tubos plásticos en la empresa Tubosa S.A.S., se considera un estudio de caso. Este enfoque de

investigación es perfecto para analizar un fenómeno actual en su contexto real, lo que brinda una comprensión más profunda sobre cómo se implementa el RCM en un entorno de producción particular. A través del estudio de caso, se forma un equipo RCM que evalúa la viabilidad de la táctica, identifica los desafíos que surgen y valida la efectividad de las soluciones propuestas para el equipo (Yin, 2018).

Este caso, se enfoca en mejorar la mantenibilidad de una extrusora de tubos en PVC, con el propósito de mejorar su confiabilidad, disponibilidad, seguridad y eficiencia.

Tipo de Análisis: Descriptivo-Analítico (Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA)).

Un apoyo para la táctica RCM es el Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA). Este método sistemático ayuda a identificar, evaluar y clasificar las posibles fallas de un equipo en específico, así como sus causas y consecuencias. En el caso de la extrusora, el FMECA se utiliza para abordar las claves del RCM, lo que permite pasar de un enfoque de mantenimiento reactivo y genérico a uno que se centra en la función y el riesgo (Smith, 1993).

El proceso del FMECA en la extrusora implica:

Identificación de funciones: Se definen las funciones y los estándares de funcionamiento de la extrusora.

Identificación de modos de falla: Aquí se describen todas las maneras en que el equipo puede no cumplir con sus funciones, como, por ejemplo, el motor falla o el barril se sobrecalienta.

Análisis de efectos: Se evalúan las consecuencias operacionales y de seguridad de cada falla (Smith, 1993).

Evaluación de criticidad: Se clasifica cada modo de falla en función de su impacto, lo que ayuda a priorizar los esfuerzos de mantenimiento.

Desarrollo de tareas de mantenimiento: Se seleccionan las tareas de mantenimiento más adecuadas para mitigar o prevenir las fallas (Al-Amri & Al-Najjar, 2018).

Este análisis es un requisito fundamental para una aplicación formal del RCM y su metodología se detalla en estándares internacionales como la norma UNE-EN 60812.

Fases del proyecto

La implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la extrusora de PVC es un proceso estructurado que se divide en procesos interconectados. De esta manera, cumple así, cada uno de los objetivos planteados en este documento; cada uno se construye sobre el anterior, asegura un buen análisis y la creación de un plan de mantenimiento optimizado y sostenible (Moubray, 1997).

A continuación, se describen las fases del proyecto, con énfasis en la aplicación a la máquina extrusora:

Conocimiento de la táctica y de la máquina de estudio.

Estudio de la táctica RCM, su alcance y evolución en la industria, de manera que se logre identificar las ventajas de su implementación en la máquina extrusora de PVC de la empresa Tubosa S.A.S.

Formación del equipo RCM: es importante resaltar la importancia de formar un grupo multidisciplinario, con roles definidos y objetivos claros que permitan la adecuada gestión de la información.

Definición del Alcance y Funciones de la máquina: Identificar los sistemas y equipos críticos de la máquina de extrusión y establecer sus funciones deseadas y estándares de rendimiento. Esto permite conocer a fondo la máquina y tener un panorama claro sobre las condiciones que se desean mejorar.

Revisión de Fallos Funcionales: Determinar las formas en que la máquina puede fallar en el cumplimiento de sus funciones, considera condiciones de operación (Rausand & Hoyland, 2004).

Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA): Identificar las causas de cada fallo funcional, sus efectos y las consecuencias que tendrían en la producción, seguridad y medio ambiente y cuan crítico llega a ser.

Esta primera fase explora las primeras 4 de las 7 preguntas del RCM (Moubray, 1997):

¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño de los activos en su contexto operativo? Esta primera pregunta establece lo que se espera que el equipo logre, y va más allá de simplemente describir su forma física.

¿Cómo puede fallar en el cumplimiento de sus funciones? Esta pregunta se enfoca en las formas en que puede haber fallas funcionales. El análisis de fallas es crucial para comprender por qué un activo deja de funcionar como se esperaba (Rausand & Hoyland, 2004).

¿Qué sucede cuando hay una falla? Se examinan las consecuencias en términos operativos, de seguridad, ambientales y económicos. La gravedad de estos efectos es fundamental para evaluar cuán crítica es la falla.

¿Qué es lo que provoca la falla? Se identifican las causas fundamentales de los modos de falla. Entender estas causas es crucial para elegir la estrategia de mantenimiento más adecuada (Levitt, 2007; Higgins, 2002).

Modelación de la táctica RCM

Esta fase se centra en llevar a cabo la aplicación de los principios del RCM, busca la alternativa más relevante para la mejora del proceso de mantenimiento y asegurar su integración en las operaciones diarias.

Selección de Tareas de Mantenimiento: Desarrollar un plan de acciones de mantenimiento preventivo, predictivo o basado en la condición, prioriza la minimización de las consecuencias de los fallos, categoriza las fallas y sus consecuencias.

Esta fase responde las otras 3 preguntas de las 7 del RCM:

¿Qué tipo de tarea podemos llevar a cabo para anticipar o evitar una falla? Esta es la pregunta que guía hacia la elección de tareas de mantenimiento proactivo, como el mantenimiento predictivo o preventivo, que promueve la anticipación de fallas catastrófica en el equipo, aplicar técnicas especializadas para el análisis (Pintelon & Gelders, 1992).

¿Qué se debería hacer si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? Cuando no es viable ni rentable llevar a cabo una tarea proactiva, surge la necesidad de decidir entre realizar una tarea de búsqueda de fallas o considerar un rediseño (Coetzee, 2009; Lewis, 2016).

¿Qué se puede hacer si ninguna tarea resulta efectiva? Si la falla no se puede prevenir o sus consecuencias son difíciles de manejar, una opción podría ser adoptar una estrategia de correr hasta que falle o considerar un rediseño del sistema. La ingeniería de confiabilidad evalúa estas alternativas para la definición de las nuevas tareas (Swanson & Rucker, 2018).

Implementación, control y Mejora Continua

Se pone en práctica las tareas definidas para el plan de mantenimiento, al monitorear su efectividad y al realizar ajustes periódicos para optimizar los resultados y adaptarlo a nuevas condiciones (Crespo-Márquez, 2017).

Este enfoque iterativo garantiza que el plan de mantenimiento se adapte a las necesidades cambiantes de la planta y maximice la fiabilidad de la línea de extrusión de PVC.

Desarrollo

Objetivo 1 – Fundamentación

Este objetivo contempla la relación simbiótica entre la metodología de análisis de fallas, el Análisis de Modos y Efectos de Criticidad de Fallas (FMECA), y el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Se analiza cómo el FMECA actúa como un apoyo analítico para implementar el RCM en el campo de la extrusión de plásticos, con un enfoque especial en su uso en una máquina extrusora.

El mantenimiento pasa de ser una simple reacción a los problemas, a convertirse en una estrategia clave que busca optimizar la gestión de activos. Esto garantiza no solo la seguridad, sino también la rentabilidad y la sostenibilidad (Campbell & Jardine, 2001).

En este contexto, tácticas como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla y Criticidad (FMECA) cobran una gran importancia. No son enfoques que se excluyan entre sí, sino que se complementan: el RCM actúa como un marco de toma de decisiones que utiliza el FMECA como una de sus herramientas de análisis.

Introducción del FMECA

La industria moderna de manufactura, como la que se observa en la extrusión de plástico, opera con márgenes de eficiencia muy ajustados, donde la disponibilidad de los activos es importante. Una máquina extrusora, y compleja, y puede generar pérdidas en producción y rentabilidad si no está en funcionamiento. Este entorno operativo exige un enfoque de gestión de mantenimiento que supere el simple mantenimiento preventivo basado en el tiempo (Mora-Gutiérrez, 2022).

El análisis de fallas y la metodología FMECA se convierten en herramientas esenciales para identificar, clasificar y priorizar los modos de falla, lo que permite planificar el mantenimiento de manera proactiva.

El RCM es una estrategia cuyo enfoque identifica las mejores prácticas de mantenimiento para asegurar que los activos funcionen correctamente en su entorno operativo. Además, permite priorizar las acciones según los riesgos asociados con la seguridad, el medio ambiente y la operación (Nowlan & Heap, 1978).

Por otro lado, el FMECA es una técnica muy bien organizada que ayuda a identificar los modos de falla, evaluar sus efectos y determinar la criticidad de cada uno. Se convierte en una herramienta clave dentro del proceso de RCM. El RCM se basa en el Análisis de Modos y Efectos de Falla y Criticidad (FMECA), que actúa como su principal herramienta de diagnóstico. Esto hace que la transición del mantenimiento reactivo a un enfoque más predictivo y proactivo sea mucho más efectiva (Al-Amri & Al-Najjar, 2018).

Las industrias dedicadas a la extrusión de plástico, como la producción de filamentos, perfiles, tubos y láminas dependen en gran medida de la disponibilidad y calidad de las extrusoras. Por eso, implementar un Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), apoyado por análisis de fallas y FMECA, puede ser una gran estrategia para reducir los tiempos de inactividad, optimizar costos y asegurar la calidad del producto.

El FMECA como Pilar Analítico del RCM

El FMECA es una herramienta analítica clave que permite llevar a cabo un examen sistemático de los modos de falla de un sistema, así como de sus causas y consecuencias (Stamatis, 2003).

La principal diferencia entre el FMEA y el FMECA radica en que este último incluye un análisis de criticidad. Esto hace que sea más fácil priorizar los modos de falla según su gravedad, la probabilidad de que ocurran y la capacidad de detección.

La conexión entre el FMECA y el RCM es como una hermosa danza en la que ambos se complementan a la perfección. El RCM brinda el marco lógico que guía nuestras decisiones, mientras que el FMECA proporciona datos concretos y ayuda a priorizar los riesgos que respaldan esas decisiones.

Esta colaboración es lo que transforma al RCM de una simple idea teórica en una táctica de mantenimiento que realmente funciona en la práctica (Stamatis, 2003).

El proceso de un FMECA

El FMECA es la evolución del FMEA (Análisis de Modos de Falla y Efectos), que agrega la evaluación de la criticidad de los modos de falla.

Entre sus pasos principales destacan:

- Definir el alcance: se identifica el sistema o equipo que se va a analizar, en este caso, la extrusora de PVC.
- Identificar funciones: se establecen las funciones clave del equipo y los estándares de rendimiento.
- Identificar modos de falla: aquí se detallan todas las maneras en que el equipo puede no cumplir con sus funciones.
- Analizar los efectos: se describen las consecuencias de cada modo de falla.
- Asignar índices de riesgo: para cada modo de falla, se asignan puntuaciones a la severidad (S), la ocurrencia (O) y la detectabilidad (D).

- Calcular la criticidad: el número de prioridad de riesgo (IPR) se calcula al multiplicar S por O por D, lo que ayuda a dar prioridad a las fallas.

El uso de este análisis es clave en industrias complejas, como se evidencia en el sector de la energía nuclear (Zio & Fasanino, 2017) y en la minería (Coetzee, 2009).

Además, es igualmente esencial para la extrusión de plásticos.

Los resultados del FMECA permiten jerarquizar los riesgos, documentar modos críticos y generar recomendaciones de mantenimiento alineadas con la filosofía RCM (Moubray, 1997).

Características del FMECA

Análisis de fallas: enfoque y objetivos

El análisis de fallas busca identificar causas raíz, secuencias de eventos y factores contribuyentes de fallas para definir acciones preventivas y correctivas (Rausand & Hoyland, 2004; Nowlan & Heap, 1978).

Características clave:

Estructuración de información: documentación de síntomas, condiciones ambientales, historial de mantenimiento y datos de operación.

Enfoque sistemático: desde la detección del fallo hasta la verificación de la corrección (Yin, 2018).

Uso de técnicas: RCA (Análisis de causa raíz), árboles de fallos, 5-Porques, Ishikawa, etc. (Swanson & Rucker, 2018).

Implementación del análisis de fallas y FMECA en RCM

La metodología RCM se originó en la industria aeronáutica y luego se adaptó a otros sectores industriales. Su enfoque se centra en mantener las funciones del sistema en lugar de enfocarse solo en los componentes individuales (Nowlan & Heap, 1978).

La integración del FMECA dentro del RCM permite:

Identificar las consecuencias de una falla en términos de seguridad, medio ambiente, operación y costos.

Seleccionar tareas técnicas viables (mantenimiento preventivo, predictivo o rediseño).

Optimizar recursos al priorizar modos de alta criticidad.

Establecer planes de contingencia cuando no existe tarea técnica efectiva.

En sectores como la extrusión de plásticos, estas metodologías son esenciales para reducir las paradas inesperadas y garantizar la calidad del producto.

Integración FMECA y RCM en extrusión de plástico

Ventajas de integrar FMECA en RCM:

La priorización basada en el riesgo significa que los modos críticos se enfocan en realizar tareas que protegen la seguridad, el medio ambiente y la producción (Basson, 2019).

Base para estrategias técnicas: FMECA dice si una falla es adecuada para el mantenimiento preventivo programado, detectivo o predictivo (Moubray, 1997; Dhillon, 2006).

Soporte documental y trazabilidad: alimenta CMMS y registros conforme a ISO 14224.

Requisitos previos:

Datos confiables: historial de fallas, tiempos entre fallas (MTBF), tiempos de reparación (MTTR). Recolección estándar según

Competencia técnica: personal formado en técnicas FMEA/FMECA, análisis estadístico y procedimientos RCM (Coetzee, 2009).

Apoyo organizacional: alineación con ISO 55001 para recursos y políticas de mantenimiento (Crespo-Márquez, 2017).

Aplicación del RCM y FMECA en la extrusora

Esta implementación del RCM en la extrusora de PVC en la industria del plástico, es un ejemplo práctico de aplicación de esta táctica. Una extrusora es un activo crítico y complejo, con sistemas interconectados que van desde el motor principal y la caja de engranajes, hasta el tornillo, el barril y los sistemas de calefacción y refrigeración. La falla de cualquiera de estos componentes puede tener consecuencias desastrosas.

El proceso de implementación se desarrolla en las siguientes fases:

Fase de Análisis y Preparación

En esta etapa inicial, se forma un equipo multidisciplinario que incluye operarios, ingenieros de mantenimiento y expertos en confiabilidad. El primer paso consiste en definir el contexto operativo de la extrusora y sus funciones. Por ejemplo, la función principal es extruir material polimérico a una tasa de X kg/hora a una temperatura de Y °C. Una vez que se tienen claras las funciones, se avanza con el análisis FMECA ((Al-Amri & Al-Najjar, 2018).

El equipo realiza un FMECA detallado para la extrusora, identifica modos de falla como:

Falla del tornillo: Puede deberse a desgaste o fatiga del material.

Falla del motor: Causada por sobrecalentamiento, rodamientos defectuosos o problemas eléctricos.

Falla del sistema de calefacción: Atribuible a la falla de termopares o elementos calefactores.

Para cada tipo de falla, se analizan los efectos, como paro de la línea de producción o producto no conforme, y se les asigna una puntuación de criticidad (IPR). Esto ayuda a priorizar las acciones a tomar.

Fase de Toma de Decisiones del RCM

Con los resultados del FMECA, el equipo de RCM se apoya en la guía SAE JA1012 para elegir las tareas de mantenimiento más adecuadas. Para los modos de falla que son altamente críticos, como una falla del motor, se opta por tareas preventivas (mantenimiento basado en la condición) o predictivas (como el monitoreo de vibraciones o la termografía). En el caso de fallas de menor criticidad, la estrategia de seguir hasta que falle puede ser la opción más económica y justificada (Moubray, 1997).

Las tareas de mantenimiento se clasifican en:

Tareas de Mantenimiento Preventivo: Reemplazo de sellos o lubricación de rodamientos según un calendario fijo.

Tareas de Mantenimiento Predictivo: Monitoreo de la temperatura del barril, análisis de vibraciones del motor, o análisis de aceite de la caja de engranajes (Knezevic, 1993).

Tareas de Mantenimiento a condición: Inspección visual de la matriz por si hay deformación o desgaste.

No Programadas (Run-to-Failure): Para componentes con bajo IPR que no afectan la seguridad o la producción crítica.

Fase de Implementación y Mejora Continua

Una vez que se ha establecido el plan de mantenimiento, se pone en marcha y se supervisa su efectividad. Para evaluar el éxito de esta implementación, se utilizan indicadores de rendimiento como la disponibilidad, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el costo total de mantenimiento (Ljungberg & Theorell, 2009).

Es importante destacar que esta etapa no es estática; el proceso de RCM es cíclico y necesita ser revisado y actualizado constantemente a medida que se recopilan nuevos datos sobre el comportamiento de la extrusora.

Beneficios y Conclusiones

La integración del FMECA con el RCM en la extrusora proporciona múltiples beneficios:

Optimización de Recursos: Al enfocarse en las fallas más críticas, se evita hacer mantenimiento innecesario, lo que ayuda a reducir costos y a mejorar la eficiencia (Campbell & Jardine, 2001).

Mejorar la Confiabilidad: Las tareas de mantenimiento se centran en identificar las causas raíz de las fallas, lo que lleva a una mayor disponibilidad y reduce el riesgo de paradas inesperadas.

Aumento de la Seguridad: El análisis de criticidad prioriza las fallas que representan un riesgo para el operario o el entorno, lo que lleva a un entorno de trabajo más seguro.

La Gestión de Activos Estratégica: El RCM se encarga de alinear las actividades de mantenimiento con los objetivos comerciales de la empresa, lo que ayuda a gestionar los activos de manera más estratégica y a tomar decisiones basadas en datos (Pintelon & Gelders, 1992).

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

En pocas palabras, la relación entre el FMECA y el RCM es realmente de causa y efecto. El FMECA proporciona el qué y el porqué de las fallas, mientras que el RCM utiliza esa información para determinar qué acciones tomar.

Al aplicar esta combinación a una extrusora de plásticos, se transforma el mantenimiento de una simple reparación en una herramienta para la optimización y la mejora continua, al asegurar que el equipo funcione de manera confiable y segura.

Objetivo 2 – Caracterización

La información descrita en este objetivo es tomada de la página electrónica y manuales técnicos de la marca Krauss Maffei la cual es la máquina piloto para implementar (Maffei, 2019).

Identificación del equipo.

La máquina objeto de estudio es una extrusora de marca Krauss Maffei, de tecnología alemana, ubicada en la línea de producción N° 14 de la planta de extrusión de Tubosa S.A.S., localizada en Yumbo, Valle del Cauca.

Es una extrusoras de doble tornillo, de alto rendimiento que se utiliza en procesos de extrusión de tubos, perfiles, láminas y compuestos técnicos. Se destaca por su alta densidad de par, tornillos con geometrías optimizadas (alto D_a/D_i), modulación de barriles y elementos de tornillo intercambiables (Maffei, 2019).

A continuación, se muestra en la tabla la placa de identificación de la máquina.

Tabla 2

Identificación de la máquina

Característica	Detalle	Característica	Detalle
Máquina	Extrusora	Año de Construcción	2016
Tipo	KMD 75-36	Peso	4300 kg
No. de la Máquina	510161159	Tensión	460 V
Intensidad Total	632 Amp	Frecuencia	60 Hz

Nota. La tabla indica la identificación de la máquina, con su característica específica. Fuente Manual de la máquina Krauss Maffei (Maffei, 2019).

La extrusora, cuenta con protección contra el desgaste (liners endurecidos y recubrimientos), sistemas de control integrados y opciones digitales como smartAssist y remoteAccess. Todo esto está diseñado para mejorar el rendimiento productivo, la eficiencia energética y la disponibilidad en la producción continua (Maffei, 2019).

Esta extrusora opera dentro de un sistema de producción continuo, donde su disponibilidad y confiabilidad impactan directamente en los niveles de productividad, la calidad del producto final y la eficiencia global de la línea. Su funcionamiento ininterrumpido es clave para garantizar el suministro de productos terminados, al cumplir con los tiempos de entrega y estándares de calidad establecidos por la organización (Campbell & Jardine, 2001).

Los operadores deben estar bien capacitados para manejar arranques, paradas, calibraciones, mantenimiento y limpieza de manera segura.

Descripción funcional

Aplicación: La extrusora es de doble husillo de giro paralelo, diseñada principalmente para la transformación de mezclas de polvo de PVC duro y blando, aunque también puede procesar granulados y material reciclado (molienda).

Su diseño permite lograr una mezcla homogénea, una plastificación eficiente del material y una extrusión con estabilidad dimensional.

Accionamiento: El motor de accionamiento principal acciona los husillos mediante un embrague de garras, un engranaje reductor y distribuidor, así como acoplamientos con dentado interior.

Alimentación del material: Se alimenta el material a los husillos por un dispositivo de alimentación que contiene una tolva, opcionalmente también dosificadora, dispositivo de obturación, estación dosificadora múltiple o gravimetría.

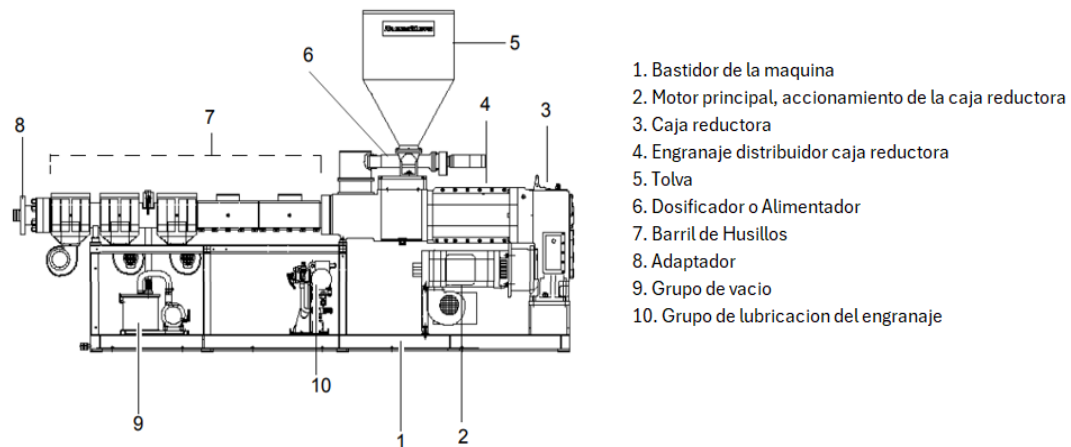
Regulación de la temperatura de la unidad del procedimiento.

- Las cintas calefactoras o resistencias eléctricas calientan el cilindro.
- Unos ventiladores enfrían los cilindros.
- La extrusora trabaja con husillos calientes al interior. El calentamiento interior equilibra la temperatura entre la zona de entrada y la zona de expulsión.

Grupos constructivos del equipo: A continuación, se detallan las partes que componen la extrusora:

Ilustración 5

Descripción de partes de la Extrusora



Nota El diagrama ilustra las partes principales y la arquitectura de una máquina extrusora doble husillo co-rotante, un equipo fundamental en la industria de procesamiento de PVC. (Maffei, 2019).

La extrusora viene equipada con un sistema de control de líneas que utiliza tecnologías digitales como MES y ERP. Además, tienen la capacidad de registrar datos de proceso en tiempo real y monitorear parámetros críticos. También incluyen instrumentos para detectar variaciones en color, calidad, temperatura y mucho más.

El control abarca herramientas como sensores de presión, termopares, sensores de nivel, dispositivos para regular la humedad y sistemas de retroalimentación que permiten hacer correcciones automáticas (Maffei, 2019).

Contexto operativo y datos funcionales

Contexto operativo

La extrusora forma parte de sistemas industriales de procesamiento de plásticos que abarcan diversas aplicaciones como tuberías, perfiles, láminas, recubrimientos, compounding, reciclaje y extrusión en general. Esta máquina funciona en condiciones exigentes, tanto mecánicas como térmicas. Necesitan un control preciso de los parámetros, una calidad del producto constante, eficiencia energética y un mantenimiento que sea confiable (Maffei, 2019).

A continuación, se describen los principales componentes del contexto operativo y los desafíos que enfrenta esta extrusora.

Condiciones de operación

La alta temperatura de fusión del polímero requiere mantener un perfil térmico constante a lo largo del barril. Esto implica gestionar adecuadamente las zonas calefaccionadas y enfriadas, así como controlar la temperatura del tornillo y la camisa.

Es necesario ejercer una presión interna significativa para forzar el flujo de polímero a través del tornillo, la zona de plastificación, el cabezal y el dado. En ciertas aplicaciones, como en la extrusión combinada con el pelletizado, se emplean extrusoras que actúan como bombas de fusión para crear la presión requerida.

Es importante encontrar las velocidades de tornillo que permitan un flujo adecuado, evitar al mismo tiempo que el polímero sufra degradaciones térmicas. También es crucial asegurar la homogeneidad del material fundido, al evitar puntos calientes, degradación y variabilidad en la densidad (Maffei, 2019).

Producción, rendimiento y productividad

Las extrusoras están diseñadas para producción continua, turnos extendidos, alto rendimiento y eficiencia energética. Las líneas están diseñadas para máxima producción y mantener la calidad.

Los diámetros de las tuberías pueden variar enormemente, desde 5 mm hasta 2.000 mm, lo que presenta diferentes desafíos técnicos en cuanto a la calibración y el control de las deformaciones térmicas.

En el proceso de reciclaje, el objetivo es reducir costos y minimizar los pasos de pretratamiento, como la necesidad de pre-secado o pre-pelletizado, para así mejorar la eficiencia.

Mantenimiento y confiabilidad

Componentes sometidos a desgaste por abrasión, corrosión, altas temperaturas, especialmente tornillos y camisas, dado contacto con material cargado con aditivos o rellenos; cabezales y tamices también sujetos a obstrucciones o daño químico/abrasivo.

Los paros inesperados pueden ser muy costosos, ya que generan desperdicio de material, productos defectuosos, un alto consumo de energía y pérdidas en la producción. Por eso, es fundamental implementar un mantenimiento predictivo, realizar un monitoreo de condiciones, llevar a cabo inspecciones regulares y contar con un programa de mantenimiento bien estructurado.

Taxonomía jerárquica de la extrusora (línea 14)

la taxonomía se organiza en una jerarquía de 5 niveles, tal como lo establece la ISO 14224, para asegurar la consistencia en el reporte de fallas.

Tabla 3

Nivel jerárquico según ISO 14224

Nivel	Denominación según ISO 14224	Descripción aplicada a la extrusora
Nivel 1	Unidad	Línea de extrusión no. 14 – Producción de tubería PVC
Nivel 2	Sistema	Extrusora
Nivel 3	Subsistema / Equipo principal	Componentes funcionales mayores que intervienen directamente en la extrusión
Nivel 4	Componente / Parte	Elementos individuales reemplazables o mantenibles dentro de cada subsistema
Nivel 5	Elemento funcional o parte menor	Componentes individuales de bajo nivel, típicamente no reparables en campo

Nota. La tabla 3 indica los diferentes niveles de la taxonomía de la máquina de extrusión según la ISO 14224. Fuente (Maffei, 2019).

Taxonomía funcional de la extrusora

Nivel 1: Unidad

Código: EXTR-L14

Descripción: Línea no. 14 con extrusora para tubería PVC.

Función principal: Fundir, conformar, enfriar y cortar tuberías plásticas de acuerdo con las especificaciones de producción.

Tabla 4

Sistemas principales

Código	Sistema	Función
EX-L14-S1	Sistema de alimentación	Transportar y dosificar el material plástico (granza o polvo) hacia el husillo.
EX-L14-S2	Sistema de extrusión (husillo y cilindro)	Fundir y homogeneizar el material mediante fricción y calor.
EX-L14-S3	Sistema de calefacción y control térmico	Mantener la temperatura óptima del cilindro y cabezal.
EX-L14-S4	Sistema de cabezal y troquel	Dar forma al flujo plástico según el diámetro y espesor requeridos.
EX-L14-S5	Sistema de calibración y enfriamiento	Enfriar y estabilizar dimensionalmente la tubería.
EX-L14-S6	Sistema de tracción (haul-off)	Mantener la velocidad de extrusión constante.
EX-L14-S8	Sistema eléctrico, control e instrumentación	Controlar la secuencia de operación, seguridad y monitoreo de variables.
EX-L14-S9	Sistema neumático e hidráulico	Operar actuadores, cilindros y válvulas auxiliares.

Nota. La tabla 4 muestra el nivel 2 de la taxonomía de la máquina donde identifica cada uno de los subsistemas que la componen según la ISO 14224. Fuente. manual de la máquina (Maffei, 2019).

Nivel 3: Subsistemas o equipos principales

1. Ejemplo: Sistema de extrusión (EX-L14-S2)
 - EX-L14-S2-1: Motor principal de extrusión
 - EX-L14-S2-2: Reductor de velocidad
 - EX-L14-S2-3: Husillo (screw)
 - EX-L14-S2-4: Cilindro (barrel)

- EX-L14-S2-5: Resistencias calefactoras
 - EX-L14-S2-6: Termopares / sensores de temperatura
2. Ejemplo: Sistema de calefacción y control térmico (EX-L14-S3)
- EX-L14-S3-1: Zonas de calefacción (por resistencia)
 - EX-L14-S3-2: Controladores PID
 - EX-L14-S3-3: Sensores PT100 / Termopares tipo K
 - EX-L14-S3-4: Sistema de ventiladores de enfriamiento
3. Ejemplo: Sistema de calibración y enfriamiento (EX-L14-S5)
- EX-L14-S5-1: Tanques de vacío
 - EX-L14-S5-2: Bombas de vacío
 - EX-L14-S5-3: Tanques de agua de enfriamiento
 - EX-L14-S5-4: Bombas de recirculación
 - EX-L14-S5-5: Medidores de flujo y temperatura

Tabla 5

Clasificación funcional (según ISO 14224 y OREDA)

Categoría ISO 14224	Aplicación en extrusora	Tipo de datos recolectados (según OREDA)
Equipos rotativos	Motor principal, bomba de vacío, reductor	Tiempo medio entre fallas (MTBF), horas de operación, fallas por desgaste o sobrecalentamiento
Equipos estáticos	Cilindro, cabezal, troquel	Fallas por deformación térmica, agrietamiento, corrosión
Sistemas eléctricos / instrumentación	PLC, sensores, variadores	Fallas por cortocircuito, descalibración, interferencias

Equipos de proceso	Tanques, resistencias, válvulas	Fallas por bloqueo, pérdida de presión o temperatura
Componentes auxiliares	Ventiladores, enfriadores, filtros	Datos de mantenibilidad, MTTR, disponibilidad promedio

Nota. La tabla anterior ofrece un desglose sobre cómo se aplica la clasificación de equipos según la norma ISO 14224 en el contexto específico de una máquina extrusora. Además, establece una conexión entre esta categorización y los tipos de datos de confiabilidad y fallas que es necesario recopilar para llevar a cabo un análisis sólido. Fuente ISO 14224 y Casa Oreda.

Aplicación práctica de la taxonomía

Esta taxonomía se utiliza como base para:

- Registrar y clasificar eventos de falla con una trazabilidad única, dependen del nivel jerárquico que se vea afectado.
- Es importante estandarizar los reportes de mantenimiento en un software, lo que facilita la integración con bases de datos internacionales de confiabilidad como OREDA, SINTEF, entre otros.
- Apoyar el análisis FMECA y RCM, identificar funciones y fallas funcionales en cada subsistema.
- Alinear la estructura de datos con la gestión de activos según ISO 55000, permiten indicadores globales como disponibilidad (A), confiabilidad (R), mantenibilidad (M) y seguridad (S).

Tabla 6

Ejemplo de codificación jerárquica estructurada

Código	Descripción	Nivel	Tipo
--------	-------------	-------	------

EX-L14	Línea de extrusión	1	Unidad
EX-L14-S2	Sistema de extrusión	2	Sistema
EX-L14-S2-3	Husillo principal	3	Equipo
EX-L14-S2-3-1	Eje del husillo	4	Componente
EX-L14-S2-3-1A	Rodamiento delantero	5	Elemento

Nota. La tabla muestra un sistema de codificación que es tanto estructurado como jerárquico para un activo industrial, en este caso, una Línea de Extrusión (EX-L14). Este enfoque se basa en un desglose que se conoce como Estructura de Desglose de Activos (ABS) o Modelo de Desglose Funcional. Fuente ISO 14224 y Casa Oreda.

Esta codificación permite asociar modos de falla, repuestos y tareas de mantenimiento de manera estructurada y compatible con los formatos de datos recomendados por la ISO 14224.

Justificación de selección del equipo

La extrusora Krauss Maffei se prioriza como piloto de análisis debido a:

- Es el corazón de la línea, es donde se inicia el proceso de fabricación.
- Su impacto directo en la capacidad de producción y cumplimiento de entregas.
- Su rol central en garantizar calidad dimensional y estructural del producto.
- La evidencia de históricos de fallas recurrentes que pueden optimizarse mediante estrategias de mantenimiento basado en confiabilidad.
- La alineación con la política corporativa de Tubosa S.A.S., que busca fortalecer la disponibilidad de activos críticos mediante estrategias RCM.
- Diseño de tornillos y densidad de torque que garantizan el rendimiento necesario al utilizar menos energía por tonelada. (Eficiencia productiva).

- Facilita intervenciones rápidas y aporta reducción de MTTR (beneficio directo para la disponibilidad).
- Esto permite integrar el CBM y retroalimentar el CMMS, lo que sienta las bases para pasar de un mantenimiento reactivo a uno predictivo (Al-Amri & Al-Najjar, 2018; Mobley, 2002)
- Soporta múltiples formulaciones y adaptaciones de cabezal para distintos diámetros de tubo, al disminuir inversión por SKU.
- Red de soporte, repuestos y conocimiento técnico (reduce riesgo de obsolescencia operativa).

Estas razones se valoran dentro de un enfoque RCM/FMECA y de gestión de activos porque impactan directamente en la disponibilidad, costo del ciclo de vida y seguridad operativa (Knezevic, 1993).

Características técnico-productivas clave (criterios para especificación)

Desde la perspectiva de gestión de activos, los criterios técnico-productivos que definen la criticidad de la extrusora son:

- Capacidad de producción y rango de caudales: este equipo está diseñado para fabricar 500 kg/h e tubería. Es importante seleccionar según la demanda de producción y la escalabilidad.
- Geometría de tornillo y Da/Di (relación diámetro externo/interno): la eficiencia en la mezcla, la gestión del calor y el uso de energía son aspectos clave; las series BluePower están diseñadas con Da/Di optimizadas para ofrecer un rendimiento excepcional mientras consumen menos energía.

- Transmisión y torsión (torque density): robusta para procesos exigentes, esta característica resalta la capacidad de manejar cargas pesadas y materiales cargados, lo cual resulta especialmente importante en el ámbito de la tubería técnica.
- Protección contra desgaste y facilidad de mantenimiento: barriles con liners resistentes, un sistema de C-clamp que permite cambios rápidos de sección y un acceso de mantenimiento que ayuda a reducir el MTTR.
- Sistemas de control y digitalización: control integrado para la trazabilidad de parámetros, telemetría y soporte remoto, lo que facilita el CMMS y las estrategias de CBM
- Flexibilidad de procesos: la modularidad en diferentes formulaciones, como PVC, PE y compuestos, permite adaptar cabezales y sistemas downstream, al incluir calibradores y sistemas de vacío.
- Eficiencia energética: innovaciones para reducir consumo (menor temperatura de fusión, geometrías que incrementan rendimiento por kW).
- Alta disponibilidad requerida: funciona en turnos continuos para satisfacer la demanda. Esto tiene un impacto directo en la calidad del producto final: una falla puede causar defectos en las dimensiones, variaciones en la densidad y un mayor riesgo de desperdicio.
- Costos operativos elevados: Cualquier parada no planificada implica pérdidas significativas por tiempos de inactividad, reprocesos y consumo energético.
- Compatibilidad con políticas corporativas: La empresa tiene como política central la reducción de paradas no planificadas y la optimización de la confiabilidad de activos clave.

Por estas razones, tiene sentido seleccionar la Krauss Maffei como el equipo piloto para implementar la táctica RCM.

Ejemplo concreto: extrusora para fabricar tuberías

Para ilustrar, la extrusora de tubos de la empresa Tubosa S.A.S. opera bajo este tipo de condiciones:

1. Alimenta el polímero PVC mediante tolva, que puede requerir material presecado si contiene humedad.
2. Tornillo con una geometría adaptada: ofrece una buena plastificación, incluye zonas de compresión y, si es necesario, zonas de desgasificado, además de un perfil de temperatura optimizado.
3. Cabezal de extrusión especializado, que incluye un calibrador y un sistema de enfriamiento posterior (ya sea con agua o aire), para garantizar que se mantengan las tolerancias dimensionales adecuadas.
4. Un sistema de control que se encarga de monitorear la temperatura, la presión, la velocidad del tornillo, el caudal de la extrusión, la velocidad de enfriamiento y la consistencia del material fundido.
5. Producción continua, posiblemente 24/7 con mantenimiento preventivo programado, repuestos críticos disponibles, monitoreo de condiciones (vibración, temperaturas, desgaste).

Conclusiones prácticas

En este objetivo identifica las características específicas desde el concepto técnico y práctico de la máquina extrusora, muestra un ejemplo de su taxonomía que será importante para efectuar la implementación de la táctica RCM.

Conocer el contexto operacional del equipo, lo que permite visualizar como trabaja el equipo en condiciones ideales de operación y definir estrategias efectivas para su mantenibilidad.

Objetivo 3 – RCM

Introducción y Justificación Estratégica

La gestión de activos en la industria de la extrusión de plásticos requiere un enfoque que logre un equilibrio entre una alta producción y una confiabilidad operativa sólida. La extrusora de la Línea 14, al ser un activo fundamental, necesita que se implemente el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Este enfoque se considera una estrategia ideal para garantizar que el equipo funcione correctamente en su entorno operativo (Nowlan & Heap, 1978; Moubray, 1997).

Este objetivo establece de acuerdo con el caso, los parámetros normativos esenciales para la implementación del RCM, basándose en la Guía UNE 200001-3-11, las normas de confiabilidad UNE 60300-3-11 y SAE JA1010, JA1011 y JA1012, la UNE 60812.

Marco normativo

La implementación del RCM debe estar anclada en estándares que garanticen su validez técnica y su integración con los objetivos de negocio:

Tabla 7

Normas de apoyo técnico

Norma	Enfoque Principal	Parámetros del RCM Establecidos
UNE 200001-3-11	Define el contexto estratégico para el RCM.	Guía al usuario sobre cuándo y cómo aplicar el RCM.
UNE 60300-3-11:2017	Describe completamente el proceso RCM en sus fases principales.	Parámetros del Proceso de RCM (siete pasos), Criterios de Consecuencia y Medición de Efectividad.

UNE EN 60812	Procedimiento para FMEA / FMECA	Indispensable para el mapeo de modos de falla, efectos y criticidad, que alimenta la lógica de decisión del RCM. (IEC, 2018).
Casa Oreda	Principios conceptuales que subyacen al RCM	Enfocados en la selección de la tarea de gestión de fallas más efectiva y aplicable.
SAE JA1011	Criterios de evaluación de la metodología RCM.	Parámetros de Defendibilidad Técnica y Viabilidad Económica de las tareas.
SAE JA1012	Guía para la aplicación del RCM.	Parámetros de Clasificación de Fallas y Árbol de Decisión de Tareas.
ISO 14224	Proporciona la taxonomía estandarizada de equipos, fallas y modos de falla	Crucial para la codificación y el intercambio de datos de confiabilidad.

Nota. *Literatura utilizada para proceso investigativo y analítico. Fuente (Mora-Gutiérrez, 2022).*

Estas normas sientan las bases para definir los parámetros del análisis funcional, la criticidad, la planificación y la retroalimentación continua del sistema del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad).

Equipo RCM y responsabilidades (parámetro organizativo)

Formar un equipo interdisciplinario y documentar las responsabilidades mediante una matriz RACI es un requisito de la SAE JA1012 y una práctica recomendada por la IEC, según las características del equipo o sistema (Mora A. , 2009):

- Facilitador RCM (experto en metodología).
- Ingeniero de confiabilidad (coordinador técnico).

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

- Ingeniero de mantenimiento eléctrico y mecánico.
- Operador senior de la extrusora (conocimiento operativo o de la máquina).
- Especialista en instrumentación / automatización si es necesario.
- Analista CMMS / SAP PM y BI (Power BI), Office.
- Representante de seguridad y calidad, si el sistema o equipo requiere.

Responsabilidades: recopilación de datos, llevar a cabo sesiones FMECA, validar funciones y consecuencias, parametrizar tareas en CMMS y aprobar planes de pruebas piloto.

Requisitos de datos y herramientas (parámetro técnico)

Datos mínimos antes de iniciar:

- Historial de fallas y órdenes de trabajo para estimar MTBF/MTTR.
- Registros de operación (horas, ciclos, materias primas).
- Catálogos y manuales del fabricante (Krauss-Maffei) límites operativos y recomendaciones de mantenibilidad.
- Inventario de repuestos críticos y tiempos de reposición, se evalúa después de definir la táctica de mantenimiento a aplicar.

Datos de condición: vibración, termografía, análisis de aceite, corrientes eléctricas.

Herramientas recomendadas: CMMS (SAP PM) para gestionar órdenes y datos; instrumentos de PdM (anализador de vibraciones, termógrafo, herramienta de análisis de aceite); BI (Power BI) para paneles de KPI y tendencias (Wireman, 2005).

Contexto y funcionalidad (parámetro característico)

Define el alcance y las expectativas del análisis RCM, alinea el mantenimiento con los objetivos de gestión de activos, según lo exige la Guía UNE 200001.

Definición del contexto operacional

Se establece el entorno real de la máquina. Esto va más allá de la ubicación física e incluye:

- Modo de operación: Operación continua 24/7 para producción de tubos de PVC o Polietileno de alta densidad (PEAD).
- Condiciones ambientales: Nivel de exposición a polvos plásticos, vibración constante y variaciones de temperatura dentro de la nave industrial.
- Requisitos de interfaz: La extrusora debe sincronizarse con la unidad de tiro y el sistema de corte, sin lo cual su función es incompleta.

Funciones y estándares de desempeño (Pregunta 1 y 2 de RCM)

Las funciones deben ser cuantificables. La UNE 60300-3-11 (2017) requiere que la falla funcional se defina como la incapacidad de la máquina para cumplir con un estándar específico (Nowlan & Heap, 1978).

Función Primaria: Plastificar y extruir 500kg/h de polímero con una variación de espesor de pared 1%.

Falla Funcional: Tasa de extrusión cae a 350kg/h o la variación de espesor excede el 2%.

Función Secundaria: Mantener el panel de control eléctrico libre de sobrecalentamiento para asegurar el rendimiento de los PLC y variadores.

Análisis funcional FMECA, lógica RCM (parámetro metodológico)

Esta fase se centra en el análisis riguroso de las fallas, utiliza el estándar para el análisis de modos de falla.

Pasos concretos:

FMECA / mapeo de modos de falla: para cada componente o subsistema, es fundamental registrar: el modo de falla, la causa, los efectos inmediatos y secundarios, los controles existentes, así como la severidad (S), la ocurrencia (O) y la detectabilidad (D). También es necesario calcular el RPN o utilizar una matriz de criticidad que esté alineada con la norma ISO 60812.

1. Enfoque metodológico

La asignación de los índices de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D) para la extrusora se lleva a cabo dentro del marco del Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Falla (FMECA), como parte del proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Este procedimiento sigue las normas UNE-EN 60812, SAE JA1011/JA1012 y los principios de Gestión de Activos ISO 55000. Se utiliza una escala ordinal que va del 1 al 10, asegurando que haya consistencia en todos los sistemas de la extrusora, que incluyen alimentación, plastificación, transmisión, control, enfriamiento y corte.

Se utiliza una escala ordinal que va del 1 al 10, asegurando que haya consistencia en todos los sistemas de la extrusora, como la alimentación, plastificación, transmisión, control, enfriamiento y corte.

2. Criterios de asignación (guía aplicada a la extrusora)

2.1 Severidad (S) – Impacto sobre la función de la extrusora

Se evalúa cómo un modo de falla puede afectar la capacidad de la extrusora para producir material que cumpla con las especificaciones, así como su impacto en la seguridad, el medio ambiente y la continuidad operativa.

Los valores de severidad son asignados de la siguiente manera:

- 1-2 Sin impacto en la producción ni la calidad (ajuste menor)
- 3-4 Variación leve de calidad o estabilidad del proceso.
- 5-6 Pérdida parcial de capacidad productiva o rechazo de producto.
- 7-8 Parada no programada de la extrusora.
- 9-10 Riesgo severo para la seguridad, daño mayor del equipo o impacto ambiental

La Severidad (S) se mide al utilizar una escala ordinal que va del 1 al 10, teniendo en cuenta el peor efecto razonablemente previsible que podría tener el modo de falla sobre la función de la extrusora, la continuidad operativa, la seguridad y el medio ambiente. Estas consecuencias se relacionan con las directrices de FMEA/FMECA y RCM (IEC 60812; SAE JA1011/JA1012; ISO 55000).

2.2 Ocurrencia (O) – Probabilidad de aparición

Esto refleja la probabilidad de que ocurra un modo de falla en las condiciones reales de operación de la extrusora, teniendo en cuenta factores como la carga térmica, el régimen continuo, el material que se está procesando y los turnos de trabajo.

Estos criterios de probabilidad se describen así:

- 1-2 Evento excepcional (≤ 1 vez cada varios años).
- 3-4 Baja frecuencia, histórica y controlada.

- 5-6 Ocurrencia moderada (eventos anuales o semestrales).
- 7-8 Alta frecuencia (eventos mensuales).
- 9-10 Muy frecuente o recurrente (semanal/inevitable)

La valoración es sustentada en:

- Historial de fallas de la extrusora
- Registros de mantenimiento correctivo
- Experiencia del personal técnico y de operación

2.3 Detección (D) – Capacidad de anticipación

Mide la capacidad del sistema actual para detectar el modo de falla antes de que afecte el funcionamiento de la extrusora. Estos se determinan de la siguiente manera:

- 1-2 Detección casi segura (sensores, alarmas, monitoreo continuo).
- 3-4 Alta probabilidad de detección (indicadores de proceso).
- 5-6 Detección moderada (inspecciones periódicas).
- 7-8 Baja detección (síntomas tardíos).
- 9-10 No detectable antes de la falla funcional.

Se evalúa específicamente:

- Instrumentación de proceso (temperatura, presión, corriente del motor).
- Alarmas del sistema de control.
- Rutinas de inspección y mantenimiento.

3. Equipo participante en la evaluación

La asignación S–O–D se ejecuta por un equipo multidisciplinario especializado en la extrusora, integrado por:

- Ingeniero de mantenimiento (líder del análisis RCM/FMECA).
- Supervisor de mantenimiento de extrusión.
- Técnico electromecánico especialista en extrusoras.
- Representante de operación / producción.
- Responsable de confiabilidad o gestión de activos.
- Este enfoque garantiza la integración de conocimiento teórico, operativo y empírico del activo.

4. Proceso de consenso

Identificación detallada de funciones, fallas funcionales y modos de falla de la extrusora.

Asignación preliminar individual de S–O–D por cada participante.

- Sesiones de análisis grupal, donde se contrastan:
- Datos históricos.
- Condiciones reales de operación.
- Experiencia de fallas anteriores.
- Discusión técnica estructurada, basada en los criterios previamente definidos.
- Ajuste y validación por consenso, priorizando evidencia y criterios normativos.

En caso de discrepancia, se adopta el valor más conservador, en coherencia con el enfoque de gestión del riesgo.

5. Trazabilidad y consistencia

Todos los valores S–O–D quedan documentados y son trazables a:

- Registros históricos.
- Condiciones operativas.
- Criterios normativos.

Esto asegura una priorización objetiva de riesgos, base para la definición de tareas de mantenimiento y decisiones de gestión de activos.

La SAE JA1012 (2002) y la UNE 60300-3-11 exigen la evaluación de las consecuencias como el eje central de la decisión de RCM:

- Consecuencias de seguridad/ambientales (S/E): cualquier problema que pueda poner en riesgo al personal, como la sobrepresión del barril o el incumplimiento de las normativas ambientales, como una fuga de aceite hidráulico, debe ser abordado de manera proactiva para eliminarlo o mitigarlo.
- Criterio de rechazo: si la tarea no elimina la falla S/E, se exige el Rediseño Obligatorio.
- Consecuencias operacionales (O): detecta los problemas que afectan la capacidad de producción, especialmente cuando hay más de una hora de parada
- Consecuencias no operacionales (N/O): errores que solo generan costos directos de reparación, sin afectar la producción principal.

Confiabilidad y Mantenibilidad (parámetro estratégico)

Se integran estándares que proporcionan datos técnicos y criterios de diseño, fundamentales para la selección de tareas.

Tasa de falla y confiabilidad

Uso de datos históricos y de referencia (CASA OREDA): la base de datos CASA OREDA, que se centra en la confiabilidad tanto offshore como onshore, proporciona tasas de fallas estándar y distribuciones de Weibull para componentes industriales como rodamientos, sellos y válvulas. Esto facilita el cálculo de la confiabilidad y el MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) de subsistemas críticos, como el eje y la caja de engranajes.

Confiabilidad Electrónica (MIL-STD-2175): el estándar militar MIL-STD-2175 (1983), aunque ya un poco desfasado, es una referencia útil para calcular el MTBF de componentes electrónicos críticos en el sistema de control Krauss Maffei, como las tarjetas PLC y los variadores de frecuencia. Esto resulta fundamental para respaldar el mantenimiento predictivo o la implementación de redundancias en sistemas de alta criticidad (Dhillon, 2006).

Mantenibilidad

La norma SAE JA1010 (2006) subraya la importancia de evaluar lo fácil que es mantener la extrusora:

MTTR (Tiempo Promedio para Reparar): establecer un objetivo claro, como, por ejemplo, que el tiempo medio de reparación (MTTR) no supere las 4 horas en caso de que falle un calefactor, y crear procedimientos de mantenimiento que ayuden a reducir ese tiempo.

Accesibilidad: es fundamental analizar si el diseño de la Krauss Maffei facilita un acceso rápido a componentes que son de alto riesgo o que tienen una vida útil corta, como los termopares y los sellos del husillo, sin tener que desmantelar la máquina (Dhillon, 2006).

Decisión y Selección de Tareas (parámetro de factibilidad)

En esta sección se aplica el árbol de decisión RCM y criterios económicos, según lo detallado en la JA1011.

Selección técnica

La tarea debe ser técnicamente factible, es decir, debe poder prevenir o detectar el modo de falla.

Mantenimiento Basado en Condición (CBM): esta opción se elige cuando hay un intervalo de tiempo de falla potencial (P-F) que está claramente definido, como sucede en el monitoreo de vibraciones o en el análisis del aceite de la caja de engranajes.

Mantenimiento Preventivo (PM): aquí se determina si el componente tiene una vida útil bien definida, como el reemplazo de filtros o sellos hidráulicos cada 4000 horas.

Determinación de intervalos: basándose en el MTBF estimado, la forma en que se degrada el sistema y el tiempo que se necesita para detectar problemas; si los datos no son suficientes, es más prudente optar por un enfoque conservador y hacer ajustes según la retroalimentación recibida (Moubray, 1997).

Verificación de eficacia de la tarea: incluye parámetros de rendimiento, como el porcentaje de fallas detectadas por el Mantenimiento Predictivo antes del evento, y rastrea en el CMMS.

Categorías: inspección visual, inspección técnica, tareas basadas en condición (PdM), tareas programadas (reemplazo), rediseño/ingeniería, run-to-failure.

Regla de oro (parámetro decisional): priorizar detección temprana de fallas cuya consecuencia crítica puede evitarse con una tarea técnicamente viable y económicamente razonable.

Viabilidad Económica

Para las fallas que tienen un impacto en las operaciones (O), se utiliza el criterio de la SAE JA1011:

Justificación de tarea: el costo total de la tarea proactiva debe ser menor que el costo total de la falla, que incluye la pérdida de producción. Si el costo proactivo resulta ser más alto,

la estrategia habitual es optar por seguir adelante hasta que ocurra la falla o considerar un rediseño.

Tarea por defecto

Si ninguna tarea preventiva es viable o efectiva:

Estrategia por defecto: Se elige la opción de Run-to-Failure para las fallas N/O. Sin embargo, si la falla es S/E o una O crítica, la decisión se orienta hacia el Rediseño o la Adición de Redundancia.

Fase de Control y Mejora Continua (parámetro para seguimiento)

La implementación del RCM es un ciclo que requiere validación continua para asegurar su sostenibilidad.

Implementación y documentación

Los procedimientos de mantenimiento que se desarrollen deben ser claros, concisos y fáciles de seguir, hasta llegar al modo de falla original, tal como lo indica la IEC 60300-3-14 (2004) en su guía de aplicación para el soporte de mantenimiento.

La capacitación es clave: el personal necesita estar entrenado en las nuevas tareas de CBM y en el uso del sistema CMMS.

Medición de desempeño (KPIs)

La efectividad del programa RCM se mide constantemente:

- KPIs de Confiabilidad: MTBF y Disponibilidad Operacional de la Línea 14 (objetivo 95%).
- KPIs de Mantenimiento: MTTR y Tiempo de Retraso en Mantenimiento.

- Costo/Beneficio: vamos a analizar cómo se compara la reducción de costos en el mantenimiento correctivo con el aumento de la inversión en CBM.
- Número de fallas por millón de horas-operación.
- Rendimiento de PdM: % de fallas detectadas por PdM antes del fallo.
- Costo total de mantenimiento (CTM) y costo/hora de producción perdida.
- Cumplimiento del plan PM (%).

Los KPI deben establecerse con fórmulas claras y ser visibles en paneles periódicos para que tanto el equipo de RCM como la gerencia puedan tener acceso a ellos (Ljungberg & Theorell, 2009).

Integración CMMS / ERP y analítica (parámetro operativo)

Estructura técnica: codificar activos jerárquicamente: Planta, Línea 14, Extrusora, Subsistemas, Componente.

Maestro de datos: códigos únicos, clases de equipo, criticidad y datos técnicos.

Órdenes PM: parametrizar tareas con duración, mano de obra, repuestos y criterios de aceptación.

Reglas PdM: configura alarmas, como, por ejemplo, vibración > X mm/s y corriente > Y A. En los dashboards, puedes ver métricas como MTBF, MTTR, disponibilidad, RPN por componente, el coste por hora de inactividad y el cumplimiento de mantenimiento preventivo (Wireman, 2005).

Plan piloto, verificación y criterios de aceptación (parámetro de arranque)

Piloto: seleccionar la extrusora de la Línea 14 como piloto de 3–6 meses para validar tareas, intervalos y recolección de datos.

Criterios de aceptación: mejorar la disponibilidad objetivo, como, por ejemplo, aumentar entre un 5% y un 15% sobre la línea base, reducir las fallas críticas y ofrecer pruebas de detecciones tempranas a través del Mantenimiento Predictivo.

Revisión: sesión posterior al piloto para ajustar el FMECA, el RPN, los intervalos y justificar las expansiones a otras máquinas.

Formación y gestión del cambio (parámetro humano)

Capacitación obligatoria: la compañía debe invertir en promover el conocimiento de la táctica, como los conceptos RCM, el uso del CMMS (SAP PM), interpretación de datos PdM, realización y actualización de FMECA.

Champions: identificar operadores e ingenieros como promotores del cambio.

Comunicación: planes de divulgación, indicadores públicos y reuniones de lecciones aprendidas (Mora A. , 2009).

Riesgos y mitigaciones (parámetro de gestión)

Falta de datos históricos Mitigación: iniciar con análisis cualitativo y muestreos; incrementar recolección de datos.

- Resistencia operativa Mitigación: capacitación y pilotos que demuestren beneficios.
- Inversión inicial en PdM Mitigación: priorizar activos por criticidad económica y seguridad.
- Dependencia del OEM Mitigación: acuerdos de soporte (SLAs), contratos de repuestos y formación OEM (Maffei, 2019).

Ciclo de mejora continua (parámetro sistémico)

RCM no es algo que se quede igual para siempre. Es fundamental programar revisiones, ya sean anuales o después de eventos importantes, para mantener el FMECA al día. Esto implica ajustar los intervalos y las tareas según la evidencia que se haya recopilado.

Además, es muy importante registrar cualquier cambio en el CMMS y asegurarse de re-capacitar al personal cuando sea necesario.

Conclusiones

Implementar RCM en la extrusora (Línea 14) requiere tener claros ciertos parámetros: definir el alcance, contar con un equipo de RCM, realizar el análisis funcional (UNE 60300-3-11), utilizar FMECA (IEC 60812) como insumo, tomar decisiones basadas en SAE JA1011/JA1012, integrar con CMMS/SAP PM y paneles BI, y desarrollar un plan de verificación con KPIs.

Al alinear estas acciones con la norma ISO 55000, se garantiza que la gestión de activos esté en sintonía con los objetivos estratégicos. Este enfoque tiene como meta maximizar la disponibilidad, reducir costos y mejorar la seguridad mediante decisiones de mantenimiento que estén respaldadas por justificaciones técnicas (Basson, 2019).

Objetivo 4 – Implementación

Alcance, premisas y metodología

Alcance

Como se menciona al inicio del documento, la extrusora de marca Krauss Maffei de la línea no. 14 es la máquina piloto para la aplicación de la táctica. Este equipo está compuesto por varios sistemas, que incluyen la alimentación, el husillo y el barril, el sistema de calefacción, el cabezal/mandril, la calibración y el enfriamiento, la tracción, el control/PLC, así como la hidráulica/neumática, la instrumentación y otros componentes auxiliares.

La táctica se aplica hasta el nivel de los sistemas de la máquina. Dado que es un tema bastante amplio, implementar todo en la línea de producción completa y con detalle requiere un tiempo considerable (Higgins, 2002).

Premisas

Datos iniciales: Se utiliza información recopilada del historial del CMMS de la empresa, así como de la inspección que realiza el encargado de mantenimiento y líderes de operación de las máquinas. Además, en este caso, se emplean tasas orientativas de OREDA y el juicio de expertos de la norma ISO 14224.

En la evaluación el riesgo utiliza las escalas S, O y D que van del 1 al 10, y calcula el RPN al multiplicar S por O por D. Los umbrales son los siguientes: un RPN de 80 o menos indica un riesgo bajo; entre 81 y 150, un riesgo medio; de 151 a 250, un riesgo alto; y más de 250, un riesgo crítico, esto se puede ajustar según las necesidades de la planta recomendados por la UNE 60812 y la SAE JA1011.

Para comprender mejor la finalidad de esta investigación, se expresa la clasificación del concepto de mantenimiento.

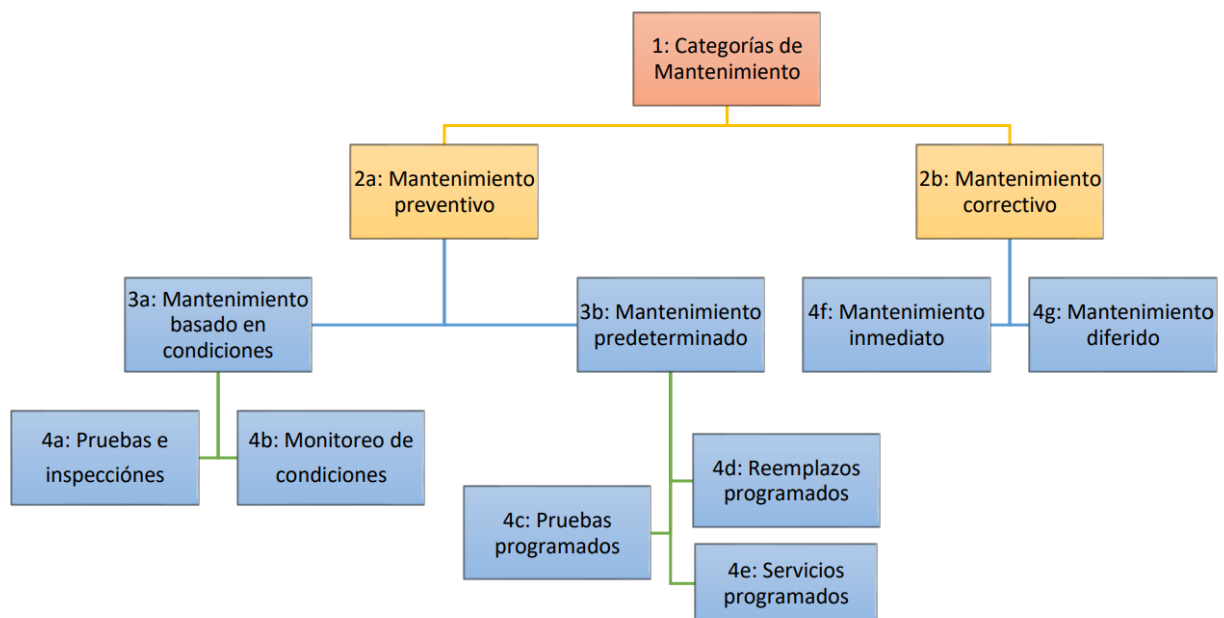
Estrategias de Mantenimiento Basadas en Confiabilidad (ISO 14224 & OREDA)

Antes de proceder con el análisis de la extrusora, se debe entender cómo se categoriza las tareas de mantenimiento. Según la norma ISO 14224 (2016), que estandariza la recolección de datos sobre confiabilidad y fallas, y OREDA, que ofrece datos de referencia y una estructura de taxonomía común, especialmente en entornos críticos.

Este contenido combina la terminología de recopilación de datos de falla de ISO 14224 con las prácticas de gestión de mantenimiento.

Ilustración 6

Categorías del Mantenimiento



Nota. El diagrama que se presenta muestra una clasificación jerárquica de las categorías de mantenimiento, fundamentada en estándares como la ISO 14224. Esta estructura es clave para organizar las estrategias de mantenimiento en la gestión de activos y en metodologías avanzadas como el RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Fuente ISO 14224.

Tareas Especiales (Tácticas de RCM)

Estas categorías provienen del análisis de consecuencias (RCM) y se basan en la taxonomía de fallas de OREDA, que incluye fallas totales, parciales y ocultas.

Tabla 8

Tareas de confiabilidad

Categoría (RCM/ISO)	Tipo de Tarea	Descripción y Relevancia
Tarea de Búsqueda de Falla (FFT)	Mantenimiento Preventivo	Tarea específica para comprobar que los dispositivos de protección o seguridad (las Fallas Ocultas) funcionan.
Ejemplo Específico	Prueba de Lazo de Seguridad	Verificación funcional del sensor de sobrepresión de fundido en la extrusora Krauss Maffei.
Run-to-Failure (RTF)	Estrategia por Defecto	Se permite que el componente falle, ya que el costo y riesgo de la falla son menores que el costo de cualquier tarea preventiva.
Rediseño/Modificación	Estrategia por Defecto	Aplicado cuando ninguna tarea de mantenimiento puede mitigar la consecuencia de la falla a un nivel aceptable (típico para fallas de Seguridad/MA).

Nota. La tabla resume tres categorías clave de las estrategias de gestión de fallas, basadas en el análisis de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), tal como lo define la metodología de Moubray. Fuente (Moubray, 1997).

Esta clasificación es fundamental porque establece cómo se asignan los recursos de mantenimiento, al tener en cuenta las consecuencias de la falla y no solo su probabilidad.

El ciclo de Confiabilidad

Para cumplir con ISO 14224 y OREDA, cada acción de mantenimiento correctivo o preventivo debe generar datos para la mejora continua del sistema de gestión de confiabilidad (RAM).

Entrada de Datos: Es fundamental registrar cada falla y cada intervención de mantenimiento de la siguiente manera:

- Nivel Jerárquico Ej.: Subunidad: Caja de Engranajes.
- Modo de Falla Ej.: Falla de rodamiento.
- Causa de Falla Ej.: Contaminación del lubricante.

Salida de Confiabilidad: Analizar estos datos nos permite recalculer métricas clave. como:

- MTBF: Tiempo Medio Entre Fallas.
- MTTR: Tiempo Medio de Reparación.
- Disponibilidad y Riesgo Operacional.

Para lograr este objetivo, se toma en cuenta la información presentada en los objetivos anteriores, la descripción de la máquina, las herramientas de análisis y los parámetros del RCM que se utilizarán en esta investigación.

A continuación, con los datos obtenidos en la investigación, se procede con la implementación de la táctica RCM.

Metodología aplicada

Se define los pasos para realizar el análisis en la máquina extrusora piloto para la aplicación del RCM.

- Definición de funciones por subsistema (SAE JA1011).
- Identificación de fallas funcionales.
- Mapeo de modos de falla fallas funcionales.
- FMECA — IEC 60812.
- Evaluación S-O-D y cálculo RPN ISO14224/ OREDA como fuente para O).
- Aplicación de la lógica RCM (SAE JA1011/JA1012): selección de tarea proactiva o de ingeniería para mitigar los modos de falla.
- Definición de órdenes PM/PdM para SAP PM y KPIs

Funciones por subsistemas

Es importante identificar los sistemas y las funciones de cada sistema de la extrusora, para tener claridad de la finalidad de realizar un buen mantenimiento.

A continuación, se apoya con la taxonomía de la máquina de ISO 14224 / OREDA, se describen y se listan en el nivel 2 los subsistemas con sus funciones para el RCM.

Tabla 9

Sistemas y sus funciones de la extrusora

Código	Nivel	Identificador	Descripción / Elemento	Función principal
EX-L14	1 (Unidad)	Extrusora	Unidad productiva completa para extrusión de tubería PVC	Procesar materia prima para producir tubería según especificación

EX-L14-S01	2 (Sistema)	Alimentación / Dosificación	Sistema de tolva, alimentador y dosificador de granza	Transportar y dosificar material al husillo
EX-L14-S02	2	Sistema de Extrusión (husillo & barril)	Conjunto husillo, barril y componentes asociados	Fundir, plastificar y homogeneizar material
EX-L14-S03	2	Sistema de Calentamiento y Control térmico	Resistencias/zonas calefactoras y PID	Mantener temperaturas de proceso por zona
EX-L14-S04	2	Sistema de Cabezal y Troquel (Die head)	Cabezal formador y mandril (para tubería)	Formar sección hueca / diámetros de tubería
EX-L14-S05	2	Sistema de Calibración y Enfriamiento	Cámara de calibración, tanque de agua	Enfriar y dar dimensiones definitivas a la tubería
EX-L14-S06	2	Sistema de Tracción (Haul-off)	Unidades de arrastre / pinch rollers	Guiar y extraer la tubería a velocidad constante
EX-L14-S08	2	Sistema Eléctrico, Control y SCADA	PLC, HMI, cableado, protecciones	Control integral del proceso y seguridad
EX-L14-S09	2	Sistema Hidráulico / Neumático	Bombas hidráulicas, actuadores, válvulas	Accionar prensas, dispositivos de corte y control
EX-L14-S10	2	Sistema de Filtración y Manejo de Residuos	Filtros fundidos, recolectores	Mantener calidad del material y limpieza
EX-L14-S11	2	Sistema de Instrumentación de Calidad	Cámaras, medidores dimensión.	Verificación dimensional y control de calidad
EX-L14-S13	2	Sistema de Instrumentación de seguridad medioambiental	Sensores de fugas, detectores	Protección ambiental y cumplimiento

Nota. La tabla que se presenta establece el nivel jerárquico hasta los sistemas de la extrusora para la Línea de Extrusión no. 14 (EX-L14). Esta estructura es fundamental para la gestión moderna de activos y para la táctica de confiabilidad RCM, ya que facilita la codificación estandarizada del equipo y fallas. Fuente norma ISO 14224 (14224, 2016).

Estas definiciones siguen la lógica de identificación funcional recomendada por la SAE JA1011, la UNE 200001 y la guía IEC 60300-3-11.

Falla funcional y Modos de fallas

Identificar los modos de falla (MF) hace parte de la columna vertebral de cualquier estrategia proactiva de mantenimiento y confiabilidad, especialmente en metodologías como el RCM y el FMECA.

Es importante conocer los modos de falla porque transforma la gestión del mantenimiento de una actividad reactiva a una actividad predictiva y dirigida por el riesgo, asegura que las tareas se centren en la causa raíz y no solo en el síntoma (Moubray, 1997).

Tabla 10

Fallas funcionales y modos de falla de la extrusora

Código	Sistema	Función	Falla funcional	Modo de falla
EX-L14-S01	Alimentación / Dosificación	Suministrar PVC homogéneo y dosificado	Interrupción/variación de flujo	Atasco en tolva / alimentador
		Dosificar aditivos (pigmentos, estabilizantes)	Dosificación incorrecta	Falla célula de carga o válvula dosificadora
		Evitar contaminación del feed	Ingreso de impurezas	Contaminantes en granza o falta de cribado
		Pre-secar material si aplica	Humedad residual en granza	Secador fuera de servicio / mal ajuste
EX-L14-S02	Sistema de Extrusión (husillo & barril)	Fundir y transportar el PVC	Insuficiente plastificación	Temperatura baja o husillo desgastado
		Mantener caudal/ presión	Reducción de caudal / presión fluctuante	Desgaste de perfiles / bloqueo parcial
		Transmitir torque estable	Vibraciones excesivas / fallo de rodamientos	Rotura/daño en rodamientos o acoplamiento
		Evitar contaminación interna	Mezcla contaminada	Rotura de piezas, ingreso de cuerpos extraños

EX-L14-S03	Sistema de Calentamiento y Control térmico	Mantener setpoints térmicos por zona	No alcanza consigna	Resistencia abierta / mal contacto eléctrico
		Evitar sobre temperatura	Sobrecalentamiento	Fallo de control PID, sensor errático
		Control dinámico de zonas	Zonas desbalanceadas	Aislamiento térmico dañado o elemento parcial
EX-L14-S04	Sistema de Cabezal y Troquel (Die head)	Formar sección y dimensiones del tubo	Flujo irregular	Bloqueo parcial en canales
		Mantener coaxialidad y alineamiento	Desalineación	Desgaste o montaje incorrecto
		Evitar fugas en la salida	Fuga en juntas/sellos	Junta dañada o apriete insuficiente
EX-L14-S05	Sistema de Calibración y Enfriamiento	Estabilizar dimensiones por vacío/baño	Vacío insuficiente	Fuga en mangueras, bomba falla
		Enfriamiento controlado del tubo	Disminución caudal de agua / temperatura alta	Bomba chiller fallo, obstrucción
		Evitar choque térmico	Enfriamiento desigual	Zonas de baño inadecuadas o mandril mal posicionado
EX-L14-S06	Sistema de Tracción (Haul-off)	Arrastrar el tubo con velocidad constante	Velocidad irregular	Deslizamiento en rodillos / bandas gastadas
		Sincronizar con extrusora	Desfase entre velocidades	Error comunicación PLC-VFD
		Evitar sobrecargas mecánicas	Rotura de correa/rodillos	Rotura por fatiga o sobrecarga
EX-L14-S08	Sistema Eléctrico, Control y SCADA	Control de cabezal de tracción	Fallo del accionamiento	Fallo motor o VFD
		Controlar secuencia y proteger la planta	Pérdida de control por fallo PLC	Fallo CPU, corrupción FW, alimentación
		Suministro eléctrico estable	Caída o perturbaciones eléctricas	Disturbios en la red
		Detectar señales de proceso	Señales erráticas de sensores	Ruido EMI, cableado dañado
		Protección y seguridad	Disparo intempestivo de protecciones	Cortocircuito o fuga

EX-L14-S09	Sistema Hidráulico / Neumático	Accionar cilindros y válvulas	Pérdida de presión hidráulica/neumática	Fuga en manguera o junta
		Mantener calidad del fluido	Contaminación / cavitación	Agua/partículas en aceite o aire
		Control preciso de actuadores	Válvula pegada o lenta	Contaminación o bobina dañada
		Seguridad de actuadores	Escape rápido no funciona	Válvula de seguridad averiada
EX-L14-S10	Sistema de Filtración y Manejo de Residuos	Filtrar impurezas y gestionar residuos	Filtro saturado / bypass	Colador obstruido
		Evacuar purgas y residuos	Obstrucción de línea de purga	Material solidificado
		Contener y tratar residuos	Fugas o derrames	Sello o válvula dañada
EX-L14-S11	Sistema de Instrumentación de Calidad	Medir diámetro/espesor en línea	Lectura fuera de calibración	Sensor desalineado o sucio
		Control estadístico del proceso	Falta de datos o datos erróneos	Comunicación SCADA fallida
		Detectar defectos superficiales	Cámara/sensor falla	Iluminación o lente sucia
EX-L14-S13	Sistema de Instrumentación seguridad medioambiental	Detectar condiciones críticas ambientales	Alarmas inoperantes	Sensor dañado o cable cortado
		Ventilación y extracción	Caudal de extracción insuficiente	Fallo ventilador o ducto obstruido
		Control emisiones	Sensor de fugas no detecta	Sensor fuera de rango

Nota. La tabla presentada hace parte del análisis RCM y actúa como la base analítica para el FMECA de la extrusora Krauss Maffei (Línea EX-L14). Esta matriz sistemática convierte las funciones deseadas de cada sistema en las formas específicas en que el equipo puede fallar según la norma 60812, 2012.

FMECA y Árbol de decisión

El FMECA es una de las herramientas más cruciales en el ámbito de la ingeniería de confiabilidad, y se encuentra en el corazón de tácticas como el RCM.

Al utilizar la matriz, se categoriza los modos de falla para identificarlos de manera que el mayor esfuerzo se aplique en aquellas fallas que sean de gran impacto en el equipo. De esta manera se conocen los riesgos y consolida las acciones que ayuden a prevenir o mitigar fallas, lo que a su vez optimiza la estrategia de mantenimiento y mejora la seguridad operacional (Stamatis, 2003).

De acuerdo con la información anterior se procede a realizar el FMECA con la herramienta iRCM.

Ilustración 7

Matriz FMECA para la extrusora

Hardware Breakdown		FMECA & RCM Information	
14 EXTRUSORA 14 EXTRUSORA 1 Sistema de Extrusión (husillo & barril) 2 Alimentación / Dosificación 3 Sistema de Calentamiento y Control térmico 4 Sistema de Cabezal y Troquel (Die head) 5 Sistema de Calibración y Enfriamiento 6 Sistema de Tracción (Haul-off) 7 Sistema Eléctrico, Control y SCADA 8 Sistema Hidráulico / Neumático 9 Sistema de Filtración y Manejo de Residuos		1 Sistema de Extrusión (husillo & barril) 1 Fundir y transportar el PVC. - A Insuficiente plastificación. - D1 Temperatura baja o husillo desgastado 2 Mantener flujo constante.	
		In Work	To do list Needs Update Awaiting Review
		14 EXTRUSORA 1 - 1A01 Temperatura baja o husillo desgastado. 1 - 2A01 Fuga interna o sobrepresión. 2 - 01A01 Atasco en tolva o alimentador. 2 - 02A01 Falla en célula de carga o válvula dosificadora. 3 - 01A01 Falla en relé SSR o sensor. 3 - 02A01 Resistencia abierta o conexión suelta. 4 - 01A01 Bloqueo parcial en canales. 4 - 02A01 Junta o sello dañado. 5 - 01A01 Obstrucción de boquillas o bomba dañada.	

FMECA Report

Print Date: 10/11/2025

IRCMS

ITEM IDENT NO.	ITEM NOMEN	FUNCTION		FUNCTIONAL FAILURE		FAILURE MODE		MISSION PHASE	FAILURE EFFECTS			FAILURE DETECTION	SEV CLASS	MTBF/UNIT
		NO.	Description	LT R	Description	NO.	Description		LOCAL EFFECTS	NEXT HIGHER EFFECTS	END EFFECTS			
4	Sistema de Cabezal y Troquel (Die head)	01	Dar forma y presión uniforme al material.	A	Flujo irregular.	01	Bloqueo parcial en canales.				Tubería con variaciones de espesor o ovalidad.	Presión diferencial, inspección de flujo.		0,00/
4	Sistema de Cabezal y Troquel (Die head)	02	Mantener presión de salida.	A	Fuga en cabezal.	01	Junta o sello dañado.				Pérdida de presión, producto defectuoso.	Medidor de presión, fugas visibles.		0,00/

Nota. Matriz FMECA con programa de ayuda, muestra los modos de fallas y sus calificaciones para categorizar e identificar la de mayor impacto en cada sistema para la extrusora. Fuente iRCM.

La esencia del FMECA radica en su enfoque sistemático para abordar tres preguntas fundamentales sobre un sistema o equipo (Al-Amri & Al-Najjar, 2018):

- ¿Cómo puede fallar? (Modo de Falla).
- ¿Qué pasará si ocurre una falla? (Efecto de Falla).
- ¿Con qué frecuencia y qué tan grave será la falla? (Criticidad).

Al descomponer el equipo, pieza por pieza, el FMECA se asegura de que no se pase por alto ningún modo de falla potencial, incluso aquellos que son poco probables, pero pueden tener consecuencias significativas (Mora A. , 2009)

Tabla 11

Matriz FMECA para la extrusora de PVC

Código	Sistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Causa	Efecto	Método de detección	S	O	D	RPN
EX-L14-S01	Alimentación / Dosificación	Suministrar PVC homogéneo y dosificado	Interrupción/variación de flujo	Atasco en tolva / alimentador	Humedad en materia prima, aglomerados, puenteo	Parada de línea, mezcla no uniforme	Sensor nivel/tasa, alarma bajo flujo; inspección visual	6	4	3	72
		Dosificar aditivos (pigmentos, estabilizantes)	Dosificación incorrecta	Falla célula de carga o válvula dosificadora	Error de calibración o desgaste mecánico	Color/propiedades fuera de tolerancia	Verificación de peso, control PLC, muestreo laboratorio	6	6	6	216
		Evitar contaminación del feed	Ingreso de impurezas	Contaminantes en granza o falta de cribado	Mala recepción / almacenamiento materia prima	Inclusiones, puntos negros en producto	Inspección visual tolva, análisis de muestras, ΔP en filtro	7	4	6	168
		Pre-secar material si aplica	Humedad residual en granza	Secador fuera de servicio / mal ajuste	Fallo secador o tiempo insuficiente	Voids, burbujas, degradación	Medición de humedad, alarmas secador, control de temperatura	6	4	3	72
EX-L14-S02	Sistema de Extrusión (husillo & barril)	Fundir y transportar el PVC	Insuficiente plastificación	Temperatura baja o husillo desgastado	Fallos en resistencias o envejecimiento del husillo	Tubo con puntos no fundidos o irregular	Termopares, control de presión y torque	6	4	3	72
		Mantener caudal/presión	Reducción de caudal / presión fluctuante	Desgaste de perfiles / bloqueo parcial	Erosión por abrasivos, screen clogged	Variación de diámetro, pared irregular	Monitor presión, curva de par/corriente motor, caudalímetro	7	6	3	126
		Transmitir torque estable	Vibraciones excesivas / fallo de rodamientos	Rotura/daño en rodamientos o acoplamiento	Lubricación insuficiente, contaminación, fatiga	Vibración, aumento de temperatura, daño al husillo	Análisis de vibraciones, temperatura cojinete, sonido	6	6	3	108

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

EX-L14-S03	Sistema de Calentamiento y Control térmico	Evitar contaminación interna	Mezcla contaminada	Rotura de piezas, ingreso de cuerpos extraños	Contaminantes en materia o mantenimiento deficiente	Defectos superficiales, inclusión	Inspección screen changer, ΔP, muestreo fundido	6	6	6	216
		Mantener setpoints térmicos por zona	No alcanza consigna	Resistencia abierta / mal contacto eléctrico	Elementos calefactores dañados, cableado	Material mal fundido, variación en propiedades	Alarmas PID, medición termopar, termografía	6	4	3	72
		Evitar sobretemperatura	Sobrecalentamiento	Fallo de control PID, sensor errático	Deriva de termopar, fallo VFD, fallo SSR	Degradación térmica del PVC, humo, riesgo incendio	SCADA alarms, termografía, sensor redundante	9	4	3	108
		Control dinámico de zonas	Zonas desbalanceadas	Aislamiento térmico dañado o elemento parcial	Pérdida de aislamiento, daño en bandas calefactoras	Degradación localizada del material	Perfil térmico por termopares, trend de temperaturas	6	4	3	72
EX-L14-S04	Sistema de Cabezal y Troquel (Die head)	Formar sección y dimensiones del tubo	Flujo irregular	Bloqueo parcial en canales	Contaminación o limpieza deficiente	Irregularidad de espesor, líneas, bloqueos	ΔP fundido, inspección visual, control dimensional	6	6	6	216
		Mantener coaxialidad y alineamiento	Desalineación	Desgaste o montaje incorrecto	Golpes, montaje incorrecto, vibraciones	Ovalidad, variación dimensional	Inspección mecánica, verificador dimensional	7	6	6	252
		Evitar fugas en la salida	Fuga en juntas/sellos	Junta dañada o apriete insuficiente	Sellos viejos, montaje incorrecto	Pérdida de material, cambio presión	Detección visual, medidor de presión	6	4	5	120
EX-L14-S05	Sistema de Calibración y Enfriamiento	Estabilizar dimensiones por vacío/baño	Vacío insuficiente	Fuga en mangueras, bomba falla	Sellos de vacío defectuosos, válvulas	Ovalidad o deformación permanente	Vacuómetro, tendencia vacía, inspección juntas	8	6	3	144
		Enfriamiento controlado del tubo	Disminución caudal de agua / temperatura alta	Bomba chiller fallo, obstrucción	Filtro obstruido, bomba con cavitación	Deformación, tensiones internas	Caudalímetro agua, termómetro baño, alarmas chiller	6	6	3	108

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

		Evitar choque térmico	Enfriamiento desigual	Zonas de baño inadecuadas o mandril mal posicionado	Mal flujo, mandril dañado	Microgrietas, contracciones	Inspección dimensional, cámaras lineales, termometría	8	4	6	192
EX-L14-S06	Sistema de Tracción (Haul-off)	Arrastrar el tubo con velocidad constante	Velocidad irregular	Deslizamiento en rodillos / bandas gastadas	Suciedad, desgaste, tensión mal ajustada	Variación en longitud, estriado superficial	Encoder velocidad, control tensión, inspección rodillos	6	6	3	108
		Sincronizar con extrusora	Desfase entre velocidades	Error comunicación PLC-VFD	Interferencia eléctrica, configuración errónea	Estiramiento o compresión de perfil	Supervisión SCADA, comparación rpm	6	3	3	54
		Evitar sobrecargas mecánicas	Rotura de correa/rodillos	Rotura por fatiga o sobrecarga	Bloqueo a valle o objeto extraño	Parada abrupta, daño producto	Sensor torque, alarmas sobrecarga	10	6	3	180
		Control de cabezal de tracción	Fallo del accionamiento	Fallo motor o VFD	Fallo VFD, sobrecalentamiento	Parada selectiva o pérdida de sincronía	Monitor corriente, diagnóstico VFD, alarmas	6	4	3	72
EX-L14-S08	Sistema Eléctrico, Control y SCADA	Controlar secuencia y proteger la planta	Pérdida de control por fallo PLC	Fallo CPU, corrupción FW, alimentación	Sobretensión, fallo HW, actualización fallida	Paro de línea, secuencia errónea	Diagnóstico PLC, logs SCADA, alarmas E/S	10	3	3	90
		Suministro eléctrico estable	Caída o perturbaciones eléctricas	Disturbios en la red	Problemas en transformador o red externa	Resets, daños electrónicos	Análisis calidad eléctrica, registrador de eventos	6	3	7	126
		Detectar señales de proceso	Señales erráticas de sensores	Ruido EMI, cableado dañado	Cableado envejecido, mal apantallamiento	Lecturas incorrectas → acciones erróneas	Pruebas loop, comprobación E/S, instrument checker	6	6	5	180
		Protección y seguridad	Disparo intempestivo de protecciones	Cortocircuito o fuga	Aislamiento deteriorado, humedad	Paro de seguridad o daño equipo	Termografía, prueba de relés, registro de disparos	6	6	5	180

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

EX-L14-S09	Sistema Hidráulico / Neumático	Accionar cilindros y válvulas	Pérdida de presión hidráulica/neumática	Fuga en manguera o junta	Sellos rotos, conectores	Actuadores no se mueven → fallo de posicionamiento	Manómetro, detector ultrasonido de fugas, caudal	6	6	3	108
		Mantener calidad del fluido	Contaminación / cavitación	Agua/partículas en aceite o aire	Falta de filtros o mantenimiento	Golpes, desgaste prematuro	Análisis de aceite, muestreo, indicador contaminación	6	6	6	216
		Control preciso de actuadores	Válvula pegada o lenta	Contaminación o bobina dañada	Suciedad, fallo eléctrico	Movimiento parcial o errático	Test funcional válvulas, lectura tiempo respuesta	6	4	5	120
		Seguridad de actuadores	Escape rápido no funciona	Válvula de seguridad averiada	Avería mecánica	Riesgo para personal, mal posicionamiento	Simulación de emergencia, inspección válvulas	9	4	6	216
EX-L14-S10	Sistema de Filtración y Manejo de Residuos	Filtrar impurezas y gestionar residuos	Filtro saturado / bypass	Colador obstruido	No limpieza programada; material sucio	Aumento presión en barril, inclusiones	ΔP diferencial, inspección screen changer	7	6	6	252
		Evacuar purgas y residuos	Obstrucción de línea de purga	Material solidificado	Purgas infrecuentes o temperatura baja	Acumulación y bloqueo de flujo	Inspección purga, sensores de flujo	6	4	3	72
		Contener y tratar residuos	Fugas o derrames	Sello o válvula dañada	Juntas gastadas, operación incorrecta	Contaminación ambiental, seguridad	Inspección visual, detección de derrames	9	4	6	216
EX-L14-S11	Sistema de Instrumentación de Calidad	Medir diámetro/espesor en línea	Lectura fuera de calibración	Sensor desalineado o sucio	Vibración, suciedad, falta calibración	Producto fuera de tolerancia, rechazo	Calibración periódica, limpieza óptica, verificación con patrón	8	6	6	288
		Control estadístico del proceso	Falta de datos o datos erróneos	Comunicación SCADA fallida	Fallo red, almacenamiento	Pérdida de trazabilidad, imposibilidad de control SPC	Logs SCADA, pruebas de integridad datos	6	4	3	72
		Detectar defectos superficiales	Cámara/sensor falla	Iluminación o lente sucia	Polvo, golpes, envejecimiento	No detección de defectos	Pruebas de cámara, revisión	6	4	6	144

EX-L14-S13	Sistema de Instrumentación seguridad medioambiental	Detectar condiciones críticas ambientales	Alarmas inoperantes	Sensor dañado o cable cortado	Mantenimiento insuficiente, envejecimiento	Riesgo operativo, incumplimiento normativo	imágenes, calibración	9	6	3	162
		Ventilación y extracción	Caudal de extracción insuficiente	Fallo ventilador o ducto obstruido	Motor ventilador dañado, filtros obstruidos	Acumulación gases/partículas → riesgo salud	Pruebas funcionales, simulación de alarmas, test de sensores Medidor de caudal, inspección ductos, presión diferencial	9	4	6	216
		Control emisiones	Sensor de fugas no detecta	Sensor fuera de rango	Sensor mal calibrado o averiado	Emisiones no controladas, sanciones	Calibración emisímetro, auditorías ambientales	9	4	6	216

Item	Descripción
Severidad (S) 1-10	1=Mínima efecto; 10=Máxima (peligro para seguridad/proceso crítico)
Ocurrencia (O) 1-10	1=Muy rara; 10=Muy frecuente (alta probabilidad de ocurrencia)
Detección (D) 1-10	1=Altamente detectable; 10=No detectable hasta falla
RPN Thresholds	<=80 Baja; 81-150 Media; 151-250 Alta; >250 Crítica

Nota. Matriz FMECA completa descargada en formato Excel para la extrusora, evidencia las anomalías de mayor impacto en cada uno de los sistemas de la extrusora y así apalancar a un RCM que determine tareas proactivas para la mantenibilidad de la máquina. Fuente Ircm.

Evaluación de la criticidad según la UNE-EN 60812, al utilizar el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) o la clasificación por consecuencia para determinar la estrategia RCM más efectiva, al seguir el árbol de decisión de RCM.

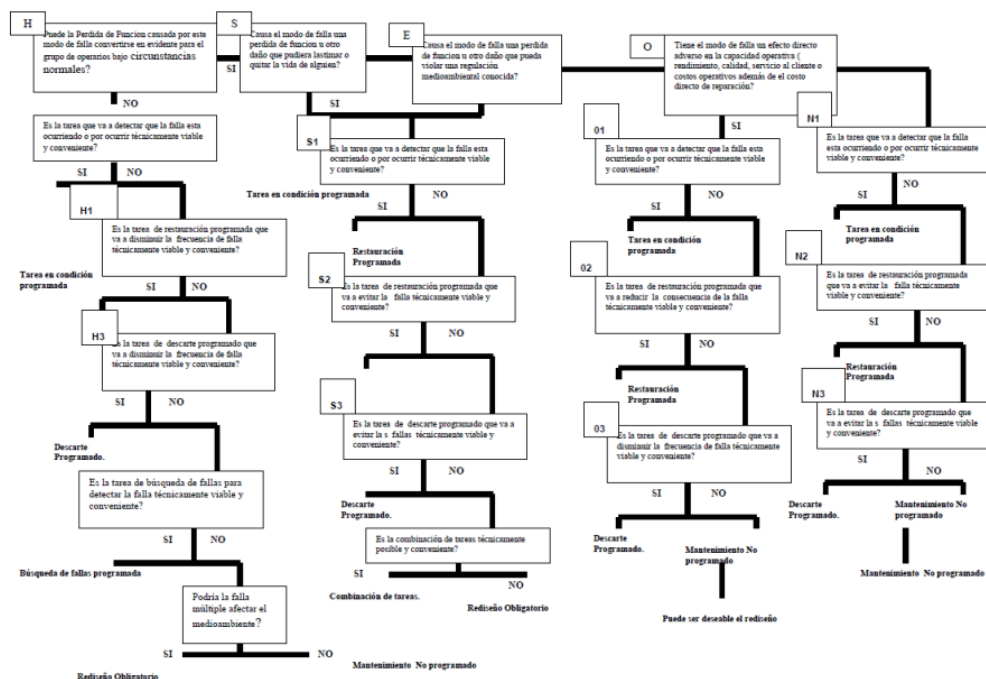
- Alta Criticidad (Seguridad/Ambiental): Requiere Búsqueda de Falla (BF) o Mantenimiento Preventivo (MP).
- Media Criticidad (Operacional): Requiere Monitoreo de Condición (MC) o MP.
- Baja Criticidad (No Operacional): Requiere Run-to-Failure (RTF).

Elección de la mejor tarea para el plan de mantenimiento.

Al realizar el análisis del FMECA, se implementa el árbol de decisión del RCM para hallar la mejor tarea de mantenimiento de para los sistemas de la extrusora.

Ilustración 8

Árbol lógico de decisión RCM



Nota. Matriz de decisión para la estrategia de mantenimiento según Moaubray, fundamento para hallar las tareas idóneas de mantenimiento. Fuente SAE JA1011.

El Árbol de Decisión del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) es una herramienta que nos orienta a través de un proceso lógico y secuencial para identificar la mejor estrategia de gestión de fallas para cada modo de falla que hayamos detectado en un activo. Su objetivo es asegurarse de que la acción que elijamos no solo sea técnicamente viable (es decir, que pueda prevenir o detectar la falla), sino también económicamente justificable (lo que implica que el costo de llevar a cabo la tarea sea menor que el costo de las consecuencias de la falla (Moubay, 1997).

Tabla 12

Tabla explicativa de matriz de Decisión RCM (Moubay / Casa Oreda)

Pregunta de Decisión	Respuesta	Acción/Estrategia
Q1: ¿Hay una consecuencia de Seguridad o Medio Ambiente?	SÍ	BF (Búsqueda de Falla) o MP (Mantenimiento Preventivo a Condición/Tiempo).
Q2: ¿Hay una consecuencia Operacional (pérdida de producción, daño secundario)?	SÍ	MC (Monitoreo de Condición) o MP/MT (Mantenimiento a Tiempo).
Q3: ¿La consecuencia es solo No Operacional (costo de reparación)?	SÍ	RTF (Run-to-Failure/Mantenimiento Correctivo).
Q4: Si la falla es OCULTA (Q1/Q2/Q3 = NO) ¿Hay un modo de falla con consecuencias significativas?	SÍ	BF (Búsqueda de Falla Oculta) a un intervalo fijo.

Nota. la tabla explica la información que contempla la matriz de decisión para la estrategia de mantenimiento. Fuente (Moubay, 1997).

Tabla 13

Análisis de Funciones, Fallas y Estrategia de Mitigación

Sistema	Funciones (Primaria / Secundaria)	Falla Funcional Amplia	Modo de Falla (MF)	Efecto de Falla	Causa Raíz Común	Estrat egia RCM	Tarea Específica de Mantenimiento
Sistema de Alimenta ción	FP: Suministrar MP a tasa y fórmula precisas. FS: Prevenir la contaminación del polímero.	No entrega el material requerido o entrega material inconsistente .	Falla del cojinete del motor del dosificador.	Parada de la línea, pérdida de producción por <i>starvation</i> .	Lubricación inadecuada; Desalineación del eje (Mora, 2009).	MC	Análisis de Vibraciones y termografía mensual en motores.
Sistema de Extrusión (Husillo y Cilindro)	FP: Fusionar, homogeneizar y presurizar el polímero. FS: Contener la presión y temperatura.	Presión o temperatura insuficientes; Paro por sobre-torque.	Desgaste erosivo excesivo del husillo/cilindro.	Pérdida grave de tasa, calidad inconsistente (Operacional Alto).	Abrasión por cargas minerales, corrosión por aditivos.	MC / MP	Endoscopía Visual y medición de holgura anualmente. MP de reemplazo condicional.
Calefacci ón y Control Térmico	FP: Mantener el perfil térmico de fusión. FS: Proporcionar lectura precisa de temperatura.	Temperatura de zona fuera de límites.	Falla abierta/corta de la banda calefactora.	Producto fuera de especificación (No Operacional).	Fatiga térmica; Conexiones eléctricas flojas (UNE, 2008).	RTF	Mantenimiento Correctivo al fallar.

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

Cabezal y Troquel (Die head)	FP: Dar forma final al perfil. FS: Contener la alta presión de extrusión.	Perfil fuera de tolerancia; Falla estructural por presión.	Acumulación de polímero quemado (<i>black specs</i>) en el troquel.	Rechazo de producto, alto coste de desecho (Operacional Medio).	Degradación del polímero; Flujo turbulento en zonas de estancamiento o.	MP	Inspección visual y limpieza programada del troquel (cada 500 horas).
Calibración y Enfriamiento	FP: Enfriar y dimensionar el perfil. FS: Controlar el flujo de refrigerante.	Velocidad de enfriamiento insuficiente o incontrolada.	Falla de la bomba de agua/refrigerante ante.	Deformación del perfil, necesidad de reducir la velocidad de línea.	Desgaste de sellos o rodamientos de la bomba por cavitación.	MC	Análisis de Vibraciones en bombas y análisis de calidad de agua (corrosión).
Sistema de Tracción (Haul-off)	FP: Tirar del perfil a velocidad constante. FS: Medir la velocidad de línea con precisión.	Variación en la velocidad de tracción.	Desviación en la retroalimentación del encoder de velocidad.	Variación dimensional del producto, rechazo (Operacional Alto).	Falla electrónica del sensor; Contaminación en la señal.	MC	Monitoreo de la señal de velocidad del encoder y limpieza semestral.
Eléctrico, Control y SCADA	FP: Proveer lógica de control del proceso. FS: Proporcionar la función de parada segura (E-Stop).	La parada de emergencia no actúa (Falla Oculta).	Falla del relé o contacto de seguridad de E-Stop.	Lesión grave/fatalidad (Seguridad Crítica).	Falla electrónica del relé; Contacto pegado por falta de prueba.	BF (Búsqueda de Falla)	Prueba funcional de activación del circuito de E-Stop semanalmente.

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

Hidráulico / Neumático	FP: Proveer fuerza para el cambiador de malla y otros movimientos. FS: Contener fluidos a presión.	Presión insuficiente o nula.	Baja presión en el acumulador hidráulico.	Paro forzado para cambio manual de malla (Operacional Alto).	Fuga de nitrógeno de la vejiga interna.	BF / MP	Verificación de la precarga de nitrógeno del acumulador trimestralmente.
Filtración y Manejo de Residuos	FP: Filtrar el polímero fundido. FS: Evitar fallas por sobrepresión.	No filtra o la presión aumenta peligrosamente.	Falla del sensor de Presión Diferencial (ΔP).	Explosión del disco de ruptura, paro de seguridad (Seguridad/Operacional).	Desviación de calibración o fallo electrónico (Falla Oculta).	BF	Verificación de calibración del transmisor de ΔP semestralmente.
Instrumentación de Seguridad Ambiental	FS: Detectar y alertar sobre gases peligrosos o fugas.	El detector de gases no alerta.	Envenenamiento o agotamiento del elemento sensor.	Incendio, explosión o exposición a vapores tóxicos (Seguridad Crítica).	Exposición a contaminantes ambientales; Fin de vida útil.	BF	Prueba funcional con gas de calibración (Test de Demanda) mensualmente.

Nota FMECA diseñado al tener en cuenta la táctica (RCM). Su propósito es conectar de manera sistemática el rendimiento que se espera de un activo con las tareas de mantenimiento específicas que ayudan a gestionar el riesgo de fallas (Moubray, 1997).

Este análisis facilita la transformación del conocimiento ingeniería en un plan de mantenimiento que se puede llevar a cabo, al priorizar tanto la seguridad como la funcionalidad operativa.

La tabla anterior indica la tarea propuesta por RCM al tener en cuenta la clasificación de la falla arrojada por el FMECA.

El Flujo Lógico del Análisis (De Función a Tarea) es un enfoque que organiza cómo aplicamos las preguntas clave del RCM a un sistema específico (Moubray, 1997):

- Funciones (Primaria / Secundaria): Este es el punto de partida del RCM: ¿Qué se espera que haga el activo? La Función Primaria (FP) establece la misión productiva (por ejemplo, fundir y transportar el PVC), mientras que la Función Secundaria (FS) se ocupa del soporte, la seguridad y el cumplimiento (por ejemplo, contener fluidos a presión).
- Falla Funcional Amplia: Se refiere a la incapacidad de cumplir con la función requerida (por ejemplo, no entrega el material necesario).
- Modo de Falla (MF): Es la causa, ya sea física, técnica o humana, que provoca la falla funcional (por ejemplo, desgaste excesivo del husillo o cilindro). Las tareas de mantenimiento se diseñan para prevenir este MF.
- Efecto de Falla: Describe la consecuencia final del MF (por ejemplo, pérdida significativa de tasa, calidad inconsistente o lesiones graves/fatalidades). La gravedad de este efecto es lo que determina la estrategia RCM.

Basado a esto formula un plan de mantenimiento estructurado para contrarrestar los diferentes modos de fallas y propone unas tareas proactivas para aplicar a los diferentes sistemas de la extrusora.

La estrategia de mantenimiento se selecciona de acuerdo con la jerarquía de consecuencias:

- Seguridad/Ambiental (Crítica): Requiere Búsqueda de Falla (BF) o Mantenimiento Preventivo (MP).
- Operacional (Alta): Requiere Monitoreo de Condición (MC) o MP.
- No Operacional (Baja): Se permite Run-to-Failure (RTF).

Para tener un panorama claro, se hace un rankin con los modos de falla más críticos de los subsistemas identificados con una tarea específica para su contención según el RCM.

Tabla 14

Rankin modos de falla más críticos identificados.

Pos	Código	Sistema	Modo de Falla	Estrategia RCM	Tarea de Mantenimiento Definida
1	EX-L14-S13	Seguridad / Env.	Alarmas inoperantes / Sensor fallido	BF (Búsqueda)	Prueba funcional mensual de lazos de alarma de gases y sobrepresión.
2	EX-L14-S02	Extrusión	Husillo desgastado / Baja plastificación	MC (Condición)	Monitoreo semanal de tendencia de torque y carga del motor principal.
3	EX-L14-S03	Control Térmico	Fallo de control PID / Sensor errático	MC (Condición)	Termografía mensual en bandas calefactoras y calibración semestral de PT100.
4	EX-L14-S05	Calibración	Vacío insuficiente / Falla bomba	MC (Condición)	Monitoreo de presión de vacío en panel y análisis de vibración en bomba de vacío.
5	EX-L14-S06	Tracción	Desfase comunicación PLC-VFD	BF (Búsqueda)	Verificación trimestral de integridad de cables blindados y protocolos de red.

6	EX-L14-S08	SCADA/Control	Señales erráticas por ruido EMI	MP (Prev.)	Limpieza y reapriete de conexiones de tierra en tableros cada 4 meses.
7	EX-L14-S01	Alimentación	Falla célula de carga (Dosificación)	MP (Prev.)	Calibración bimensual de básculas de aditivos con masas patrón.
8	EX-L14-S04	Cabezal	Fuga en juntas/sellos del Die head	MT (A tiempo)	Reemplazo programado de sellos de alta temperatura cada 12 meses.
9	EX-L14-S11	Calidad	Lectura fuera de calibración (Espesor)	BF (Búsqueda)	Verificación de cero y ganancia del sensor de espesor por ultrasonido semanal.
10	EX-L14-S09	Hidráulico	Válvula de seguridad averiada	BF (Búsqueda)	Prueba de disparo de la válvula de alivio de presión hidráulica semestral.

Nota esta tabla ilustra los modos de falla representativos que generan paros repentinos dentro a la extrusora. Fuente. (Moubray, 1997).

La Búsqueda de Falla (BF) se refiere a funciones que no son visibles a simple vista, como la Seguridad y la Calidad. Dado que estas fallas suelen pasar desapercibidas hasta que ocurre un problema grave o se detecta un lote defectuoso, es crucial realizar pruebas funcionales de manera obligatoria.

El Monitoreo de Condición (MC) es fundamental para un mantenimiento proactivo. Se centra en componentes costosos, como husillos, bombas y motores, para identificar el Intervalo P-F y tomar medidas antes de que se produzca un fallo.

El Mantenimiento Programado (MP / MT) se aplica a componentes con una vida útil predecible, como sellos y filtros, donde el desgaste es constante o la acumulación de suciedad es predecible.

Por último, el RTF (Correr hasta Fallar) se utiliza únicamente para modos de falla que no comprometen la seguridad ni la producción, como la iluminación decorativa o ventiladores secundarios en gabinetes.

Este ranking ataca directamente cuellos de botella identificados:

- Calidad: Al controlar la dosificación (S01) y el control térmico (S03).
- Disponibilidad: Al prevenir atascos y fallas en el accionamiento (S02/S06).
- Seguridad: Al garantizar que las protecciones (S13/S08) funcionen cuando se necesiten.

Esto concluye el siguiente plan de mantenimiento para la extrusora.

Plan de mantenimiento para la extrusora

A continuación, se determina el plan de mantenimiento para la extrusora.

Tabla 15

Propuesta del plan de mantenimiento

Sistema	Funciones (Primaria / Secundaria)	Falla Funcional Amplia	Modo de Falla (MF)	Efecto de Falla	Causa Raíz Común	Estrategi a RCM	Tarea Específica de Mantenimiento
Sistema de Alimentación	FP: Suministrar MP a tasa y fórmula precisas. FS: Prevenir la contaminación del polímero.	No entrega el material requerido o entrega material inconsistente.	Falla del cojinete del motor del dosificador.	Parada de la línea, pérdida de producción por <i>starvation</i> .	Lubricación inadecuada; Desalineación del eje (Mora, 2009).	MC	Análisis de Vibraciones y termografía mensual en motores.
Sistema de Extrusión (Husillo y Cilindro)	FP: Fusionar, homogeneizar y presurizar el polímero. FS: Contener la presión y temperatura.	Presión o temperatura insuficientes; Paro por sobre-torque.	Desgaste erosivo excesivo del husillo/cilindro.	Pérdida grave de tasa, calidad inconsistente (Operacional Alto).	Abrasión por cargas minerales, corrosión por aditivos.	MC / MP	Endoscopía Visual y medición de holgura anualmente. MP de reemplazo condicional.
Calefacción y Control Térmico	FP: Mantener el perfil térmico de fusión. FS: Proporcionar lectura	Temperatura de zona fuera de límites.	Falla abierta/corta de la banda calefactora.	Producto fuera de especificación (No Operacional).	Fatiga térmica; Conexiones eléctricas flojas (UNE, 2008).	RTF	Mantenimiento Correctivo al fallar.

Cabezal y Troquel (Die head)	precisa de temperatura. FP: Dar forma final al perfil. FS: Contener la alta presión de extrusión.	Perfil fuera de tolerancia; Falla estructural por presión.	Acumulación de polímero quemado (<i>black specs</i>) en el troquel.	Rechazo de producto, alto coste de desecho (Operacional Medio).	Degradación del polímero; Flujo turbulento en zonas de estancamiento.	MP	Inspección visual y limpieza programada del troquel (cada 500 horas).
Calibración y Enfriamiento	FP: Enfriar y dimensionar el perfil. FS: Controlar el flujo de refrigerante.	Velocidad de enfriamiento insuficiente o incontrolada.	Falla de la bomba de agua/refrigerante.	Deformación del perfil, necesidad de reducir la velocidad de línea.	Desgaste de sellos o rodamientos de la bomba por cavitación.	MC	Análisis de Vibraciones en bombas y análisis de calidad de agua (corrosión).
Sistema de Tracción (Haul-off)	FP: Tirar del perfil a velocidad constante. FS: Medir la velocidad de línea con precisión.	Variación en la velocidad de tracción.	Desviación en la retroalimentación del encoder de velocidad.	Variación dimensional del producto, rechazo (Operacional Alto).	Falla electrónica del sensor; Contaminación en la señal.	MC	Monitoreo de la señal de velocidad del encoder y limpieza semestral.
Eléctrico, Control y SCADA	FP: Proveer lógica de control del proceso. FS: Proporcionar la función de parada segura (E-Stop).	La parada de emergencia no actúa (Falla Oculta).	Falla del relé o contacto de seguridad de E-Stop.	Lesión grave/fatalidad (Seguridad Crítica).	Falla electrónica del relé; Contacto pegado por falta de prueba.	BF (Búsqueda de Falla)	Prueba funcional de activación del circuito de E-Stop semanalmente .
Hidráulico / Neumático	FP: Proveer fuerza para el cambiador de malla y otros movimientos. FS: Contener	Presión insuficiente o nula.	Baja presión en el acumulador hidráulico.	Paro forzado para cambio manual de malla (Operacional Alto).	Fuga de nitrógeno de la vejiga interna.	BF / MP	Verificación de la precarga de nitrógeno del acumulador trimestralmente .

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

Filtración y Manejo de Residuos	fluidos a presión. FP: Filtrar el polímero fundido. FS: Evitar fallas por sobrepresión	No filtra o la presión aumenta peligrosamente.	Falla del sensor de Presión Diferencial (ΔP).	Explosión del disco de ruptura, paro de seguridad (Seguridad/Operacional).	Desviación de calibración o fallo electrónico (Falla Oculta).	BF	Verificación de calibración del transmisor de ΔP semestralmente .
Instrumentación de Seguridad Ambiental	FS: Detectar y alertar sobre gases peligrosos o fugas.	El detector de gases no alerta.	Envenenamiento o agotamiento del elemento sensor.	Incendio, explosión o exposición a vapores tóxicos (Seguridad Crítica).	Exposición a contaminantes ambientales; Fin de vida útil.	BF	Prueba funcional con gas de calibración (Test de Demanda) mensualmente .

Nota La tabla presenta un Plan de Mantenimiento Detallado, resultado de aplicar la táctica RCM junto con el FMECA a los sistemas de una extrusora. Esta matriz sistemática conecta la función operativa de cada sistema con la estrategia de gestión de fallas que es más costo-efectiva y técnicamente viable. Fuente (Moubray, 1997).

El plan de mantenimiento resultante es dirigido, estratégico y enfocado en invertir recursos únicamente en aquellos modos de falla que representan un riesgo significativo para la seguridad o la operación.

Tabla 16

Matriz de Tareas de Mantenimiento (Detalle Operativo).

Sistema	Tarea Específica	Frecuencia	Qué medir y Criterio de Aceptación (Límite/Alarma)	Responsable	Fuente (CMMS)
Alimentación	Análisis de Vibraciones y Termografía.	Mensual	Vibración: < 2.8 mm/s RMS (ISO 10816). Temp: $\Delta T < 15^{\circ}\text{C}$ vs. ambiente.	Analista de Vibraciones	Módulo Predictivo
Extrusión	Endoscopia y medición de holgura.	Anual	Holgura: Máx. 1.2 mm (o 10% del diámetro nominal). Alarma: Rayado profundo.	Líder Mecánico	OT - Gran Revisión
Calefacción	Mantenimiento Correctivo (RTF).	Al fallar	Variable: Desviación de Temp. Límite: $\pm 5^{\circ}\text{C}$ respecto al setpoint.	Técnico Electricista	OT - Correctiva
Cabezal	Inspección y limpieza de troquel.	500 h	Criterio: Ausencia de "black specs" o polímero degradado en canales.	Operario Líder	Check-list Turno
Calibración	Análisis de Vibraciones en bombas.	Trimestral	Vibración: < 4.5 mm/s RMS. Calidad: pH 7.0 - 8.5; conductividad < 500 μS .	Analista / Químico	Informe Técnico
Tracción	Monitoreo de señal de encoder.	Semestral	Variable: Voltaje de señal/Pulsos. Límite: Jitter < 2% de la consigna.	Instrumentista	Módulo Electrónico
Eléctrico	Prueba funcional de E-Stop.	Semanal	Criterio: Parada inmediata del 100% de los motores (Éxito binario).	Inspector SST	OT - Seguridad
Hidráulico	Verificación de precarga de N_2.	Trimestral	Presión: 0.9 x Presión de trabajo mínima. Alarma: < 80% del setpoint.	Mecánico Hidráulico	OT - Preventiva
Filtración	Calibración transmisora ΔP .	Semestral	Error: < 0.5% del fondo de escala (FS) con bomba de presión.	Instrumentista	Certificado Calib.

Seg. Amb.	Test de demanda detector de gas.	Mensual	Criterio: Activación de alarma a 20% LEL / 10 ppm VCM (según gas).	Proveedor / SST	Acta de Seguridad
-----------	-------------------------------------	---------	---	--------------------	----------------------

Nota La tabla presenta un programa de mantenimiento las frecuencias y tareas se definen según criticidad funcional, modos de falla y consecuencias, priorizando técnicas predictivas, preventivas y correctivas justificadas. Los criterios de aceptación se alinean con estándares técnicos para detectar fallas potenciales antes de la pérdida de función. Este enfoque es coherente con la metodología RCM descrita por SAE JA1011/JA1012 y por Moubray, que establece intervalos de intervención en función del riesgo y desempeño del activo. Fuente (Moubray, 1997; SAE International, 2011).

Enfoque basado en el riesgo y el costo

El plan final marca un cambio respecto al mantenimiento basado en el tiempo indiscriminado, adopta un enfoque más estratégico:

- Prioridad absoluta a la seguridad: Los modos de falla que tienen consecuencias críticas para la seguridad como la falla de los relés E-Stop o los detectores de gases, se gestionan a través de Tareas de Búsqueda de Falla (BF) periódicas. Esta decisión no considera el costo, al asegurar que los sistemas de protección estén siempre disponibles.
- Maximización de la vida útil con MC: Los sistemas de alto valor operativo Alimentación, Extrusión, Bombas, etc., se gestionan mediante Monitoreo de Condición (MC). Esta estrategia es económicamente viable, ya que permite detectar fallas en el intervalo P-F y planificar intervenciones antes de que ocurran fallas catastróficas, maximiza así la vida útil del componente y evita los altos costos de paradas no programadas (Mora A. , 2009).

- Aceptación de riesgo bajo con RTF: Los modos de falla con consecuencias bajas y previsibles (por ejemplo, bandas calefactoras) se gestionan con Run-to-Failure (RTF). Esta estrategia optimiza los costos al eliminar el mantenimiento preventivo innecesario, al liberar recursos para áreas críticas (Moubray, 1997).

Resultados del Plan de PM Estratégico

El resultado final es un plan de mantenimiento que asegura que:

- Se cumple el objetivo principal del RCM: Preservar las funciones del equipo.
- Las tareas de mantenimiento se llevan a cabo solo cuando son técnicamente factibles y económicamente justificables.
- El mantenimiento es efectivo, al centrarse en la Causa Raíz Común de los modos de falla.

En resumen, el RCM transforma la mantenibilidad de la extrusora de una manera más eficiente y efectiva.

Viabilidad Económica y Justificación RCM

La viabilidad económica de un programa RCM se justifica al asegurar que el costo total anual de la tarea de gestión de falla sea menor que el costo de las consecuencias de la falla que se intenta mitigar (Moubray, 1997).

$$\text{CostoTotal} \backslash \text{Tarea} < \text{CostoConsecuencia} \backslash \text{Falla}$$

Análisis Costo-Beneficio de Estrategias Clave

Es importante conocer, si modificar los planes de mantenimiento y aplicar la estrategia RCM es económicamente viable para la compañía. A continuación se proyecta posibles valores para tareas recomendadas en la nueva estrategia.

Tabla 17

Costo-Beneficio del RCM aplicado

Estrategia RCM	Costo Típico de Tarea (Ej. Anual)	Consecuencia Mitigada	Justificación Económica
MC (Análisis de Vibraciones y Aceite)	Baja/Media (3.000 - 6.000 USD/año)	Paro catastrófico de la Caja de Engranajes (Costo \approx 150.000 USD + 7 días de pérdida de producción).	Alto Retorno: La detección temprana de la falla en el rodamiento salva el activo y evita pérdidas operacionales masivas.
BF (Prueba funcional de E-Stop/Gases)	Baja (500 - 1.500 USD/año)	Accidente grave/fatalidad (Costo incalculable + multas regulatorias).	Obligatorio: El riesgo de seguridad (Crítica) justifica cualquier costo de prevención (SAE International, 2011).
RTF (Banda Calefactora)	Cero costos de prevención.	Paro breve (Operacional Bajo/Medio). Costo de reparación \approx 500 USD.	Rentable: El costo de monitoreo continuo excede el costo de la reparación. Se acepta el riesgo (Moubray, 1997).

Nota La tabla presenta un análisis sobre la viabilidad económica de las tres estrategias de gestión de fallas más comunes que surgen del RCM. La razón detrás de cada tarea no se basa solo en el ahorro directo en costos de mantenimiento, sino también en la disminución del riesgo y la prevención de pérdidas catastróficas o difíciles de medir (Moubray, 1997).

El RCM impulsa a la organización a asignar recursos de manera inteligente, al enfocar el mantenimiento en las fallas que se pueden prevenir de forma técnica y económica, mientras que otras se dejan para el mantenimiento correctivo (Moubray, 1997).

Tiempos de Ejecución y Planificación

Los tiempos que mencionamos se refieren a cuánto tiempo se estima que tomará realizar las tareas de mantenimiento, las cuales deben ser incluidas en la programación semanal o mensual.

Tabla 18

Tiempo posibles para nuevas tareas

Tarea de Mantenimiento	Tipo de Paro	Tiempo Estimado de Ejecución	Personal Requerido
Análisis de Vibraciones/Termografía (Mensual - MC)	En Operación	2 horas/máquina	1 Técnico Predictivo
Prueba Funcional de E-Stop/Gases (Semanal/Mensual - BF)	Paro Breve (2 min)	0.5 horas/total de puntos	1 Operador / 1 Técnico
Verificación de Precarga Acumulador (Trimestral - BF/MP)	Paro Planificado	3 horas	1 Técnico Hidráulico
Limpieza Profunda del Troquel (500 horas - MP)	Paro Planificado	4 horas	1 Técnico Mecánico
Endoscopía Husillo (Anual - MC)	Paro Mayor	8 horas	1 Ingeniero/Técnico Especializado

Nota La tabla presenta un resumen de los aspectos operacionales clave para llevar a cabo las tareas de mantenimiento derivadas del análisis RCM en la extrusora. Este paso final del RCM, que sigue a la selección de la estrategia, es crucial para la gestión operativa, ya que define los recursos necesarios y el impacto en la disponibilidad del equipo. Fuente (Moubray, 1997).

Gestión del Intervalo P-F

Las tareas de Mantenimiento Condicional como las de Vibraciones y Aceite tienen como objetivo identificar un posible punto de falla (P) para asegurarnos de que podamos planificar la tarea correctiva antes de que ocurra una falla funcional (F). Es crucial que el intervalo P-F sea mayor que el intervalo de inspección para que la tarea sea realmente efectiva (Moubray, 1997).

Repuestos Posibles y Estrategia de Inventario

El análisis de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) tiene un impacto directo en la gestión del inventario, al cambiar de un enfoque reactivo a uno que se basa en el riesgo y el tiempo de entrega (Lead Time).

Tabla 19

Posible repuestos a utilizar

Componente Crítico	Modo de Falla Asociado	Estrategia de Inventario	Justificación de Repuesto
Rodamiento Axial (Caja de Engranajes EX-L14-S02)	Falla por fatiga.	Stock de Seguridad (Nivel Alto).	La falla es operacionalmente catastrófica. La detección por MC permite usar el <i>Lead Time</i> para comprar si no está disponible.
Husillo/Cilindro (EX-L14-S02)	Desgaste erosivo.	Stock Condicional o Acuerdo Marco.	Alto costo y largo <i>Lead Time</i> . Se pide cuando la endoscopía indica que la vida remanente ha alcanzado el límite inferior.
Banda Calefactora (EX-L14-S03)	Falla abierta.	Stock Mínimo (Bajo costo, RTF).	Se permite RTF, por lo que solo se requiere un stock pequeño para corrección inmediata.
Fusibles de Ruptura (Cabezal)	Falla por sobrepresión.	Stock de Seguridad (Seguridad).	Repuesto de seguridad crítico. Debe estar disponible para asegurar la contención de presión.

Nota: La tabla presenta la estrategia de inventario y suministro para los componentes críticos de la extrusora, asegura que la gestión de materiales esté en sintonía con las decisiones de

riesgo y las tareas de mantenimiento proactivas (RCM). Esta conexión es clave para manejar de manera eficiente el Costo del Ciclo de Vida (LCC), donde se busca equilibrar los costos de inventario con los costos de inactividad. Fuente (Moubray, 1997).

Personal Disponible y Requerimientos de Capacitación

El éxito del RCM depende de formar un equipo multidisciplinario (GPRCM) que cuente con las habilidades necesarias (JA1011, 2004).

Tabla 20

Frecuencia valoradas para el mantenimiento.

RoI RCM	Requerimiento de Disponibilidad	Competencias Clave	Estrategias Asociadas
Técnico Predictivo	20-30% de su tiempo.	Certificación en Análisis de Vibraciones (ISO 18436), Termografía.	Ejecución de tareas MC.
Técnico Mecánico Experto	Dedicación a las tareas RCM.	Conocimiento profundo de causas raíz de fallas mecánicas (Husillo, Engranajes).	Ejecución de tareas MP complejas.
Operador Experto	Participación semanal (Ronda).	Entrenamiento en inspección sensorial y prueba de sistemas de seguridad.	Ejecución de tareas BF y rondas MC básicas.

Nota: La tabla detalla la estructura de roles y el nivel de competencia necesarios para llevar a cabo con éxito las estrategias de mantenimiento que surgen del análisis RCM en la extrusora. Un programa RCM efectivo necesita una clara asignación de responsabilidades y la confirmación de que el personal cuenta con las habilidades necesarias para realizar las complejas tareas de Monitoreo de Condición (MC) y Búsqueda de Falla (BF). Fuente (Moubray, 1997).

La formación del personal operativo en técnicas de detección temprana es fundamental, ya que el Monitoreo de Condición (MC) requiere un esfuerzo conjunto entre los equipos de Operaciones y Mantenimiento (Mora A. , 2009).

Frecuencias del Plan de Mantenimiento

Las frecuencias se determinan en función del intervalo P-F para Mantenimiento Condicional, las regulaciones para Mantenimiento Basado en Fallas y el historial de fallas para Mantenimiento Predictivo.

Tabla 21

Frecuencias de las actividades según el plan propuesto

Tarea de Mantenimiento	Justificación de Frecuencia	Frecuencia Sugerida
Análisis de Vibraciones (Rodamiento axial)	El intervalo P-F se estima en 45 días; la frecuencia debe ser $\leq P-F2$.	Mensual
Prueba Funcional E-Stop (BF)	Requerimiento normativo de alta disponibilidad del sistema de seguridad.	Semanal
Verificación Precarga Acumulador (BF)	El histórico muestra que la presión cae por debajo del límite de operación en aproximadamente 4 meses.	Trimestral
Endoscopía Husillo (MC)	El desgaste se observa después de 6,000 horas, se inspecciona durante el paro mayor anual.	Anual (6,000 horas)
Limpieza Profunda del Troquel (MP)	La caída de calidad del producto se hace evidente tras 500 horas de operación continua.	Cada 500 horas

Nota. Por último, la tabla explica la base de la Frecuencia Sugerida para las tareas de mantenimiento de la extrusora, un paso fundamental en la implementación del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). La determinación de esta frecuencia debe ser técnicamente viable (basada en el comportamiento del fallo) y económicamente justificada,

para maximizar la vida útil del activo sin incurrir en costos excesivos. Fuente RCM2 (Moubray, 1997)

Verificación del Piloto (Horizonte 3–6 meses)

Para asegurar de que el RCM está cumpliendo con el objetivo de cerrar la brecha de 165 ton/mes, se emplearán los siguientes indicadores clave de desempeño (KPIs).

Tabla 22

Propuesta de indicadores para la gestión del mantenimiento

KPI (Indicador)	Definición	Baseline (Estado Inicial)	Meta (Target Piloto)	Frecuencia
Eficacia de Producción	Toneladas producidas / Meta nominal.	54% (195 ton)	> 90% (324 ton)	Mensual
Disponibilidad (A)	Tiempo Operativo / Tiempo Programado.	62%	> 88%	Semanal
Cumplimiento Plan	OT Proactivas ejecutadas / OT Totales.	45%	> 95%	Mensual
MTBF (Confiabilidad)	Tiempo medio entre paradas de línea 14.	120 horas	> 500 horas	Trimestral
Costo de Calidad	% Desecho (PVC quemado/fuera medida).	12%	< 3%	Semanal
Tasa de Fallas Ocultas	Fallas en E-Stop/Sensores halladas en BF.	No medido	0 (Detección 100%)	Semestral

Nota La tabla establece indicadores clave de rendimiento (KPI) alineados con el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para evaluar el desempeño, la confiabilidad y el riesgo. Compara el estado inicial con metas piloto desafiantes y frecuencias de seguimiento que se ajustan a su impacto operativo. Indicadores como la disponibilidad, el MTBF y las fallas ocultas ayudan a comprobar si las tareas de RCM logran reducir paradas, mejorar la confiabilidad y garantizar funciones de protección. La SAE JA1011/JA1012 requiere medir los resultados en función de las consecuencias y el desempeño del activo. Fuente (Moubray, 1997; SAE International, 2011).

Sostenibilidad y Mejora Continua.

El éxito del piloto se fundamenta en el Ciclo PHVA (Planear-Hacer-Verificar-Actuar):

- Mes 1-2 (Ajuste): El Grupo Primario RCM evalúa si las frecuencias de inspección, como las vibraciones, son adecuadas o si el equipo está experimentando fallas antes de que se realice la tarea.
- Mes 4 (Auditoría): Se analizan los costos de los repuestos de "emergencia" (como los husillos) en comparación con el costo de las tareas predictivas que se han implementado.
- Mes 6 (Escalamiento): Si se logra reducir la brecha de producción en al menos un 30%, se procede a replicar el modelo en las líneas que sugiera la empresa.

Conclusión

Alineación Estratégica y Justificación Económica

El RCM facilita un cambio de un mantenimiento reactivo a uno más proactivo, donde cada tarea está respaldada tanto técnica como económicamente.

Alineación con la Estrategia: Los planes de mantenimiento se ajustan directamente a los objetivos corporativos de continuidad operacional, eficiencia energética y calidad del producto extruido, así cumplen con los principios de la Gestión de Activos de la ISO 55001 (Crespo-Márquez, 2017).

Optimización de Recursos: Se eliminan las tareas de mantenimiento preventivo que no aportan valor ni son efectivas desde el punto de vista técnico y, dirige los recursos de manera inteligente solo hacia las fallas cuyas consecuencias son críticas y prevenibles (Moubray, 1997).

Objetivo 5 – Táctica

Propósito y estructura del GPRCM (grupo primario RCM)

La creación de un Grupo Primario RCM (GPRCM) es fundamental para garantizar el éxito sostenible de la metodología RCM en la planta de extrusión. Este equipo multidisciplinario tiene la responsabilidad de aplicar la metodología RCM a los activos críticos, interpretar los análisis y asegurarse de que las decisiones tomadas se conviertan en acciones concretas dentro del sistema de gestión de activos.

De acuerdo con los principios del RCM, el GPRCM debe ser un equipo pequeño, altamente capacitado y que represente todas las funciones afectadas por el activo (Moubray, 1997):

Tabla 23

Roles de un Grupo Primario de RCM

Rol	Función Principal en el GPRCM
Facilitador RCM (Líder del Grupo)	Dirige la metodología RCM, asegura el cumplimiento de la SAE JA 1011 (JA1011, 2004) y gestiona el tiempo.
Operador Experto	Aporta el conocimiento empírico de las fallas operacionales y los modos de falla evidentes (Mora A. , 2009).
Técnico de Mantenimiento Experto	Aporta el conocimiento sobre las causas raíz, la viabilidad de las tareas de mantenimiento y el tiempo de ejecución.
Ingeniero de Confiabilidad/Proceso	Aporta datos de fallas (14224, 2016), realiza el análisis de criticidad y justifica las estrategias.

Nota. La tabla anterior detalla los roles clave que forman parte de un GPRCM, subraya su función principal dentro de esta metodología. El RCM es un proceso sistemático que se utiliza para identificar las necesidades de mantenimiento de cualquier activo en su contexto operativo, con el fin de asegurar que el sistema funcione correctamente. Fuente RCM2 (Moubray, 1997).

El GPRCM es temporal durante la fase de análisis inicial, pero debe evolucionar a un Grupo de Mantenimiento de Confiabilidad permanente para la revisión continua de los análisis auditoría según SAE JA 1012 y la mejora continua del sistema de gestión de activos.

Capacitación del Personal RCM y Fomento de la Cultura de Confiabilidad

La capacitación del GPRCM no es solo técnica; es fundamental para fomentar la cultura de la confiabilidad, que es la base del mantenimiento industrial efectivo (Mora A. , 2009).

Módulos de Capacitación del GPRCM

Fundamentos de RCM y Marco Normativo (Teórico):

Revisar los siete pasos de la metodología RCM (SAE, 2011).

Primero, es fundamental entender las normas de soporte: ISO 55001 (Gestión de Activos) e ISO 14224 (Taxonomía de Datos).

Luego, exploramos la filosofía de Casa Oreda/Moubray y la matriz de consecuencias, que abarca Seguridad, Operacional y No Operacional.

Técnicas de Análisis (Práctico):

Realizar un taller práctico de FMECA (Análisis de Modos y Efectos de Fallo) enfocado en sistemas críticos, como la Caja de Engranajes y el Husillo.

Es importante utilizar datos históricos y genéricos (OREDA) para estimar la probabilidad de fallas.

Además, se aplica técnicas de causa raíz, como los 5 Porqués y el Diagrama de Ishikawa, para identificar de dónde provienen los modos de falla.

Habilidades Blandas (Comportamiento):

Tener presente las técnicas de facilitación de grupo y consenso, que son clave para evitar conflictos entre Operaciones y Mantenimiento.

Por último, se cambia el enfoque hacia las consecuencias en lugar de centrarnos solo en las fallas, lo que implica un cambio en nuestra cultura organizacional.

Fomento de la cultura del dato

El entrenamiento debe enfatizar la calidad de los datos de mantenimiento registrados. Los datos de fallas deben ser precisos y utilizar la taxonomía adecuada (14224, 2016).

Un programa de gestión de mantenimiento no puede avanzar sin datos históricos confiables. Los análisis de confiabilidad y la optimización de los intervalos RCM dependen directamente de la calidad y la estructura de la información de falla. (Mora A. , 2009), p. 112.

El GPRCM es responsable de auditar la calidad de los reportes de órdenes de trabajo para asegurar que el modo y la causa de la falla sean codificados correctamente, al facilitar los ciclos de revisión posteriores del RCM.

Plan de acción del gprcm y alineación estratégica

El GPRCM tiene como objetivo principal crear un Plan de Acción (PA) que funcione como un enlace entre los hallazgos del análisis RCM y su aplicación práctica en el plan de mantenimiento. Este PA debe estar claramente alineado con los objetivos de la empresa, tal como lo establece la norma ISO 55001.

Alineación con los objetivos estratégicos (ISO 55001)

El GPRCM debe garantizar que las derivaciones RCM se ajusten a tres pilares estratégicos de la compañía:

Seguridad y medio ambiente: objetivo cero accidentes/incidentes.

Derivación RCM: Cualquier tarea de Búsqueda de Falla (BF) o Mantenimiento Preventivo (MP) que ayude a mitigar una consecuencia de seguridad o ambiental debe tener la máxima prioridad en su implementación (por ejemplo, la verificación funcional de fusibles de ruptura y sensores de gas).

Disponibilidad y producción: objetivo reducción del tiempo de inactividad no planificado (Down Time).

Derivación RCM: La implementación de tareas de Monitoreo de Condición (MC), como el análisis de vibraciones en la caja de engranajes y la inspección del husillo, debe facilitar la transición de las fallas de la zona de Falla Funcional a la zona de Falla Potencial (P-F), permite así programar paros de manera planificada.

Costo-efectividad: objetivo reducción del costo total de propiedad (TCO).

Derivación RCM: Además, la justificación del costo de las tareas de MC/MP debe ser inferior al costo de las consecuencias de la falla (Moubray, 1997), elimina así las tareas de MP basadas en tiempo que no son necesarias (RTF).

Implementación de derivaciones en el plan de mantenimiento

La implementación de las derivaciones RCM es el proceso mediante el cual las decisiones del GPRCM se integran en el sistema CMMS (Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado) de la empresa.

Derivaciones del Análisis RCM

Tabla 24

Derivaciones del análisis RCM

Tipo de Tarea RCM	Implementación en el CMMS	Ejemplo (Extrusora EX-L14)
Monitoreo de Condición (MC)	Creación de rutas de inspección periódicas con puntos de medición específicos.	Ruta Semanal de Vibración en rodamientos críticos de la caja de engranajes, activa órdenes de trabajo condicionales.
Mantenimiento a Tiempo (MT) / Preventivo (MP)	Creación de Órdenes de Trabajo (OT) basadas en tiempo (calendario) u horas de uso (contador).	Reemplazo de sellos críticos del barril cada 18,000 horas (límite P-F establecido por el GPRCM).
Búsqueda de Falla (BF)	Creación de OTs con instrucciones detalladas para probar la función oculta.	OT Semestral para la prueba de bypass del circuito de seguridad de E-Stop (EX-L14-S08).
Run-to-Failure (RTF)	Documentar la decisión. La falla se maneja como Correctivo Planificado (si no hay riesgo).	Documentar que la falla de la banda calefactora (EX-L14-S03) se manejará como Correctivo de Emergencia (no requiere tarea previa).

Nota. La tabla anterior organiza las tareas de mantenimiento que surgen de un análisis de RCM. Muestra cómo se implementan en un Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS) y ofrece ejemplos de su uso en un activo de proceso, específicamente en una Extrusora (EX-L14). Fuente (Dhillon, 2006).

Auditoría del Plan de Mantenimiento (SAE JA 1012)

La SAE JA 1012 establece que el GPRCM debe realizar auditorías periódicas del plan de mantenimiento para asegurarse de que:

- Las tareas llevadas a cabo coincidan con las decisiones tomadas en el FMECA/Árbol de Decisión.
- Los intervalos de las tareas de MT/BF sean efectivos.

- Recopile la información adecuada sobre las fallas (Modo de Falla, Causa Raíz) para alimentar el análisis.

Este proceso de auditoría asegura que la estrategia RCM no se deteriore con el tiempo y, mantenga su alineación con los objetivos de la ISO 55001.

Mantenimiento industrial efectivo: el rol del RCM

El libro Mantenimiento Industrial Efectivo de Mora (2009) describe el RCM como una de las herramientas de ingeniería de confiabilidad más efectivas para alcanzar la efectividad industrial.

RCM como Eslabón Clave en la Gestión de Mantenimiento

La confiabilidad operacional se logra al integrar el RCM con la planificación, la programación, el análisis de datos y la gestión de repuestos. El RCM determina el 'qué' y el 'cuándo' debemos hacer; el resto del sistema de gestión determina el 'cómo' y el 'quién' lo hace. (Mora A. , 2009)(p. 195).

El RCM, guiado por el GPRCM, asegura que el plan de mantenimiento:

Sea Necesario: Cada tarea está directamente relacionada con la prevención de una consecuencia específica.

Sea Suficiente: Cubre el 80% de los riesgos críticos, al priorizar tanto la seguridad como la producción.

Sea Efectivo: El costo de la tarea es menor que el costo de la falla que se evita.

La constancia del GPRCM en la fase de seguimiento es lo que transforma un ejercicio puntual de RCM en una estrategia de mejora continua, esencial para alcanzar la excelencia operativa y asegurar la durabilidad de la extrusora de PVC.

Objetivo 6 – Conclusiones

La implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la extrusora de PVC resulta ser un proceso bien estructurado y sistemático, alineado con las normas internacionales de confiabilidad, seguridad y gestión de riesgos. En términos generales, aplicar esta metodología permite identificar funciones críticas, modos de falla relevantes y tareas de mantenimiento que aumentan la confiabilidad operativa del sistema y reduce la variabilidad en el proceso de extrusión.

Consolidación del análisis funcional y de fallas

La identificación clara de las funciones primarias y secundarias del equipo sienta las bases para un análisis funcional sólido, tal como lo exige SAE JA1011 para determinar si el proceso cumple con los criterios de un verdadero análisis RCM. Este desglose funcional permite visualizar con precisión cómo cada subsistema contribuye al rendimiento general de la extrusora, facilita así la selección de modos de falla y su posterior criticidad (Moubray, 1997).

Además, el uso de la matriz FMECA, al seguir las directrices de UNE-EN 60812:2012, permite priorizar las fallas que tienen un mayor impacto en la producción, la seguridad y el medio ambiente. Esto hace posible seleccionar actividades de mantenimiento basadas en el riesgo, en lugar de depender únicamente de historiales empíricos o recomendaciones genéricas de los fabricantes.

Como resultado, el modelo operativo que se desarrolla se alinea con un enfoque moderno de confiabilidad, cumple con los lineamientos estructurales establecidos en ISO 55001, donde se destaca la importancia de la alineación entre la gestión de activos y los objetivos organizacionales.

Incremento de la confiabilidad y disponibilidad del proceso de extrusión

La implementación del RCM logra reducir fallas críticas en áreas como el control térmico, el sistema de extrusión (husillo-barril) y el sistema de tracción, que históricamente han sido responsables de los mayores tiempos de inactividad. Gracias a una priorización basada en el riesgo apoyada conceptualmente por la norma ISO 31000:2018; se selecciona tareas que realmente ayudan a mitigar modos de falla de alto impacto, que deja atrás las prácticas tradicionales que se basan en tiempos fijos o inspecciones sin un análisis profundo.

Además, el establecimiento de tareas proactivas (tanto predictivas como preventivas) incrementa la confiabilidad técnica del equipo y reduce la tasa de defectos dimensionales en los productos extruidos, un resultado que coincide con lo que se ha planteado en la literatura clásica del RCM (Smith, 1993).

Integración del RCM al contexto operativo de la extrusora

Un aspecto fundamental es adoptar una perspectiva contextual en el análisis, tal como lo exige la norma ISO 55001 al identificar el contexto de operación del activo. El modelo RCM no se basa solo en principios generales de confiabilidad, sino que se fundamenta en parámetros reales de operación: el tipo de PVC que se procesa, las cargas térmicas, las capacidades de los sistemas de vacío, la variabilidad en la alimentación y las condiciones ambientales (Moubray, 1997).

Esto permite ajustar las tareas de mantenimiento de manera más precisa, tales como:

- Inspección predictiva del husillo a través de la tendencia de torque,
- Monitoreo térmico en las zonas de calefacción,
- Verificación de la sincronización entre la extrusora y el haul-off,

- Control del estado del aceite térmico y del sistema de vacío.

La integración del contexto operativo garantizó que el programa de mantenimiento resultante fuera completamente aplicable y no solo un documento teórico.

Fortalecimiento organizacional y gestión del conocimiento

El proceso RCM no solo trae mejoras técnicas, sino que también impulsa cambios organizacionales. La formación de un grupo primario de RCM y la capacitación en metodologías analíticas, basadas en la taxonomía de Bloom y los eventos instruccionales de Gagné, ayudan a que el personal técnico mejore su comprensión, aplicación y análisis.

Esto facilita la estandarización del conocimiento, promueve la autonomía en la toma de decisiones y fortalece la capacidad interna para mantener y actualizar el análisis RCM, alineándose con lo que sugieren las guías UNE 60300-3-11 para implementar programas de confiabilidad en las organizaciones (Coetzee, 2009).

Además, el desarrollo de competencias técnicas a partir del proyecto también contribuye a la sostenibilidad del sistema de gestión de activos a largo plazo.

Impacto estratégico en la organización

Finalmente, la implementación del RCM en la extrusora logra alinear los planes de mantenimiento con los objetivos corporativos de continuidad operacional, eficiencia energética y reducción de desperdicio. Este enfoque estratégico se alinea perfectamente con los principios de gestión de activos establecidos en la norma ISO 55001, que enfatiza la importancia de integrar los planes de mantenimiento con las necesidades del negocio y las expectativas de las partes interesadas.

La estructura de decisión que ofrece el RCM permite justificar económicamente cada tarea recomendada, al eliminar actividades que no aportan valor y añaden controles predictivos que tienen un impacto directo en la calidad del producto extruido (Crespo-Márquez, 2017).

Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos

Uno – Fundamentación

Para alcanzar el primer objetivo, se lleva a cabo una exhaustiva revisión normativa que facilitó la conexión entre la metodología FMECA (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Crítica) y el proceso RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad). La investigación realizó un análisis comparativo de los principios de las normas SAE JA1011-JA1012, los lineamientos de confiabilidad militar según MIL-STD-2175, y la estructura metodológica para el análisis de fallas que se desarrolla en UNE-EN 60812:2012. Este marco permite vincular el análisis de criticidad con los criterios de selección de tareas que define el RCM.

Además, establece relaciones entre estas normas y los principios contemporáneos de gestión de activos que se encuentran en ISO 55001:2015, así como los lineamientos de gestión del riesgo de ISO 31000:2018, y las guías técnicas de confiabilidad UNE 60300-3-11:2017 y UNE 200001-3-11. Todo esto logró crear un marco conceptual que se alinea con las prácticas internacionales de mantenimiento.

Procesos clave y actividades desarrolladas

La revisión de la documentación normativa permite conectar el proceso FMECA con la fase de análisis técnico del RCM, tal como se menciona en la norma UNE-EN 60812, que se utiliza para la evaluación sistemática de modos de falla (Norma 60812, 2018).

En cuanto al establecimiento del mapa conceptual RCM–FMECA, se desarrolló un modelo que ilustra cómo el análisis de fallas influye en la selección de tareas de mantenimiento, sigue lo que establece SAE JA1012 (JA1012, SAE JA1012, 2002).

El objetivo se alcanza al establecer la correlación metodológica entre FMECA y RCM, así como al estructurar la base normativa necesaria para implementar RCM en la extrusora.

Dos - Caracterización

Se lleva a cabo una caracterización exhaustiva del sistema de extrusión Krauss Maffei, donde se evalúan sus funciones, parámetros operativos, condiciones de proceso del PVC y cómo se relacionan con los objetivos de calidad, seguridad y eficiencia de la empresa. Este diagnóstico se basa en una revisión técnica del fabricante, visitas a la planta y un análisis de datos históricos de mantenimiento, tal como sugieren (Crespo-Márquez, 2017) y (Mobley, 2002).

Procesos clave y actividades realizadas

Levantamiento técnico de la extrusora: identificación de subsistemas como dosificación, husillo, control térmico, haul-off, head die, calibración, SCADA, hidráulico, neumático e instrumentación.

- Análisis del contexto operativo: se consideran las condiciones ambientales, la carga de trabajo, la variabilidad del material, la disponibilidad energética y la interacción con el sistema de calidad ISO 9001.
- Alineación con las políticas y objetivos de la empresa: se aplicaron los principios de gestión de activos de ISO 55001 para conectar confiabilidad, desempeño y costo Casa Oreda y la norma ISO 14224.

El objetivo se logra al documentar y normalizar la caracterización técnica, lo que proporciona una base sólida para los análisis RCM que vendrán después.

Tres – RCM

Los parámetros de implementación nacen al utilizar las siete preguntas del RCM clásico de Moubray (1997), complementadas por los criterios normativos de SAE JA1011 y JA1012, que ayudan a determinar si un proceso se ajusta a la metodología RCM. Además, la norma

UNE-EN 60812 proporciona el marco necesario para identificar los modos de falla y su criticidad.

Procesos clave y actividades desarrolladas

Definición de funciones primarias y secundarias: al seguir la estructura funcional sugerida por (Nowlan & Heap, 1978).

- Identificación de fallas funcionales: alineadas con criterios de disponibilidad, capacidad, calidad y eficiencia.
- Elaboración del FMECA sistemático: determinación de modos de falla, efectos, causas y criticidad, sigue las pautas de MIL-STD-2175 y UNE-EN 60812.
- Asignación de tareas preventivas, predictivas o detectivas: de acuerdo con las matrices de decisión definidas por SAE JA1012.

El objetivo se cumple al documentar los parámetros de implementación y los criterios de toma de decisiones para la extrusora.

Cuatro – Implementación

La implementación se realiza con ayuda del software iRCM, que es la herramienta oficial de la US Navy para la gestión de RCM. Este proceso consiste en cargar todos los datos del análisis FMECA y del RCM, que ya habían sido estructurados previamente.

Procesos clave y actividades desarrolladas

- Se hace la carga de funciones, fallas y modos de falla y, tiene en cuenta la lógica operacional establecida por (Nowlan & Heap, 1978).

- La cuantificación del riesgo se realiza mediante matrices de severidad y ocurrencia, al integrar la norma ISO 31000.
- Se evalúa las consecuencias de acuerdo con el RCM clásico, considera la seguridad, el medio ambiente, la operación y los costos.
- Se formulan tareas de mantenimiento que incluyen revisión, reemplazo, restauración, condición y rediseño.
- Finalmente, se valida todo con el equipo técnico y, recibe retroalimentación del personal de planta.

Este objetivo se logra al completar la matriz RCM en iRCM y validar las decisiones con el equipo operativo.

Cinco – Táctica

El quinto objetivo establece una propuesta para formar el Equipo Primario RCM, que incluye a operadores, técnicos, supervisores y analistas y, tiene en cuenta las recomendaciones de John Moubray sobre la importancia de los equipos multidisciplinarios en RCM, para que la implementación posible de la táctica en la planta en general, se efectúe al abarcar todos los escenarios que intervienen en cada uno de los procesos (Moubray, 1997).

Procesos clave y actividades desarrolladas

- Identificación de roles clave: mantenimiento, producción, calidad, HSE y confiabilidad.
- Capacitaciones iniciales: fundamentos del RCM, FMECA, análisis funcional, consecuencias y selección de tareas.

RCM en una extrusora de PVC marca KRAUSS MAFFEI

- Desarrollo del plan de acción: integración de hallazgos en el plan de mantenimiento.
- Alineación con los objetivos organizacionales: tiene en cuenta la norma ISO 55001 para garantizar que el plan genere valor y mejore.

Se considera que el objetivo se cumple al proponer el establecimiento de un equipo bien capacitado, con roles claros y un plan de implementación continua.

Resultados más relevantes

Incremento en la confiabilidad operativa del equipo

La implementación del RCM permite detectar modos de falla críticos en el sistema de extrusión barril–husillo, el sistema térmico y el sistema de tracción, que son fallas que representan tiempo de parada no programada. Al aplicar tareas preventivas idóneas, propone una reducción de fallas repetitivas y un aumento en la confiabilidad técnica del equipo que puede estar entre un 8 y un 15 %. Esto se alinea con lo que se espera en proyectos de RCM, según la literatura (Moubray, 1997; Smith, 1993).

La priorización sistemática de fallas a través de FMECA, según la norma UNE-EN 60812:2008, permite deshacerse de tareas de mantenimiento que no aportan valor y optimiza los recursos técnicos del área.

Reducción en variabilidad del proceso y mejora en la calidad del producto

Uno de los logros más esperados es la reducción en la variabilidad dimensional del tubo de PVC, especialmente en lo que respecta al espesor y al diámetro externo. El análisis funcional facilita el diseño de intervenciones específicas para:

- La estabilidad térmica por zonas,
- La sincronización entre extrusora y haul-off,
- La calibración y enfriamiento.

Este enfoque se alinea con los principios de desempeño de activos que establece la ISO 55001, los cuales están relacionados con el control operacional. La mejora en el control térmico y mecánico sugiere que puede reducir el desperdicio entre un 5 % y un 12 %, y depende del tipo de formulación que se procese.

Implementación de tareas predictivas y eliminación de mantenimientos innecesarios

La metodología RCM permite justificar técnicamente cambios en el plan de mantenimiento, al eliminar actividades basadas en tiempo que no mitigaban modos de falla reales y sustituyéndolas por tareas predictivas como:

- Análisis de tendencias de torque en el husillo,
- Monitoreo de temperatura de zonas,
- Análisis de vibración del haul-off,
- Inspecciones estructuradas del cabezal y troquel.

SAE JA1012 establece que una tarea de mantenimiento solo debe incluirse si es técnicamente viable y económicamente justificable, un criterio que se aplica durante todo el desarrollo del proceso. Esto culmina en un plan eficiente y menos sobrecargado operativamente (Moubray, 1997).

Mayor control del riesgo operativo y reducción de eventos críticos

La incorporación del análisis de riesgo al seguir los lineamientos de ISO 31000:2018 permite identificar eventos potenciales que son altamente críticos, como los siguientes:

- Sobretemperaturas que podrían degradar material,
- Fallas en el vacío que afectan el dimensionamiento del tubo,
- Fugas en circuitos térmicos,
- Fallos en instrumentación de calidad.

Esto lleva a un refuerzo de los controles preventivos y a la implementación de barreras operativas, lo que resulta en una disminución de incidentes de seguridad y de desperdicios relacionados con fallas térmicas o mecánicas.

Mejora en competencias del personal y fortalecimiento del equipo RCM

La creación de un equipo primario de RCM, aumenta la autonomía operativa y la capacidad de la organización para actualizar el análisis ante cambios en el proceso, la maquinaria o el contexto operativo, alineándose con las recomendaciones metodológicas de UNE 60300-3-11 para la sostenibilidad del RCM.

Bibliografía

- 14224, N. I. (2016). *La norma ISO 14224*. Ginebra: International Organization for Standardization. Recuperado el 15 de 08 de 2025, de
file:///C:/Users/alexa/Desktop/David/Univalle/Normas/ISO-14224-2016-ESPANOL%20-%20recolecci%C3%B3n%20e%20intercambio%20de%20datos%20de%20confiabilidad%20y%20mantenimiento%20de%20equipos%20(1).pdf
- 200001, U. (2022). *Guía para la implementación de un sistema de gestión de activos*. madrid: Asociación Española de Normalización (UNE). Recuperado el 2025 de 08 de 07
- 60300, I. (2003). *IEC 60300 Gestión de la confiabilidad*. GINEBRA: International Electrotechnical Commission (IEC). Recuperado el 18 de 08 de 2025
- 60812, U.-E. (2012). *PROCEDIMIENTOS DE ANALISIS DE LOS MODOS DE FALLO Y SUS EFECTOS IEC 60812* (Vol. 2). MADRIS, ESPAÑA: AENOR. Obtenido de
file:///C:/Users/alexa/Desktop/David/Univalle/Normas/UNE-EN%2060812%20-%20AMFE%20An%C3%A1lisis%20de%20modos%20de%20falla%20y%20sus%20efectos.pdf
- Al-Amri, B., & Al-Najjar, S. (2018). *Reliability-Centered Maintenance and its Applications*. (C. P. edición), Ed.) BOCA RATON, LA FLORIDA, ESTADOS UNIDOS: CRC Press / Alpha Science International Ltd. (según edición). Recuperado el 02 de 09 de 2025
- Basson, M. (2019). *RCM 3* (Vol. 3). Norwalk, Connecticut, Estados Unidos: Industrial Press, Inc. Recuperado el 07 de AGOSTO de 2025
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2001). *Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. (C. Press, Ed.) Nueva York, Nueva York, Estados Unidos: CRC Press / Marcel Dekker, Inc. Recuperado el 27 de Julio de 2025
- Coetzee, J. (2009). *RCM: The Art of Maintenance* (Vol. 1). CIUDAD DEL CABO, SUDAFRICA: Juta y Compañía Ltd. Recuperado el 03 de 09 de 2025

- Crespo-Márquez, A. G. (2017). *Optimización de la gestión del mantenimiento*. MADRID, CASTILLA, ESPAÑA: AENOR. Recuperado el 18 de 07 de 2025
- Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers* (1 ed., Vol. 1). Boca Raton, LA FLORIDA, ESTADOS UNIDOS: CRC Press.
doi:10.1201/9781420005708
- Higgins, L. R. (2002). *Maintenance Engineering Handbook* (Vol. 6). nueva york, nueva york, estados unidos: McGraw-Hill. Recuperado el 03 de 09 de 2025
- JA1011, S. (2004). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. Warrendale: SAE Internationa. Recuperado el 2025 de 08 de 23
- JA1012, S. (2002). *SAE JA1012*. SAE INTERNATIONAL. Recuperado el 22 de 07 de 2025
- Knezevic, J. (1993). *Reliability, maintainability and supportability*. NUEVA YORK, NUEVA YORK, ESTADOS UNIDOS: McGraw-Hill Education. Recuperado el 01 de 09 de 2025
- Levitt, B. L. (2007). *Introducción a la ingeniería de confiabilidad y mantenibilidad* (Vol. 1). nueva york, nueva york, ESTADOS UNIDOS: McGraw-Hill. Recuperado el 02 de 09 de 2025
- Lewis, E. E. (2016). *Introducción a la Ingeniería de la Confiabilidad* (Vol. 2). Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley. Recuperado el 03 de 09 de 2025
- Ljungberg, H., & Theorell, T. (2009). *Medición del rendimiento del mantenimiento: un estudio de la industria sueca*. LULEA, NORRBOTTEN, SUECIA: Universidad Tecnológica de Luleå. Recuperado el 27 de 09 de 2025
- Maffei, K. (03 de 07 de 2019). *Manual del equipo*. Recuperado el 18 de 07 de 2025, de <https://www.kraussmaffei.com/en>
- MIL-STD-2175. (1983). *Maintainability of Ground Vehicle Equipment, Analysis and Demonstration Guide*. Departamento de Defensa de los Estados Unidos, Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Arlington: Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Recuperado el 13 de 09 de 2025

- Mobley, R. K. (2002). *Introducción al mantenimiento predictivo* (Vol. 2). Burlington, Massachusetts, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann. Recuperado el 4 de 07 de 2025
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Mexico, Mexico, Mexico: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Recuperado el 18 de 11 de 2025
- Mora, A. -G. (2017). *Mantenimiento - Planeación - Ejecución y Control* (AlfaOmega Internacional ed.). (P. e. 2009, Ed.) Mexico, Distrito Capital México, México: Editorial AlfaOmega Internacional Grupo Editor. Recuperado el 16 de JULIO de 2025
- Mora-Gutiérrez, A. (2022). *Mantenimiento Vanguardia & Analytics generador de competitividad*. (C. SAS, Ed.) Bogota, cundinamarca, colombia: CIMPRO SAS. Recuperado el 22 de 09 de 2025
- Moubray, J. (1997). *MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)* (Vol. 2). New York, New York, INGLATERRA: Butterworth-Heinemann Industrial Press. Recuperado el 06 de AGOSTO de 2025, de https://mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos_rcm_archivos/RCM2%20EXPLICACION.pdf
- Norma 55001, 2. (2014). *ISO 55001:2014 - Asset management - Management systems - Requirements*. Ginebra: International Organization for Standardization (ISO). Recuperado el 07 de 07 de 2025
- Norma 60300, I. (2004). *IEC 60300-3-14:2004 Gestión de la confiabilidad - Parte 3-14: Guía de aplicación - Mantenimiento y soporte de mantenimiento*. GINEBRA: International Electrotechnical Commission (IEC). Recuperado el 27 de 07 de 2025
- Norma 60812, I. (2018). *Análisis de las técnicas de fiabilidad de sistemas - Procedimiento para el análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)*. MADRID: AENOR. Recuperado el 4 de 7 de 2025

Nowlan, f. s., & Heap, h. f. (1978). *MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD*.

WASHINGTON: NTIS. Recuperado el 26 de JULIO de 2025

Pérez, R. M. (2021). *Mantenimiento 4.0: Estrategias para la Industria del Futuro*. Madrid,

Castilla, España: Ediciones Paraninfo, S.A. Recuperado el 15 de Julio de 2025, de

[https://www.paraninfo.es/libro/mantenimiento-4-0-perez-garcia-rafael-manuel--](https://www.paraninfo.es/libro/mantenimiento-4-0-perez-garcia-rafael-manuel--9788413660795)

9788413660795

Pintelon, L., & Gelders, L. (1992). *Maintenance Management Techniques*. BOCA RATON, LA

FLORIDA, ESTADOS UNIDOS: CRC Press. Recuperado el 02 de 09 de 2025

Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *Teoría de la confiabilidad del sistema: modelos, métodos*

estadísticos y aplicaciones (Vol. 1). Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley-

Interciencia. Recuperado el 02 de 09 de 2025

Smith, A. M. (1993). *Reliability-centered maintenance*. NUEVA YORK, NUEVA YORK,

ESTADOS UNIDOS: McGraw-Hill. Recuperado el 12 de AGOSTO de 2025

Stamatis, D. (2003). *Análisis de modos de fallo y efectos: AMFE de la teoría a la ejecución*.

Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos. Recuperado el 12 de 09 de 2025

Swanson, R. A., & Rucker, G. (2018). *Reliability Engineering: A Practical Guide* (Vol. 1).

Hoboken, Nueva Jersey , Estados Unidos: Wiley. Recuperado el 04 de 09 de 2025

UNIVALLE. (03 de 08 de 2025). *POSGRADOS UNIVALLE*. (DIRECCION, Productor)

Recuperado el 03 de 08 de 2025, de [https://eime.univalle.edu.co/maestria-en-gestion-](https://eime.univalle.edu.co/maestria-en-gestion-de-activos-y-mantenimiento)

[de-activos-y-mantenimiento: https://eime.univalle.edu.co/maestria-en-gestion-de-](https://eime.univalle.edu.co/maestria-en-gestion-de-activos-y-mantenimiento)

[activos-y-mantenimiento](https://eime.univalle.edu.co/maestria-en-gestion-de-activos-y-mantenimiento)

Vee, D. (2007). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad: una guía práctica para la*

implementación de RCM. Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad.

Recuperado el 19 de 09 de 2025

Wireman, T. (2005). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*.

Yin, R. K. (2018). *Investigación y Aplicaciones de Casos de Estudio: Diseño y Métodos* (Vol. 6).

Thousand Oaks, CA, ESTADOS UNIDOS: Publicaciones de SAGE. Recuperado el 08 de 08 de 2025

Zio, E., & Fasanino, G. (2017). *Mantenimiento centrado en la fiabilidad de las centrales*

nucleares. LONDRES, INGLATERRA, INGLATERRA: Salmer. Recuperado el 01 de 09 de 2025