

UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS

UNIVERSIDAD DON BOSCO

**MAESTRÍA EN GERENCIA DEL MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL**



**“Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento
centrado en confiabilidad orientado a la eficiencia energética
en planta de producción de pinturas”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREPARADO PARA EL DECANATO DE
POSTGRADOS UCA Y FACULTAD DE INGENIERÍA UDB**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

Douglas Ezequiel Calderón Galán

ASESOR:

Mtro. Erick Alexander Blanco Guillen

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

2025

Rectores:

Mario Cornejo, S.J.

Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias generales:

Lidia Gabriela Bolaños Teodoro

Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decano de Facultad de Ingeniería UDB:

Moisés Roberto Guerra Menjívar

Decano de Facultad de Ingeniería UCA:

Nelly Arely Chévez Reynosa

Directores de la maestría en gerencia de mantenimiento industrial:

Diana Carolina Cruz UCA

José Luis Martínez UDB

Director de tesis:

Mtro. Erick Alexander Blanco Guillen

Estudiante: Ing. Douglas Ezequiel Calderón Galán
Docente Asesor: Mtro. Erick Alexander Blanco Guillen
Decanato de Postgrados UCA y Facultad de Ingenierías UDB

RESUMEN

En la actualidad, el entorno de competencia entre las empresas de manufactura las presiona a optimizar sus procesos operativos, así como también el consumo energético, para ser eficientes y mantenerse firmes en la competencia con las demás empresas. La planta de producción de pinturas en El Salvador que es objeto de estudio de la presente tesis, luego de las mediciones realizadas se identificó un consumo de energía eléctrica bastante alto en algunos equipos, debido a funcionamientos mal parametrizados, fallas por vibraciones, entra otras cosas. Luego de hacer ese análisis se propone la implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), con la intención de reducir el riesgo de los modos de falla en los activos definidos como críticos en la matriz de criticidad y en la definición de usos significativos de la energía. Para este estudio se analizaron datos históricos de mantenimiento, registros de consumo energético y también se realizó observación directa en planta. Se identificaron los equipos con mayor impacto en el consumo mediante la definición de USE's, donde el área de fabricación representó cerca del 48.4 % del total. A partir de esto, se aplicó una evaluación de criticidad usando herramientas como análisis de modos y efectos de falla. Con base en los modos de falla identificados, se definieron tareas predictivas y preventivas para los equipos críticos. Finalmente, el impacto del plan se evaluó con análisis de tendencias, curva CUSUM y estimaciones económicas basadas en las tarifas actuales de energía.

Se identifican detalles que, al ser corregidos mediante tareas específicas, evidenciaron una mejora en los riesgos asociados a fallas y una reducción del consumo eléctrico. Se estimó una disminución del 26 % en el costo asociado a fallas, equivalente a \$56,000.00 anuales, y un ahorro adicional por eficiencia energética de \$20,000.00. La inversión total requerida para la ejecución del plan asciende a \$45,900.00, incluyendo capacitación y equipos, obteniendo un ROI del 68.91 % y un tiempo de recuperación de 1.45 años.

Palabras clave: Mantenimiento centrado en confiabilidad, eficiencia energética, plan de mantenimiento, ahorro energético, confiabilidad operativa, industria manufacturera.

ABSTRACT

Currently, the competitive environment among manufacturing companies is pressuring them to optimize their operational processes and energy consumption in order to be efficient and remain competitive with other companies. The paint production plant in El Salvador, the subject of this thesis study, identified fairly high electricity consumption in some equipment due to poorly configured operations and vibration failures, among other things. After conducting this analysis, the implementation of a reliability-centered maintenance (RCM) plan is proposed, with the intention of reducing the risk of failure modes in assets defined as critical in the criticality matrix and in the definition of significant energy uses. For this study, historical maintenance data and energy consumption records were analyzed, and direct observation was also carried out at the plant. The equipment with the greatest impact on consumption was identified by defining USEs, with the manufacturing area accounting for around 48.4% of the total. Based on this, a criticality assessment was applied using tools such as failure mode and effects analysis. Based on the failure modes identified, predictive and preventive tasks were defined for critical equipment. The impact of the plan was evaluated using trend analysis, CUSUM curves, and economic estimates based on current electricity tariffs.

Specific operational and energy-related deficiencies were identified, and once addressed through targeted maintenance tasks, a measurable reduction in failure risk and energy consumption was observed. A reduction of 26% in failure-related costs was estimated, equivalent to \$56,000 annually, in addition to energy savings of \$20,000. The total investment required for the implementation of the plan amounts to \$45,900, including personnel training and technical equipment, resulting in a return on investment (ROI) of 68.91% and a payback period of 1.45 years.

Keywords: Reliability-Centered Maintenance, energy efficiency, maintenance plan, energy savings, operational reliability, manufacturing industry.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO.....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4 HIPÓTESIS	17
1.5 OBJETIVOS.....	18
1.5.1 Objetivo general	18
1.5.2 Objetivos específicos.....	18
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS	19
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO.....	26
2.1.1. Tipos de mantenimiento	27
2.1.1.1. Mantenimiento Correctivo	28
2.1.1.2. Mantenimiento programado.....	29
2.1.1.3. Mantenimiento preventivo	32
2.1.1.4. Mantenimiento Predictivo.....	33
2.1.1.5. Mantenimiento productivo total (TPM).....	35
2.1.1.6. Mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM).....	36
2.1.1.7. Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)	38
2.1.2. Rendimiento de los equipos	39
2.1.2.1. Tiempo promedio entre fallas (MTBF).....	39
2.1.2.2. Tiempo promedio de reparación (MTTR).....	40
2.1.3. Costos de mantenimiento	41
2.1.4. Responsabilidad medioambiental.....	45
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD.....	46
2.2.1. Ventajas del mantenimiento centrado en confiabilidad.....	53
2.2.2. Disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de los activos	54
2.2.2.1. Disponibilidad.....	54
2.2.2.2. Confiabilidad.....	55
2.2.2.3. Mantenibilidad	55

2.3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN EXPERIENCIAS DE PAISES DESARROLLADOS COMO ESTADOS UNIDOS Y SUECIA.....	56
2.3.1. Industrias que utilizan RCM en la actualidad.....	56
2.3.2. Proyección a futuro del RCM.....	57
2.3.3. Industrias de pintura que aplican RCM.....	57
2.4. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN EL SALVADOR	60
2.5. CONCLUSIONES PARCIALES	62
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS EN UNA EMPRESA DE PINTURAS EN EL SALVADOR	65
3.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD.....	65
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE LA FÁBRICA.....	66
3.2.1. Organización espacial de la planta	67
3.3. SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS.....	69
3.4. DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE SUBSISTEMAS	70
3.5. SELECCIÓN DE INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	72
3.5.1. Indicador Base 100.....	72
3.5.2. Indicador de sumas acumuladas CUSUM.....	73
3.6. IDENTIFICACIÓN DE USOS SIGNIFICATIVOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	74
3.6.1. Definición de USE según ISO 50001	74
3.6.2. Metodología aplicada para la identificación de los usos significativos de la energía	75
3.6.3. Resultados del análisis energético	77
3.6.4. Sistema integrado de gestión energética (SGEn)	80
3.7. ANÁLISIS DE CRITICIDAD ENERGÉTICO DE EQUIPOS	80
3.7.1. Metodología para el análisis de criticidad.....	80
3.7.2. Aplicación de la matriz a equipos seleccionados	81
3.7.3. Resultados de análisis de criticidad.....	83
3.8. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA.....	84
3.8.1. Selección de equipos críticos	84
3.8.2. Identificación de modos de falla.....	85
3.8.3. Matriz de efectos y modos de falla.....	86
3.9. PROPUESTAS DE PLAN DE MANTENIMIENTO	87

3.9.1. Mantenimiento por cada modo de falla	87
3.9.2. Frecuencias de mantenimiento por cada falla	87
3.9.3. Modo de falla contra tarea propuesta.	88
3.10. PLAN DE MANTENIMIENTO	88
3.11. RECURSOS	90
3.12. CONCLUSIONES PARCIALES	91
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
4.1 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE RCM	93
4.1.1. Comparación de metodologías de mantenimiento	93
4.1.2 Comparación de metodologías de mantenimiento	94
4.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	96
4.2.1 Evaluación del desempeño energético de los sistemas seleccionados ..	96
4.2.2 Evaluación del desempeño energético de los sistemas seleccionados ..	97
4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	100
4.3.1 Costos plan de mantenimiento	100
4.3.2 Estimación de ahorros energéticos y operativos:	101
4.3.3 Retorno de inversión	102
4.4 CONCLUSIONES PARCIALES	103
4.4.1 Principales hallazgos técnicos	103
4.4.2 Evaluación del impacto económico y energético	104
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	105
5.1 CONCLUSIONES.....	105
5.1.1. Identificación y gestión eficiente de los modos de falla.	105
5.1.2. Limitaciones del enfoque tradicional de mantenimiento.	105
5.1.3. Impacto positivo de la eficiencia energética.	106
5.1.4. Evaluación financiera del plan de mantenimiento.	106
5.1.5. Alineación del plan con objetivos de sostenibilidad.	106
5.2. RECOMENDACIONES	107
5.2.1. Implementar completamente el plan de mantenimiento RCM.....	107
5.2.2. Reforzar la capacitación del personal constantemente.	107
5.2.3. Hacer seguimiento continuo de los indicadores.	107
5.2.4. Ampliar el enfoque energético a otras áreas o plantas.	107
5.2.5. Aumentar la inversión en tecnología y automatización.	108
5.2.6. Trabajar en la cultura del personal operativo	108
6. REFERENCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de entradas y salidas de una máquina de producción (Montilla Montaña, 2016)	21
Figura 2: Sistema de control realimentado (Montilla Montaña, 2016)	23
Figura 3: Representación de la dinámica de un sistema de mantenimiento (Montilla Montaña, 2016)	24
Figura 4: Sistemas de mantenimiento (Montilla Montaña, 2016).....	27
Figura 5: Ciclo gráfico del mantenimiento correctivo (Montilla Montaña, 2016)	29
Figura 6: Ciclo gráfico del mantenimiento programado. (Montilla Montaña, 2016)	31
Figura 7: Ciclo gráfico básico del mantenimiento preventivo (Montilla Montaña, 2016)	32
Figura 8: Ciclo gráfico del mantenimiento predictivo. (Montilla Montaña, 2016)	34
Figura 9: Mantenimiento basado en el riesgo (Montilla Montaña, 2016).....	38
Figura 10: Comportamiento de costos fijos y variables (Montilla Montaña, 2016)	44
Figura 11: Comportamiento de costos versus ingresos (Montilla Montaña, 2016)	45
Figura 12: Plano de la fábrica (Plano con nombres modificados de uno genérico de internet)	67
Figura 13: Ciclo de mejora continua (Lázaro Flores Díaz, Israel Jáuregui Nares (CONUEE), 2020).....	75
Figura 14: Matriz de criticidad.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Patrones de falla de componentes de la industria aeronáutica en Estados Unidos (Nowlan & Heap, 1978).....	51
Tabla 2: Consumo energético en kWh de los equipos – Enero a abril de 2025.....	77
Tabla 3: Consumo anual de energía eléctrica - Proyectado en MWh	78
Tabla 4: Consumo anual en MWh, consumo porcentual y consumo acumulado.	78
Tabla 5: Ponderación matriz de criticidad	81
Tabla 6: Análisis de criticidad	82
Tabla 7: Identificación de modos de fallo.....	85
Tabla 8: Matriz de efectos y modos de falla	86
Tabla 9: Mantenimiento propuesto	87
Tabla 10: Frecuencia de mantenimiento	88
Tabla 11: Plan de mantenimiento propuesto (Adicional)	90
Tabla 12: Comparación entre mantenimiento correctivo/preventivo y RCM.....	94
Tabla 13: Reducción de costo de modos de falla.....	95
Tabla 14: Estimación de ahorro energético en MWh.....	97
Tabla 15: Datos indicador base 100 - Línea base MWh	97
Tabla 16: Datos indicador CUSUM.....	99
Tabla 17: Costos estimados.....	101
Tabla 18: Ahorro en consumo eléctrico	101

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo se desarrollan cada día nuevas tecnologías que se pueden aplicar a cualquier rubro de la industria, desde pequeños talleres hasta industrias más especializadas, como por ejemplo maquinaria pesada, equipos dedicados a la manufactura como envasadoras, etiquetadoras o paletizadoras, equipos pertenecientes al área de informática, tanto que hoy en día las nuevas generaciones perciben sumamente difícil el mundo cuando no hay energía eléctrica por algún corte programado o alguna falla, y en la actualidad no está oculto ante los ojos de nadie que como sociedad en general tenemos una cultura de consumismo y dejamos bastante de lado el ahorro energético. Toda la tecnología que se está desarrollando con el pasar del tiempo está generando también cierto calentamiento debido al uso excesivo de energía eléctrica, procesos tan sencillos como dispensar una toalla de papel están ahora automatizados y por ende el consumo eléctrico es mucho más alto que hace tiempo, generando procesos ineficientes en consumo de energía eléctrica en comparación al beneficio.

El desarrollo de sistemas generadores de energía con fuentes renovables tales como las hidroeléctricas, fotovoltaicas o sistemas eólicos, son muy importantes para disminuir los efectos negativos que genera el cambio climático y para que toda la población en general tenga acceso a fuentes de energía eléctrica. En la actualidad, los jóvenes en las escuelas, institutos o universidades se están interesando más con la investigación y el uso de energías renovables, ya que éstas contribuyen a la disminución de gases nocivos para el medio ambiente, el calentamiento global, la emisión de otros contaminantes como residuos de procesos de empresas, permitiendo que disminuya la dependencia de fuentes sucias de generación de energía y sobre todo aumentan las oportunidades de empleo en la población cercana a los lugares en donde se desarrollan los proyectos. En este sentido, en la actualidad se está observando un aumento en el uso de energía renovable, ya que hablando a escala mundial entre el periodo de 2014 a 2023 se ha tenido un crecimiento de capacidad instalada de generación de energía renovable de 128% lo cual representa un promedio de crecimiento de aproximadamente 14% anual, y El Salvador también ha participado en este crecimiento teniendo un crecimiento en capacidad instalada de 110% en ese periodo, representando un crecimiento anual del 12%, según la Agencia Internacional de Energía Renovable IRENA por sus siglas en inglés (IRENA, 2004) todo esto por medio de tecnologías como energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, solar térmica y biocombustibles.

El avance tecnológico que se observa en todos los países del mundo, especialmente los grandes países desarrollados, representa un desafío muy grande para todas las industrias presentes en el mundo, debido a que con el aumento de tecnologías viene el aumento de consumo eléctrico, los procesos son cada vez más automatizados, se introduce cada día más maquinaria a realizar tareas que antes eran realizadas por personal operativo, y están experimentando una transformación en el cómo se realizan las cosas, ya que cada vez está más aplicada la inteligencia artificial. Dentro de todas estas industrias se encuentra una en particular en el que se centran los esfuerzos de esta investigación que es la industria de la pintura. La industria de la producción de pinturas en el mundo enfrenta constantes desafíos, los cuales se ven relacionados con la optimización de sus procesos productivos, el mantenimiento de los equipos y la implementación de eficiencia energética.

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

La planta de fabricación de pinturas objeto de estudio durante la investigación es una empresa que inicia operaciones como un pequeño emprendimiento familiar en El Salvador, teniendo una visión y dispuestos a trabajar muy fuerte para convertirse en una de las plantas más importantes de la región. Con el pasar del tiempo se convierte en una de las plantas más importantes de la región, la cual se enfrenta a desafíos que son comunes dentro de la industria manufacturera de la región, en donde la eficiencia productiva y la eficiencia energética son factores clave para mantener la competitividad. En ese contexto, las plantas de producción de pinturas deben optimizar sus recursos y procesos no solo para mejorar la calidad de sus productos, sino también ser cada vez más amigables con el medio ambiente, específicamente ser eficientes en cuanto a consumo de energía. La planta de producción de pinturas se encuentra actualmente empezando a madurar un sistema integrado de gestión de la energía el cual le ha tomado a día de hoy casi diez años de implementación, iniciando desde lo más básico como certificaciones de construcción sostenible y la creación de un comité de eficiencia energética, pasando por redes de aprendizaje, establecer metas de indicadores clave de rendimiento, certificaciones en normativas ISO, hasta puntos más complejos y especializados como la planeación del montaje de una red de generadores fotovoltaicos en las galeras.

Este sistema integrado de gestión, ya está generando resultados positivos a la compañía pero aun depende completamente de un modelo de mantenimiento preventivo, el cual es sumamente importante porque previene paradas tanto en los procesos productivos como en los procesos auxiliares de la planta, pero ya que es un enfoque tradicional en simplemente prevenir las fallas, no es capaz de ir más allá y maximizar la eficiencia energética de las máquinas, ni mucho menos abordar nada de forma integral los factores de confiabilidad en los equipos y sistemas antes mencionados. En ese sentido, aprovechándose de la tecnología de automatización implementada y un buen plan de mantenimiento centrado en confiabilidad orientado a la eficiencia energética, representaría una mejora sustancial en las operaciones de la planta, volviéndola más eficiente en los procesos productivos cómo fabricación, envasado; procesos auxiliares cómo sistemas compresores o sistemas de enfriamiento; así como también en el consumo de energía eléctrica.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO

La planta de producción de pinturas cuenta con una estructura bien organizada de mantenimiento preventivo, modelo que le ha funcionado desde su fundación y el cual se ha ido fortaleciendo con el pasar de los años ya que se tiene un plan de mantenimiento bien maduro y generando buenos resultados en cuanto a disponibilidad de los equipos que se ven involucrados directamente en el proceso de la pintura, así como también los equipos que son auxiliares, pero, a pesar de todo esto la planta presenta muy claras oportunidades de mejora en cuanto a la implementación del sistema integrado de gestión de eficiencia energética. El problema principal de la planta radica en que falta un enfoque más orientado a la confiabilidad de los equipos y esto a su vez puede generar que se dé un uso ineficiente a la energía eléctrica, ya que podría existir el caso en el que se sacrifique consumo eléctrico buscando la disponibilidad del equipo, y no realizar la mejor gestión de los equipos. Por lo cual se propone realizar la implementación de un sistema de mantenimiento basado en confiabilidad y centrar los esfuerzos en la eficiencia energética, sabiendo que la sinergia entre el mantenimiento centrado en confiabilidad y la eficiencia energética conlleva una gestión más integral y sostenible de los activos, permitiendo no solo prolongar su vida útil, sino también reducir el consumo de recursos energéticos, lo cual se traduce en beneficios económicos y ambientales significativos para las operaciones industriales, es decir logrando una mayor productividad y sostenibilidad operativa a largo plazo. El objetivo principal es proponer la implementación de un plan de mantenimiento con enfoque en la metodología RCM incorporando

indicadores actuales y emergentes relacionados con el consumo de energía y eficiencia energética dentro de una planta de producción de pinturas en El Salvador generando los medios para alcanzar sostenibilidad energética y disminución en consumos de producción.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La adopción de planes de mantenimiento basados en disponibilidad y eficiencia energética es de suma importancia, especialmente para una empresa reconocida por su liderazgo y compromiso ambiental. Esta medida no solo preserva el entorno natural, sino que también puede generar beneficios económicos significativos tanto para la organización como para la industria en general. Con esta estrategia de mantenimiento, se logra una óptima gestión de recursos al priorizar la disponibilidad, lo que maximiza el tiempo de operación de los equipos, asegurando su funcionamiento fiable y eficiente para una producción constante y predecible. Se evitan así paradas no planificadas o de emergencia, así como los costos elevados asociados a estas situaciones. El cumplimiento de normativas y regulaciones, particularmente en lo que concierne a la eficiencia energética y el impacto ambiental, mejora la imagen de la empresa. La incorporación de estos aspectos en el plan de mantenimiento asegura el respeto a estas normativas, evitando sanciones o multas. En ese mismo sentido, al promover prácticas sostenibles, se contribuye a la preservación del medio ambiente y se fomenta una imagen corporativa positiva. La capacidad de garantizar un servicio o producto constante y de alta calidad gana la confianza de sus clientes y puede obtener una ventaja competitiva en el mercado.

Además, este enfoque puede servir de modelo para otras plantas en el país, contribuyendo con el desarrollo de plantas más sostenibles y sobre todo más respetuosas con el medio ambiente, que hoy en día es tan necesario.

1.4 HIPÓTESIS

La hipótesis central de la investigación es que con la implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad y orientado a la eficiencia energética en una planta de producción de pinturas en El Salvador, resultará principalmente en una mejora significativa en la disponibilidad pero sobre todo en la confiabilidad de los equipos que se ven involucrados en la producción, adicional a eso existen sistemas auxiliares a la planta que en conjunto son claves para el funcionamiento óptimo de la misma que también se verán beneficiados en la confiabilidad, no

perdiendo de vista uno de los objetivos que es ser eficientes con el consumo de energía eléctrica especialmente con los usos significativos de la misma, generando así ahorros en cuanto a costo y optimizando la eficiencia operativa.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Proponer la implementación de un plan de mantenimiento con enfoque en la metodología RCM incorporando indicadores actuales y emergentes relacionados con el consumo de energía y eficiencia energética dentro de una planta de producción de pinturas en El Salvador generando los medios para alcanzar sostenibilidad energética y disminución en consumos de producción.

1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar la condición actual de los equipos y sistemas de energía a fin de identificar áreas de mejora y posibles puntos críticos que requieran atención prioritaria.
- Investigar y seleccionar los indicadores de confiabilidad y eficiencia energética más relevantes y aplicables a las necesidades específicas de la empresa mencionada, con el propósito de establecer una base sólida para el plan de mantenimiento.
- Diseñar un plan de mantenimiento basado en confiabilidad que incorpore las mejores prácticas y técnicas recomendadas para maximizar la disponibilidad y eficiencia energética de los equipos, minimizando así posibles fallos y pérdidas de energía.
- Establecer un sistema de monitoreo y seguimiento continuo de los indicadores seleccionados, a través del cual se pueda evaluar el desempeño del plan de mantenimiento implementado y realizar ajustes pertinentes para optimizar su efectividad a lo largo del tiempo.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

PORTADA

RESUMEN

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS EN UNA EMPRESA DE PINTURAS EN EL SALVADOR

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En la actualidad existe un entorno competitivo en las industrias, por lo que la sostenibilidad empresarial exige a las empresas que deben aprovechar todas las ventajas que se puedan presentar en el entorno para sobresalir entre todas las demás empresas ya sea de la región o del mundo y así ser más fuertes en la competencia. Por lo tanto, siempre tienen personal especializado que está a la expectativa de las condiciones tanto internas como externas, de las cuales pueden valerse para mejorar en el proceso general de la empresa, buscando ser más eficientes en todos los sentidos posibles y entre todos esas condiciones muchas empresas impulsan iniciativas en las que tratan de mejorar al departamento de mantenimiento, desafortunadamente, la mayoría de empresas no ven con mucho potencial a sus áreas de mantenimiento dejando de lado esfuerzos para tal fin (R. Keith Mobley, 2008). Mantenimiento es una de las tantas disciplinas que existen en los campos de estudio, pero que es uno de los temas que es más complicado hablar en las empresas porque en teoría los equipos de mantenimiento son esenciales para que todo funcione a la perfección como debe ser, pero en realidad los equipos no funcionan de manera óptima puesto que no se ha podido reestablecer a su estado original y se ha deteriorado con el tiempo y esto se debe a que las organizaciones poco a poco han normalizado el hecho que los equipos se encuentren fallando constantemente, han normalizado el poco sentido de importancia que tiene mantenimiento ya que solamente se hacen actividades para “Apagar fuego” que son las fallas, y es hasta el momento en que se presenta una falla todos se acuerdan de mantenimiento pidiéndoles que “Pongan a trabajar la máquina lo más pronto posible” y se generan problemas que la mayoría de las ocasiones se atribuyen a las máquinas a las que no se les ha dado ningún tipo de mantenimiento.

En ese sentido mantenimiento se tiene que encargar de respaldar todas las actividades que se realizan dentro de las instalaciones de cada empresa, no solamente la maquinaria de producción, ya que actividades de mantenimiento las hay en todo lugar, como por ejemplo tareas de limpieza que pueden realizarse en una pequeña área bajo una silla, lubricaciones menores hasta procesos más elaborados que necesitan de mucha planificación como los basados en confiabilidad del equipo o procedimientos capaces de predecir futuras fallas de los equipos en base a estadística, apoyándose de diferentes tecnologías en las que incluso se podrán hacer modelos utilizando industria 4.0. Existen diferentes definiciones de mantenimiento que están citadas a continuación:

Definición 1. Es mantener un ítem de producción en condiciones óptimas o hacer que recupere esa característica. Disciplina inherente a la producción y no se puede concebir aparte de ella (Herrera S., 2006).

Definición 2. Parte de la Ingeniería que con su acción ayuda a la conservación de los elementos de una empresa, sea cual fuere, además haciendo mínimas las fallas inesperadas con lo cual se obtendrá más economía, seguridad y eficiencia dentro de la empresa. (Montilla Montaña, 2016)

Definición 3. Conjunto de recursos físicos (tierra, capital, equipos), recursos humanos, tecnología e información, que acoplados buscan mejorar la eficiencia del sistema de producción disminuyendo los paros, aumentando la confiabilidad del equipo y garantizando la seguridad y un nivel de costos rentable; todo ello dentro del marco del desarrollo propio de la empresa y del país (Pérez, 1992).

Definición 4. Conjunto de actividades (planificadas y coordinadas) que propende a mantener los equipos (de diversa índole), en una condición operativa, lo más cercana posible de su estado teórico o nominal, con el mínimo de inversión (económica, tiempo, insumos), de manera segura para el personal y el medio ambiente, apoyando de manera positiva el cumplimiento de las metas de una organización (Montilla, 2015).

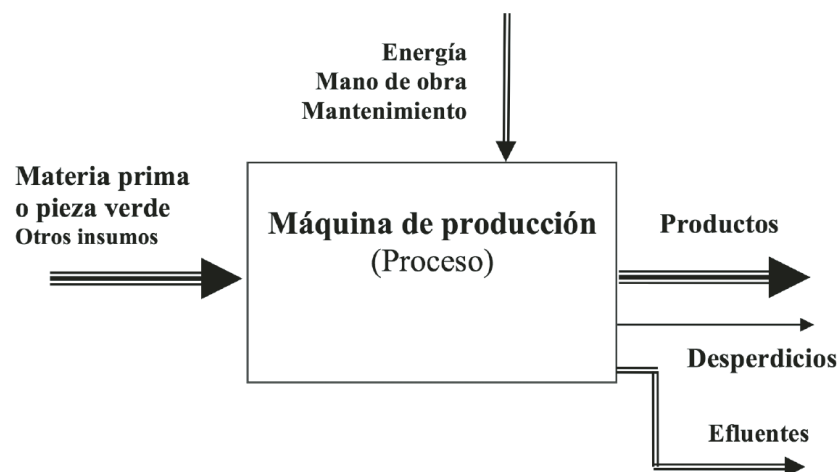


Figura 1: Esquema de entradas y salidas de una máquina de producción (Montilla Montaña, 2016)

De las definiciones anteriores acerca de lo que es el mantenimiento, podemos resaltar varios aspectos de lo que las actividades de mantenimiento conllevan, básicamente el mantenimiento es una definición universal, la cual puede ser encontrada incluso en libros de la real academia de la lengua española definiendo lo siguiente: “m. Acción y efecto de mantener o mantenerse.” o “m.

Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industria s, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.” Uno de los aspectos principales es que todas las definiciones coinciden en que las actividades del departamento de mantenimiento no son actividades estáticas que se planean y se van ejecutando de manera indefinida en el tiempo, sino que es una actividad dinámica ya que siempre habrá diferentes factores por los cuales será de suma importancia que el mantenimiento vaya cambiando, se vaya actualizando, esté siempre en constante revisión para hacer cambios y mejoras en las tareas definidas en los procedimientos, tratando de alcanzar siempre el objetivo que como unidad de servicio se tiene, que es garantizar la disponibilidad de los equipos para la continuidad de la producción. En otras palabras es correcto afirmar que el mantenimiento es una combinación de todas las acciones técnicas, gerenciales y administrativas durante el ciclo de vida de un equipo, destinadas a conservarlo o restaurarlo a un estado en que puede realizar la función requerida, pero es importante reconocer el concepto de ciclo de vida de los activos, ya que el mantenimiento no solamente se debe cerrar a lo que está en planta, también debe involucrarse desde la concepción de la compra de los equipos hasta la disposición final que tendrá dicho activo al final de su vida útil, es decir durante todo el ciclo que estará prestando servicio a los diferentes procesos en los que se ve transformada la materia prima. Para profundizar más en el tema del mantenimiento industrial, también es relevante entender que es una máquina o equipo para cualquier departamento de producción de las empresas que se dedican a la manufactura de productos, incluso podía llegar a aplicar a cualquier otro proceso no necesariamente de producción. Toda maquinaria que se encuentra en funcionamiento siempre tendrá como objetivo principal la transformación de una materia prima cualquiera en ya sea, un producto final que saldrá a la venta al público o transformarse en un producto que puede ser usado luego como materia prima que se le puede conocer como intermedios en la planta. Cómo se observa en la Figura 1 (Montilla Montaña, 2016) toda maquinaria necesita de algunos insumos indispensables para la transformación de materia prima, entre los que se encuentran la energía eléctrica, la mano de obra de los trabajadores, insumos auxiliares y mantenimiento, a su vez, ésta

máquina generará desperdicios y algunos efluentes, cómo por ejemplo pérdidas de agua caliente, pérdidas de vapor, entre otros contaminantes.

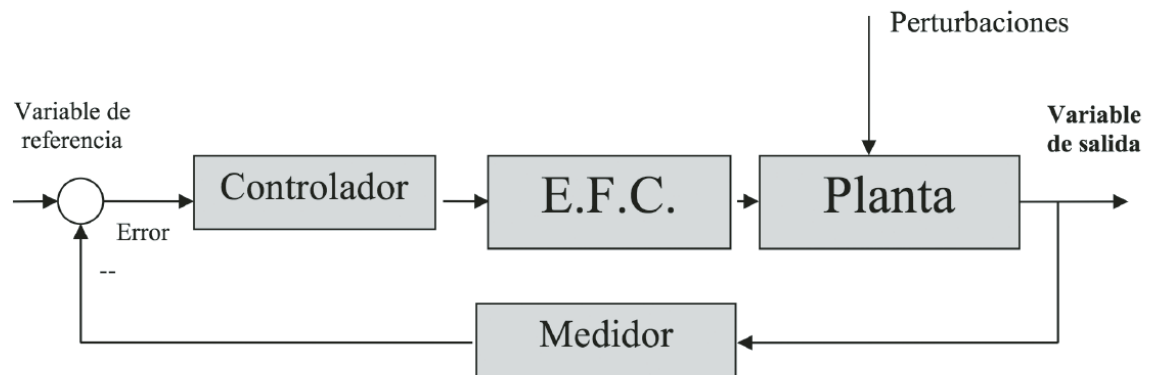


Figura 2: Sistema de control realimentado (Montilla Montaña, 2016)

En la actualidad existe un gran auge de las nuevas tecnologías que van creciendo año con año, especialmente en la automatización de los procesos, razón por la cual será sumamente simple hacer una analogía del proceso de mantenimiento con un diagrama que es de fácil comprensión. La Figura 2 recuerda de manera gráfica el funcionamiento básico de un sistema de control retroalimentado o más bien un sistema automatizado, el cual está realizado y construido de forma que siempre tratará la manera de mantener en el tiempo que una variable de salida que puede ser presión, flujo, peso, temperatura, velocidad lineal o velocidad angular, se mantenga constante dentro de un intervalo definido que se considera como un valor aceptable. Para este fin siempre debe existir una forma en la que el sistema pueda conocer cuáles son las condiciones que se encuentran a su alrededor es decir la utilización de un medidor, en este caso se utiliza un sensor que constantemente se encuentra tomando estas mediciones, las cuales luego son enviadas hacia una entrada del elemento comparador en el sistema, el cual, en la otra entrada tiene un valor constante que ha sido definido para el proceso como variable de referencia o variable consigna que se considera como aceptada. Una vez hecha la comparación a la salida se obtendrá un valor que es conocido como el error de la medición, que es enviado hacia el controlador principal del sistema que procesa dicho error y se obtiene como resultado una señal de control hacia un elemento final de control o actuador que puede ser una válvula, un pistón, un motor, una bomba, un calentador, entre otros, que será encargado de brindarle energía o de restarle energía finalmente a la planta con

el fin de minimizar el error lo más cercano a cero. Sobre la planta siempre se tendrá el efecto de perturbaciones o entradas indeseables que pueden ser las mismas condiciones del ambiente, que van a desviar la variable de salida del intervalo definido, y aquí es donde funciona el controlador para minimizar el efecto de estas perturbaciones sobre el sistema de control.

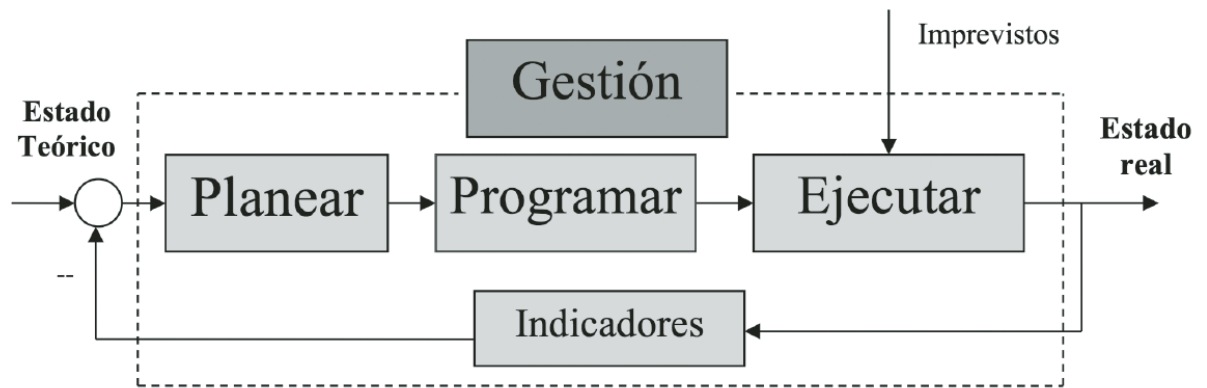


Figura 3: Representación de la dinámica de un sistema de mantenimiento (Montilla Montaña, 2016)

Como se menciona con anterioridad, en la Figura 3 se puede observar como las consideraciones de cómo funciona un sistema de control retroalimentado simple, se pueden aplicar también con gran precisión a las actividades que generalmente son desarrolladas por el departamento de mantenimiento de una empresa cualquiera, como es bien sabido el objetivo principal que tiene toda empresa es producir para tener rentabilidad al final de su balance general, esto se logra con las aportaciones de cada uno de los departamentos de la empresa, pero en la planta el equipo de mantenimiento lo que busca es que para todas las máquinas de la fábrica ya sean directamente relacionadas a la producción o auxiliares, tengan un estado real que sea igual o lo más parecido posible al estado teórico o nominal que generalmente es definido por el proveedor o fabricante y en algunas ocasiones por la misma empresa, que podría ser el estado de cuando la máquina fue nueva, es decir ponerla en condiciones similares a cuando esta se compró. Para tal fin idealmente debe de existir un proceso bien organizado de mantenimiento en el cual se disponga de una buena infraestructura, herramientas, manuales, capacitación técnica, sistemas de gestión, instrumentación, que en conjunto sean capaces de ayudar a los encargados a generar data vía

reportes o indicadores, que servirán para determinar el estado real en el que se encuentran los equipos, y con esta información realizar una comparación de lo que debería ser la máquina en sus condiciones ideales o condiciones nominales, para generar la información de diferencias que tiene el equipo respecto a el mismo cuando estaba nuevo o en las condiciones definidas por el fabricante.

Con esta información de lo que no está igual que las condiciones nominales de la máquina, al igual que un sistema automatizado, se debe llevar a cabo el trabajo que realizaría un controlador, es decir tratar de disminuir las diferencias que se han encontrado, es decir empezar a trabajar en la creación de planes de acción hacia la máquina, creación de estrategias que se llevarán a cabo, verificación de los costos de mantenimiento actuales para considerar un aumento en el presupuesto, capacitación del personal, actualización de los servicios de mantenimiento, las cuales se deben llevar a cabo en el día a día del personal que realiza las actividades por medio de una programación y ejecución de estas tareas de mejora continua que se hayan definido como limpieza, lubricación, cambios de piezas, etc., tomando en cuenta que siempre se van a generar imprevistos, que será la analogía de las perturbaciones a una planta. Esto deja demostrado por que se dice que el proceso de mantenimiento es de tipo dinámico, porque el deber ser es que esté cambiando día con día para garantizar la mejora continua de los procesos.

Otro punto sumamente importante es que a medida que pasa el tiempo, los equipos siempre van a tener obsolescencia, es inevitable que no se introduzcan desajustes o desgastes en el equipo, ya sea por el tiempo de uso, ya sea por algún proceso o simplemente porque son piezas de desgaste o piezas intercambiables que el fabricante de la máquina dejó de construir. En este sentido, los consumos energéticos, la velocidad de operación, la calidad de la producción y su estado operativo van a ir paulatinamente desmejorando lo cual puede llegar a generar que las intervenciones sean mucho más frecuentes, que los costos por alguna reparación o mantenimiento preventivo sean mucho más elevados que al inicio, que se dificulte la obtención de las piezas de recambio porque el fabricante ya no las vende, todo esto puede hacer necesario replantear el estado nominal y las tareas de planeación, programación y ejecución que se le realicen a estos equipos, es decir, que poco a poco está llegando al final de su ciclo de vida, incluidas sus perturbaciones. A todas estas situaciones se hace referencia cuando se afirma que el comportamiento del Departamento de mantenimiento, o más bien del proceso de mantenimiento, es dinámico dentro de las compañías.

El mantenimiento es una disciplina que siempre está presente en el quehacer diario del ser humano como bien se sabe el objetivo de este proceso es mantener un equipo en condiciones óptimas o hacer que recupere esa característica que tenía desde nuevo o que fue definido por el proveedor.

2.1. PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO

El papel del mantenimiento industrial poco a poco ha tenido que transformarse ya que en la actualidad se ha tenido que volver clave para dar soporte a los activos de la compañía en una creciente competencia mundial que hay entre compañías, ya que entre más unidas estén las diferentes áreas de la empresa para trabajar en conjunto por un mismo fin, serán más fuertes frente a los competidores directos que se encuentran en el mismo rubro industrial, esto se logra a raíz de que mantenimiento ya dejó de ser un proceso reactivo en el que solamente se encargan de velar por las emergencias y trabajar para solventarlas en el menor tiempo posible, lo cual al final se vuelve en un proceso mucho más caro ya que se tienen tiempos de parada muy altos, fallas muy recurrentes o con periodicidad muy alta, reprocesos en producción debido a productos atrofiados por la falla de la máquina o por procesos a medias, gastos en refacciones que se adquieren de emergencia, altos costos en horas extras de los técnicos y sobre todo el costo de oportunidad al tener equipos en planta detenidos. Con el objetivo de eliminar todas las desventajas que se tienen por tener una mentalidad de mantenimiento reactiva, hay una mejor forma de realizar las cosas una forma más ordenada de manera consistente, implementando infraestructura adecuada, procesos adecuados a cada una de las industrias, procedimientos con base a recomendaciones de los fabricantes, capacitación continua del personal técnico, y con esto se pueden minimizar en gran medida las pérdidas que estaban ocultas a simple vista, se logrará una operación que será más constante en cuanto a niveles de producción, disminución de paros, disminución de fallos grandes, se aumentará la eficiencia en todos los sentidos, y la calidad alta se convertirá en un estándar de la compañía en cuestión, y a todo esto será un término al que se le conoce como Estado de excelencia en el mantenimiento (R. Keith Mobley, 2008), con esto se alcanza una alta confiabilidad en las operaciones de producción, se minimizan los desperdicios, permite aprovechar al máximo los activos que se tienen en la planta, mejora la productividad y sobre todo aumentan los beneficios del balance general.

Para lograr acercarse lo más posible al estado de excelencia en el mantenimiento del que se habla en la literatura de Mobley, que dice que es un subconjunto de la excelencia de confiabilidad que redefine los roles y responsabilidades tradicionales, así como los procesos de mantenimiento que son necesarios para asegurar la confiabilidad y el correcto funcionamiento de los activos, buscar aumentar al máximo la vida útil y disminuir lo más que se pueda el costo del ciclo de vida de los activos. Para esto existen diferentes metodologías que también se les puede llamar como estrategias o filosofías, que las empresas en la actualidad están implementando para gestionar de la manera más eficiente posible y que les sea funcional de acuerdo a las necesidades de cada compañía con base a las cuales se tomará la decisión de qué es lo que se va a realizar, todas las acciones que traten de evitar los mantenimientos correctivos no planificados son de mucha ayuda en la planta, desde la actividad más simple de realizar como por ejemplo el simple hecho de “No hacer correctivos” hasta metodologías en las cuales los expertos han trabajado hasta ir perfeccionando como una de las más modernas que existen a día de hoy que es el llamado mantenimiento basado en el riesgo MBR.

2.1.1. Tipos de mantenimiento

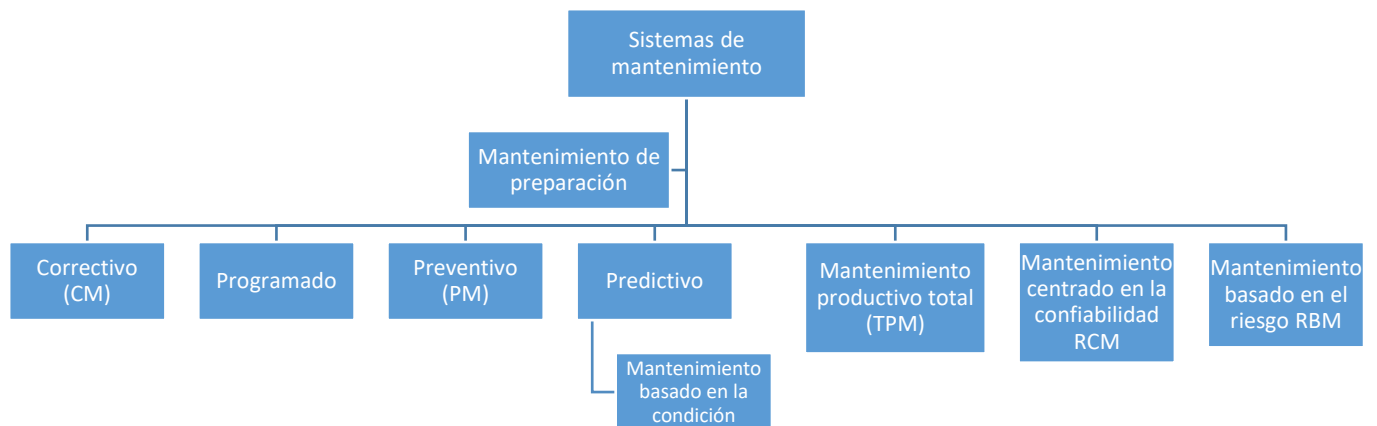


Figura 4: Sistemas de mantenimiento (Montilla Montaña, 2016)

En la Figura 4 se encuentran representado de manera gráfica los diferentes sistemas de mantenimiento existentes que pueden ser implementados por las diferentes fábricas para realizar una gestión eficiente de todos los activos que tienen en su listado de equipos. Es de suma importancia recalcar que dentro de la representación gráfica de los sistemas de mantenimiento se encuentra un elemento adicional que es común a cualquiera de las estrategias de mantenimiento que la compañía escoja, y es el mantenimiento de preparación, esto se refiere a todas las actividades que son necesarias y se deben completar previo a la realización de cualquier tipo de actividad, es decir a la preparación que se debe tener para intervenir algún activo, esto puede ser permisos de trabajo, puede ser la compra de algún repuesto, preparación de las áreas a intervenir si hay que desalojar algo para realizar maniobras, alistar manuales de mantenimiento, herramientas, capacitación al personal técnico, y todo lo que sea necesario para realizar dicha actividad.

2.1.1.1. Mantenimiento Correctivo

Este sistema de mantenimiento es una metodología que está orientado directamente a la falla, es decir que se interviene un equipo en el que ya ha ocurrido la falla, también se puede tomar como parámetro que es un equipo que tiene un alto potencial para que ocurra una falla mayor, como por ejemplo una faja de transmisión de un conveyor que ya se ve muy deshilada que en cualquier momento se va a romper, es decir que es una metodología que en el rubro se conoce coloquialmente como un sistema de apaga fuegos. Dependiendo de la naturaleza de la falla que está presentando el equipo ya sea funcional o potencial, el mantenimiento correctivo también se puede categorizar en dos:

- Correctivo de emergencia
- Correctivo programado

El correctivo de emergencia tal cual su nombre lo indica se realiza cuando ya ha aparecido la falla y ha provocado una parada de producción, ya sea por ejemplo un eje roto, una faja reventada, un variador de frecuencia o un motor quemados, un empaque de válvula destruido, existen tantos escenarios que pueden ser causante de un correctivo de emergencia, que pueden provocar pérdidas de producción, accidentes laborales, incumplimiento con entregas, problemas de calidad o contaminación ambiental. El correctivo programado tiene lugar unos instantes de tiempo antes de la falla, son generalmente fallas que se presentan y aun dan un poco de tiempo de

Lo que se debe tratar de evitar es la realización de correctivos de emergencia en equipos que son indispensables a la producción, en cambio existen equipos que será más tolerable como por ejemplo la lámpara de una calle ubicada en un poste. También siempre se programará un porcentaje de mantenimiento correctivo planificado, debido al desgaste natural de las piezas de recambio.

El mantenimiento programado es un enfoque de tareas que son hasta cierto punto muy parecidas con las actividades que se ejecutan en los mantenimientos preventivos, ya que ambos tipos de mantenimiento tienen como objetivo principal la realización de tareas planificadas que son destinadas a evitar fallos en las máquinas y optimizar el buen funcionamiento de éstas. El mantenimiento programado se ejecuta deteniendo el equipo cada vez que se cumpla un plazo de tiempo que ha sido predeterminado, generalmente este tiempo es brindado por el fabricante del equipo, pero también puede ser definido por los expertos de la empresa que ha comprado la

máquina. En este lapso en el cual se ha hecho el paro programado de producción, se llevan a cabo diferentes actividades que son recomendadas en el manual de los equipos como por ejemplo actividades de limpieza, lubricación de diferentes partes de la máquina, desarme de piezas importantes, cambio de piezas que se desgastan como consumibles y luego rearmar la máquina para dejarla nuevamente en condiciones de operación. Durante el lapso en el que la máquina se encuentra en el paro programado todo se hace con base a la teoría que el fabricante ha colocado en los manuales, más, sin embargo, no se conoce la cantidad de tiempo real que el equipo ha trabajado, ni tampoco la intensidad de trabajo al que ha sido sometida la máquina, ya que no es lo mismo que la máquina este solo encendida, trabajando el 50% o al 100%. En la Figura 6 se puede observar un gráfico del nivel de rendimiento de la máquina versus el tiempo correspondiente al ciclo de mantenimiento programado. Aquí se puede observar que el equipo se inspecciona periódicamente, en la gráfica estas inspecciones están representadas con la letra *i*, estas inspecciones se realizan en base al tiempo medio entre fallas (MTBF), con este tiempo también se calcula un límite de admisibilidad del nivel de rendimiento, que en términos generales es el punto en el que se realizará el paro de la máquina para realizar todas las intervenciones que el fabricante ha dejado documentado para mantener el estado óptimo del equipo y así tratar de recuperar el nivel de rendimiento que traía cuando salió de las instalaciones del fabricante.

Este tipo de mantenimiento programado presenta muchas ventajas si se hace una comparación con el mantenimiento correctivo, ya que se puede considerar más técnico porque se necesita de algún cálculo para poder determinar el tiempo medio entre fallas, y luego con base a eso encontrar el límite de admisibilidad del nivel de rendimiento, se puede anticipar y reducir las fallas que se presentan normalmente en el proceso productivo. Si hacemos una comparación entre este tipo de mantenimiento programado y cualquier otro tipo de mantenimiento que ha ido surgiendo con el tiempo, ahora si claramente vamos a estar en mucha desventaja porque con este tipo de mantenimiento no es posible conocer la cantidad de trabajo real a la que ha sido sometida el equipo, ya que solamente se hacen intervenciones de manera teórica.

Con respecto a las máquinas industriales no se puede hacer una generalización de las fallas que se pueden presentar, ya que a pesar de que las máquinas sean exactamente iguales del mismo fabricante, del mismo modelo, mismas dimensiones, no van a funcionar de igual forma, pues por ejemplo no van a fallar al mismo tiempo, no va a fallar el mismo componente en ambas máquinas,

no van a tener el mismo rendimiento en cuanto a producción, no van a consumir la misma cantidad de energía eléctrica. Los modos de falla van a depender principalmente de tres factores importantes:

- Equipo o máquina.
- El factor humano, es decir la persona que opera la máquina.
- Las condiciones y el medio ambiente al que está expuesta esta máquina.

Estas razones son responsables de que las máquinas tengan diferencias y no se comporten de la misma manera, incluso estando una al lado de la otra, incluso el ciclo de vida de las máquinas no se va a parecer en nada, por lo tanto podemos decir que el mantenimiento programado nos da una visión falsa acerca del desgaste, deterioro, eficiencia, entre otras cosas de la máquina ya que se realizan cambios de piezas sin saber si están en buenas condiciones o deterioradas, se generan gastos excesivos de manera innecesaria, también los ajustes originales que la máquina tenía de fábrica se van perdiendo, ya que hasta cierto punto los continuos desarmes de la máquina le afectan en que ya no podemos volver a la condición original, siendo contraproducente a mediano y largo plazo.

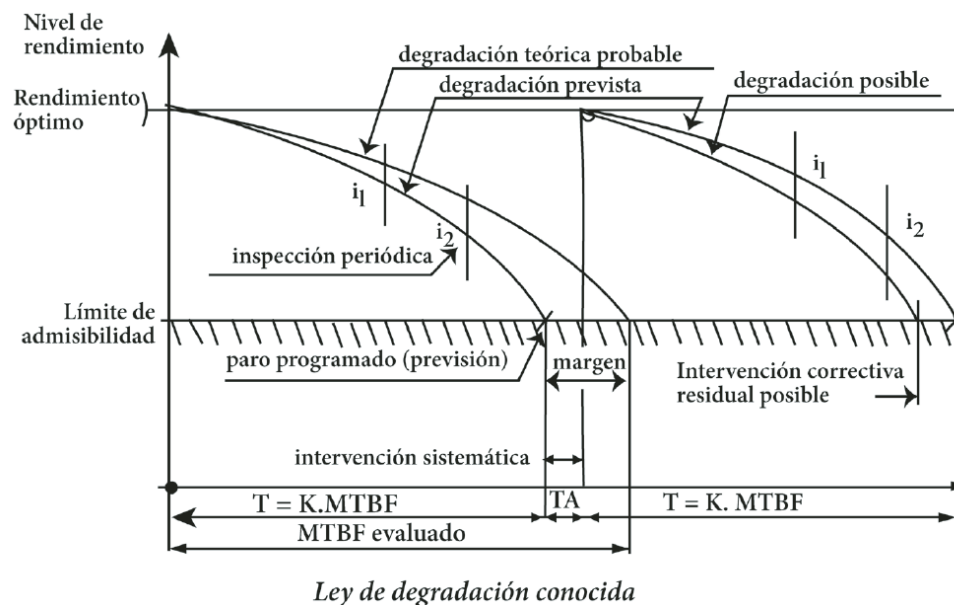


Figura 6: Ciclo gráfico del mantenimiento programado. (Montilla Montaña, 2016)

2.1.1.3. Mantenimiento preventivo

Un sistema de mantenimiento cuya finalidad principal es prevenir la ocurrencia de fallas en los activos de una compañía es el mantenimiento preventivo, el cual es una estrategia de gestión de equipos basada en la ejecución de tareas con el objetivo principal de prevenir la ocurrencia de las fallas y mantener en buen estado la funcionalidad de un sistema productivo, estas tareas se enfocan en reducir los paros de producción y optimizar el rendimiento de la maquinaria a lo largo de su ciclo de vida. Estas tareas pueden ser desde tareas muy básicas como observar, inspeccionar, calibrar, ajustar, cambiar, lubricar, hasta tareas mucho más complejas que puede implicar el mantenimiento y actualización de un robot, por ejemplo. A diferencia del mantenimiento correctivo que se realizará después de la ocurrencia de una falla y con el equipo ya detenido, el preventivo trata de evitar estas fallas realizando las tareas de manera anticipada y está en constante mejora para tratar de identificar brechas en los procedimientos y así ser más eficientes y evitar paros no planificados. Figura 7

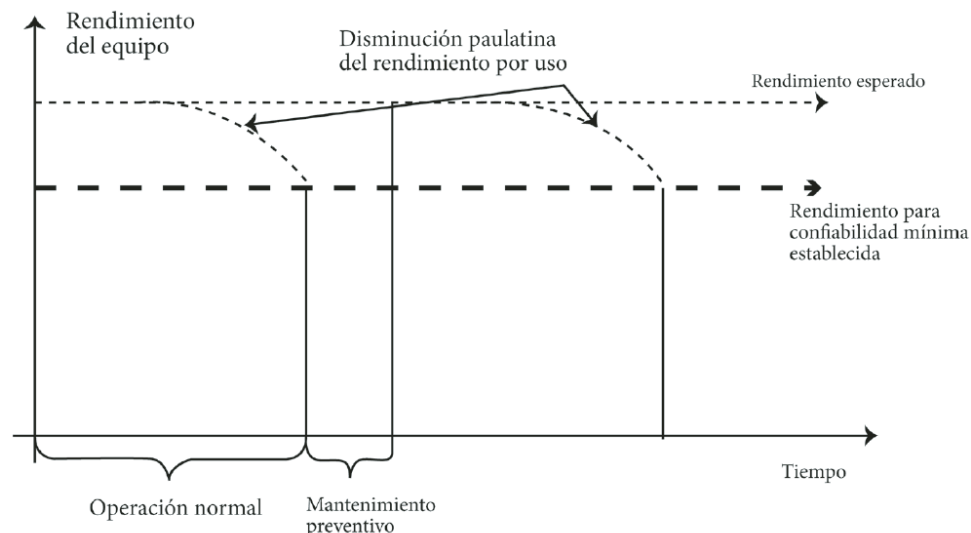


Figura 7: Ciclo gráfico básico del mantenimiento preventivo (Montilla Montaña, 2016)

El éxito de la aplicación de un sistema de mantenimiento preventivo, es la correcta elección de las periodicidades con que se van a realizar todas las actividades de mantenimiento, ya que si se toma como base una tarea con muy baja frecuencia de realización, el equipo puede llegar a

presentar fallas intermedias que harán que sea necesario hacer intervenciones correctivas, y también si es muy alta la frecuencia se sobredimensiona el proceso de producción y se encarece considerablemente, porque se puede caer en una situación en la que el departamento de mantenimiento cambia piezas en buen estado.

Una de las principales desventajas del mantenimiento preventivo, es que se puede llegar fácilmente a excesos en carga de trabajo que también será traducido en exceso de costos innecesarios, y esta es una premisa que puede llegar a ser aplicada en muchos otros ámbitos: “Poco es malo y mucho también”. Esto también es aplicable al ámbito de mantenimiento, ya que se puede hacer mantenimiento preventivo de manera ineficiente, es decir poco mantenimiento preventivo y mucho correctivo, o sino también puede ser la situación en la que mucho mantenimiento preventivo y poco correctivo también es malo ya que los costos aumentan en gran medida sin que se reporten beneficios realmente.

2.1.1.4. Mantenimiento Predictivo

Otra de las principales metodologías para la aplicación de las tareas de mantenimiento en los equipos es el mantenimiento predictivo, el cual trata de predecir en cuánto tiempo es probable que va a suceder una falla y así anticiparse a que suceda la falla y evitar atrasos con paros de producción innecesarios. Este método de mantenimiento se basa en tratar de estudiar a profundidad los síntomas que presenta la máquina cuando está apareciendo una falla, midiendo las desviaciones en los parámetros de operación y analizando la información que se obtendrá en las mediciones y con base a eso, poco a poco ir aprendiendo el comportamiento y predecir la ocurrencia de la falla. En otras palabras, se puede decir que el mantenimiento predictivo es como una fase más madura y avanzada del mantenimiento preventivo, en este punto se realizan diferentes mediciones, ensayos, pruebas, y todo esto se hace de manera complementaria a las actividades de mantenimiento preventivo.

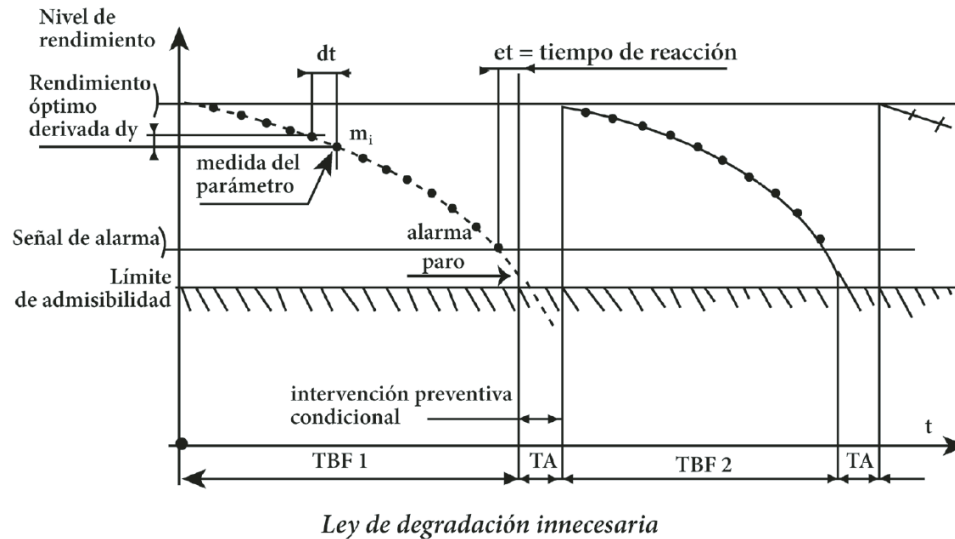


Figura 8: Ciclo gráfico del mantenimiento predictivo. (Montilla Montaña, 2016)

La Figura 8 representa de manera gráfica el rendimiento de un equipo en el tiempo, ahora describiendo el ciclo de mantenimiento Predictivo. Como se observa en la gráfica se tiene que definir un límite de admisibilidad de nivel de rendimiento y un valor que será la alarma, una vez que se han definido estos valores el procedimiento se puede describir de manera muy simple, y es que de manera periódica se debe estar haciendo inspecciones del nivel de rendimiento de los equipos (Puntos en la gráfica) y así monitorear el estado de la máquina, una vez esta llegue al nivel de alarma se debe programar una intervención en el equipo, para hacer los ajustes necesarios y así restituir el nivel de rendimiento, por ende si esta señal de alarma no es tomada en cuenta por el personal de mantenimiento se tendrán consecuencias altas si se excede el nivel de admisibilidad, ya que se generan averías que tomarán mucho más tiempo de reparación (Montilla Montaña, 2016).

Con el pasar de los años al igual que en cualquier otro rubro de la industria, se han desarrollado muchas tecnologías que han permitido que se tenga un mayor auge en cuanto a la medición de las variables de mantenimiento predictivo, o también conocido como mantenimiento basado en condición. Estas tecnologías pueden ser análisis de vibraciones, termografías para conocer el estatus de los equipos eléctricos, análisis de aceites, ensayo de tintas penetrantes, ultrasonidos, etc.

Todo esto tiene ventajas entre las que se encuentra la principal que tener la posibilidad de anticiparse a los problemas debido a que se monitorea de forma constante la falla de la mayoría de los paros de producción y se puede evidenciar como ésta avanza estando la máquina en operación por lo que las intervenciones son mínimas y se hace hasta que se alcanza el nivel de advertencia. Por otro lado, son procedimientos en ocasiones muy caros de realizar y se necesita tener personal capacitado para poder ejecutarlo, ya que algunas de estas pruebas solamente presentan información de que hay una falla, mas no la causa raíz de éstas.

2.1.1.5. Mantenimiento productivo total (TPM)

El mantenimiento productivo total o también conocido como TPM por sus siglas en inglés, es un tipo de mantenimiento que ayuda a tener un enfoque más completo de la gestión del ciclo de vida de los activos, ya que más allá de la aplicación de ciertas actividades o procedimientos, se puede decir que es una filosofía empresarial (R. Keith Mobley, 2008) que busca optimizar la producción al máximo es decir la productividad, comparando los resultados obtenidos con los recursos que se han empleado para dicha tarea. También el enfoque que se tiene para la aplicación de TPM no solamente involucra los equipos que tienen que ver con la producción, sino que también va más allá abarcando a todas las áreas del plantel, desde el operario de producción hasta los equipos que se encuentran asignados a la alta dirección, buscando minimizar defectos de producción, fallas y accidentes, mejorando continuamente la disponibilidad de los equipos. Esta filosofía de mantenimiento necesita que se tenga un respaldo muy amplio de parte de la alta dirección, ya que si no se tiene no va a funcionar este tipo de mantenimiento.

$$Pr = \frac{i}{r}$$

Donde: Pr: Productividad

i: Productos obtenidos.

r: Recursos empleados

En este modelo de mantenimiento es importante el respaldo de la alta dirección, pues acá toma un papel en el que se le reconoce como un recurso valioso de la organización al departamento

de mantenimiento, dado que a este punto se ha entendido que dicho proceso es también generador de valor en el balance general, y no solamente se ve como un gasto para la compañía, es decir que ayuda a la rentabilidad de la empresa. En la implementación del mantenimiento TPM se promueve la mejora en las capacidades individuales de cada miembro del equipo, ya que ahora también debe tener la capacidad de enseñar al operario de la máquina, el cual tomará su propio protagonismo ya que en este modelo de mantenimiento el operador es clave en todas las tareas que serán aplicadas en el mantenimiento autónomo. El operador de producción deberá hacerse cargo de la fracción de planta que a él le corresponde, como por ejemplo los operadores de una envasadora, de un equipo de molienda, de un equipo de dispersión, o de un equipo de etiquetado, y a toda esta maquinaria que cada usuario tiene a cargo, le realizarán tareas sencillas pero de gran utilidad para el correcto mantenimiento del equipo previniendo así fallas que generan paros de producción, tales como lubricación de partes, limpieza general de la maquinaria, ajustes menores, y sobre todo la documentación mediante reportes, pero como fase inicial de TPM siendo de las actividades más importantes la implementación del sistema de 5S.

2.1.1.6. Mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM)

El mantenimiento basado en la confiabilidad es un método de mantenimiento cuyo principal objetivo es mejorar la confiabilidad en la operación de los sistemas, basando la filosofía en un estudio detallado y exhaustivo de los activos que conforman la planta, separándolos por las diferentes zonas o partes del proceso en el ámbito productivo. Dentro del estudio que se realiza dentro de la planta para la implementación de RCM, no solamente se toman en cuenta las características ya sea técnicas o de funcionamiento de cada uno de los equipos, sino que más bien se hace un estudio del área como un solo conjunto, es decir que se estudia un proceso y en lugar de ver a un equipo como individual, se ve de manera más específica la función que estos cumplen en el proceso es decir centrándose en el impacto que tiene cada equipo en el ámbito funcional u operacional, de seguridad y del medio ambiente, lo que ayudará también a definir cuáles de estos equipos son equipos críticos y a cuales se les dará prioridad para las tareas de mantenimiento.

Una vez mencionado lo anterior, se entiende que el enfoque principal del mantenimiento RCM es la confiabilidad de los activos de la planta, la cual puede ser evaluada de manera cuantitativa es decir, asignándole un valor numérico, lo cual a diferencia de los otros tipos de

mantenimiento ayudará a tomar las mejores decisiones teniendo en cuenta los tiempos de funcionamiento y las intervenciones para garantizar su disponibilidad, lo cual permite planificar la producción y generar mitigaciones de los riesgos asociados a las fallas. RCM realiza una serie de pasos ordenados que permiten identificar las posibles fallas funcionales de los activos, identificando las causas por las que se puede generar una falla y luego se evalúan los efectos que tendrán estos fallos sobre la operación, sobre las demás áreas, sobre la seguridad del personal y sobre el impacto ambiental. Una vez identificados todos estos aspectos se procede a crear la política de gestión de activos que más se apegue a las necesidades de la empresa.

$$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}}$$

Donde: TPEF: Tiempo promedio entre fallas

T_{op} : Tiempo real de operación.

N_{arr} : Numero de arranques de la planta.

El mantenimiento basado en confiabilidad se apoya de datos cuantitativos por medio de estadística, mediante los cuales se realiza un análisis de criticidad de los activos, con esto se determina la criticidad tanto de los activos por individual, así como también de las áreas de la planta que están conformadas por estos activos que ya se han definido como críticos. Esto se realiza mediante la aplicación de una metodología llamada AMEF o análisis de modo y efecto de falla que también se puede conocer como matriz de criticidad de los activos (FMEA por sus siglas en inglés), para posteriormente, con base a todo esto se determina cuál será el plan de acción para mitigar los riesgos de los equipos críticos, ya sean estos correctivos programados, mantenimientos preventivos o predictivos, instalar redundancia que consiste en la instalación de un equipo de iguales características para que en caso de falla inicie operaciones el segundo equipo y no hayan pérdidas de tiempo en producción o incluso llegar al extremo de realizar un nuevo diseño del proceso que resulto ser crítico.

2.1.1.7. Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)

Sistema de Mantenimiento de última generación, en el que se direccionan los recursos de mantenimiento hacia los equipos que un análisis probabilidad-riesgo determine que son los más riesgosos. El RBM es especialmente apto para ser aplicado en plantas cuya operación encarna alta peligrosidad, como las petroquímicas, nucleares, biológicas, etc. La Figura 9: Mantenimiento basado en el riesgo ilustra de manera básica la esencia del RBM; el área verde (Región o área A) indica que hay poca probabilidad de que una máquina/equipo 1 falle de manera catastrófica y en el caso que ocurriese, las consecuencias (sobre la salud, sobre el medio ambiente y sobre otros equipos) serían poco importantes. Por el contrario, para una máquina/equipo 2, ubicado en la región roja (Región o área B) indicaría una alta probabilidad de que ocurra una falla catastrófica, y las consecuencias serían elevadas, por lo tanto, a la máquina 2 hay que aplicarle planes de acción más elaborados y asignarle mayores recursos que a la máquina 1. En RBM se hace uso de Sistemas Integrados de Seguridad SIS, con el objetivo de llevar el Riesgo a niveles aceptables o tolerables (el Riesgo no se puede llevar a un valor cero). A nivel industrial este tipo de mantenimiento lo desarrollan equipos multidisciplinarios de profesionales. (Montilla Montaña, 2016)

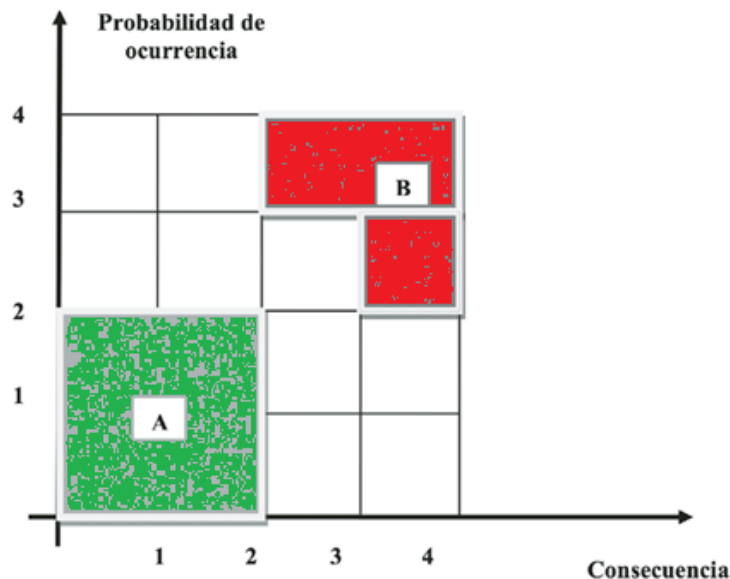


Figura 9: Mantenimiento basado en el riesgo (Montilla Montaña, 2016)

2.1.2. Rendimiento de los equipos

El rendimiento de los equipos industriales está directamente relacionado con las actividades que se realizan desde el departamento de mantenimiento de una empresa, independientemente del tipo de metodología que se tenga implementado para garantizar el correcto funcionamiento de los activos. Las actividades que se realizan para tratar de llevar cualquier maquinaria o equipo hacia su estado original lo más parecido a las condiciones iniciales que traía de fábrica, si se realizan de manera eficiente con base a algún método y no solamente como actividades “Apaga fuego” de los correctivos, no solo mejorará la productividad de la planta en general, sino que también se verán efectos en los que se mejoran significativamente los costos operativos de la planta, también el ciclo de vida del activo se mejorará de gran manera y sobre todo se asegurará que los productos terminados al final de la producción sean de calidad, que es lo que el cliente siempre estará buscando en el mercado. Existen algunas formas en las que se puede medir de forma cuantitativa la eficiencia de los equipos de las plantas de manufactura desde el punto de vista de mantenimiento, tal vez no son métodos que tienen el nombre de eficiencia directamente, pero al analizarlos brindan esa información que es requerida en ocasiones por la alta dirección de la compañía, estas dos formas son las siguientes:

2.1.2.1. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)

El tiempo promedio entre fallas de un activo o máquina, es uno de los parámetros más comunes que se les puede medir a los equipos, ya que son parámetros que básicamente se utilizan casi en cualquier método de aplicación de mantenimiento, en ocasiones este parámetro es calculado directamente por el personal que labora en la empresa en donde se encuentra instalada la máquina, pero también es posible que este indicador sea brindado por el fabricante en las fichas técnicas de las maquinarias, y se refiere al tiempo promedio de fallas de un equipo. Este indicador proporciona una indicación bastante precisa de la confiabilidad de los equipos, ya que es una medida cuantitativa de cuánto tiempo pasa entre una falla y la aparición de otra, lo cual es evidente que entre más alto sea el valor de MTBF el equipo pasará mucho más tiempo funcionando sin que presente ninguna falla, pero entre más bajo es el valor significa que el equipo estará fallando constantemente. Al tener un número mínimo o lo suficientemente bajo de fallas, se reducirá el

tiempo de inactividad y por ende se mejorará el rendimiento tanto del equipo como de la planta en general.

$$MTBF = \frac{T_{total}}{\text{Número de fallas}}$$

Donde: MTBF: Tiempo medio entre fallas.

Ttotal: Tiempo total de operación.

Numero de fallas: Numero de veces que se han presentado fallas

El MTBF se calcula dividiendo el tiempo total que una máquina ha estado en operación, entre el número de fallas que se han presentado durante un periodo de tiempo. Este valor no es una constante en las máquinas, ya que este puede ser modificado ya sea para empeorar, así como también para mejorarlo, haciendo uso de todas las herramientas de mantenimiento existentes, escogiendo la que más se adecue al tipo de industria y de maquinaria.

2.1.2.2. Tiempo promedio de reparación (MTTR)

Otro indicador que es clave para el análisis de datos y saber la eficiencia de los equipos desde el punto de vista de mantenimiento, es el tiempo promedio de reparación el cual está estrechamente relacionado con el indicador anterior, ya que en el momento en que el anterior se ve afectado por la aparición de una falla, entra este otro indicador a contabilizar el tiempo que está fuera de servicio un equipo, es decir que es el tiempo necesario para reparar un equipo desde el momento en que apareció una falla hasta que finalmente se logró la reparación hasta regresarlo a su estado normal de operación. El objetivo de este indicador, aparte de tener definido cuanto es el tiempo que se está tardando el trabajo de mantenimiento, es disminuir en gran medida los tiempos en que los equipos se encuentra fuera de servicio, debido a que no se puede mejorar lo que no se mide, lo cual se traduce en mayor rendimiento general.

$$MTTR = \frac{T_{total} - \text{reparaciones}}{\text{Número de reparaciones}}$$

Donde: MTTR: Tiempo promedio de reparaciones.

Ttotal: Tiempo total dedicado a la reparación.

Numero de reparaciones: Numero de veces que se han realizado reparaciones

El MTTR se calcula dividiendo el tiempo total que dura una reparación en una máquina, entre el número de reparaciones que se han presentado durante un periodo de tiempo. Al igual que el indicador anterior, también este se puede mejorar, mediante la optimización de los procesos de reparación, ya sea actualizando las tareas con base a manuales del fabricante, optimizando los procesos de reparación, capacitando al personal, y hoy en día con la utilización de tecnologías que faciliten diagnósticos rápidos y reparaciones eficientes.

2.1.3. Costos de mantenimiento

A lo largo de la historia de la industria en general, los departamentos de mantenimiento de la gran mayoría de las empresas que se dedican a la manufactura en masa de cualquier producto han tenido que afrontar las dificultades en cuanto a presupuestos se refiere, ya que en los inicios de la maquinaria industrial se ha venido tomando como un gasto al departamento de mantenimiento, ya que generalmente se ha visto como el área que no genera valor y solamente gasta en refacciones que están dentro de la bodega y genera pérdidas por costos de oportunidad cuando tiene algún equipo parado, debido a eso las empresas tomaban la decisión de solamente quedarse con el mantenimiento correctivo.

El costo unitario de la producción es una de las variables que más incidencia tienen en el balance general de la rentabilidad de una empresa la cual se calcula simplemente como la suma de todos los costes de fabricación dividida entre el volumen de producción, como por ejemplo para una fábrica de pinturas los costos de fabricación son todos los costos asociados con la materia prima que se utiliza, ya sean todos los ingredientes que lleva la misma pintura así como también otros insumos necesarios durante el proceso de manufactura como por ejemplo etiquetas, tapaderas, envases, botellas, la energía eléctrica, el pago de las planillas y todo lo necesario para fabricarla, luego esto se divide entre la cantidad total de pintura que se ha fabricado. Los costos que están directamente relacionados con el departamento de mantenimiento también son de suma

importancia y son factor clave en la generación de valor de la compañía por lo que se deben invertir esfuerzos para que este sea gestionado de la manera más eficiente posible. La mejora de la confiabilidad de los activos influye en los costos unitarios de producción, ya que con equipos que fallan menos los gastos se verán disminuidos y se aumentará la productividad de las líneas de producción.

Dentro de todos estos costos en los que incurre una compañía, se encuentran los costos de operación de cada una de las máquinas, dentro de los cuales influye en gran medida los costos que generan las actividades de mantenimiento:

$$CO = C_{co} + C_{lu} + CM + C_{rm} + C_{pd}$$

Donde: CO: Costo de operación de una máquina

C_{co} : Costo de combustibles.

C_{lu} : Costo de lubricantes.

CM: Costo de labores rutinarias de mantenimiento.

C_{rm} : Costo de reparaciones mayores no rutinarias.

C_{pd} : Costo de partes de desgaste.

Como se observa en la fórmula anterior, se presentan solo los costos más importantes que se ven asociados a la operación de una máquina, puede haber muchos más costos asociados como por ejemplo el costo por capacitación de parte del fabricante al departamento de mantenimiento, o visitas regulares programadas, pero en esencia estos son los más importantes. Por tanto, las actividades de mantenimiento tienen un gran potencial en cuanto al impacto que tiene en los costos normales de operación de una máquina, ya que dependerá de la estrategia de mantenimiento utilizada que ayudará a bajar los costos, muchas veces con actividades tan simples se puede tener una mejora significativa en los costos de operación como por ejemplo en capacitaciones constantes en las que se haga conciencia al operario a cuidar de la máquina, aplicando buenas prácticas con base a las recomendaciones del fabricante, o a experiencias que muchas veces ellos mismos expresan en máquinas similares. Utilizando metodologías simples pero que brindan mucha información como el análisis de causa raíz o 5 por que cuando ocurre una falla, o para realizar

análisis de consumibles como aceites, grasas, filtros, es decir haciendo análisis de las causas que generan cambios en los rendimientos de las diferentes partes de la máquina en general.

$$CP = VRN + DP + SI$$

Donde: CP: Costo de posesión de la máquina

VRN: Valor de reposición o nuevo.

DP: Depreciación o reducción paulatina de valor debido al deterioro.

SI: Pólizas de seguro e impuestos.

Otro costo importante es el costo por la adquisición de una máquina, que son los costos que van asociados a la simple adquisición de una máquina o equipo, cabe recalcar que, a diferencia de los costos de operación, los costos de posesión se estarán generando ya sea que la máquina opere o no. Al adquirir una máquina el ideal es que se haga una proyección de los costos tomando en cuenta la vida útil, el promedio de producción, los costos operacionales y la empresa debería hacer el ejercicio de tener disponible un valor de recambio para dicha máquina. A partir de estos dos costos se obtiene el costo de operación y adquisición, que es simplemente la suma de los costos CO y CP, lo cual generalmente las empresas han desarrollado una forma que les resulta más fácil de identificar los diferentes costos involucrados en el costo de operación y posesión, y esto es la separación de estos costos clasificándolos como costos variables y costos fijos.

Los costos fijos se refieren a gastos que independientemente la planta esté funcionando o está detenida se deben cancelar como por ejemplo los pagos de alquiler de terrenos, los pagos de las planillas de todos los colaboradores incluidos operadores, gerentes, jefes, personal de vigilancia, etc. En cambio, los costos variables son los costos que se deben cancelar con base a los niveles de producción que se tengan en cierto periodo de tiempo, como por ejemplo los costos por materia prima, costos por energía eléctrica, combustibles, pagos de horas extras o personal temporal, tal como se observa en la gráfica de la Figura 10 en donde los costos fijos son una constante en monto, y los costos variables dependen de una variable “x” que son las unidades producidas.

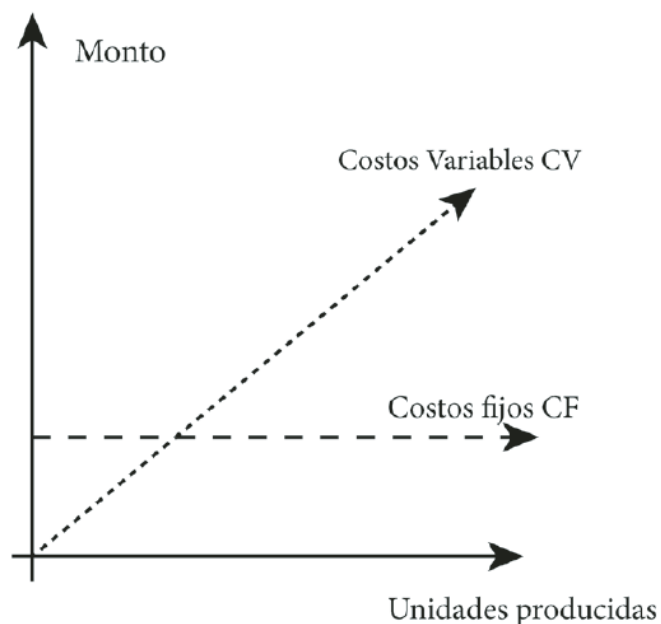


Figura 10: Comportamiento de costos fijos y variables (Montilla Montaña, 2016)

Como se observa en la Figura 11 tal como se tiene que los costos de operación y posesión es la sumatoria de los costos operativos y los costos por posesión, los costos totales son la combinación de los costos variables y los costos fijos, lo cual se ve representado en la gráfica con el nombre de CT. Una de las consignas de los líderes de las empresas es tratar de acercar lo más posible a cero los costos fijos, es decir que los costos totales fueran solamente los CV, pero en la realidad eso es sumamente difícil y será tarea de los gerentes gestionarlos para que los CF sean lo más bajo posible. Si se agrega también gráficamente los ingresos (IV) llegará un punto en la gráfica en la que éstos superen la gráfica de los costos totales, y será a este punto en donde se puede

afirmar que la adquisición de una máquina es rentable para la empresa, y este punto es el punto de equilibrio PE de la compra de la máquina.

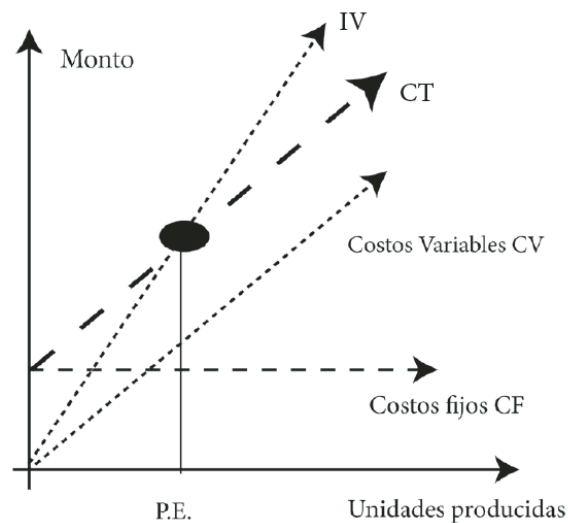


Figura 11: Comportamiento de costos versus ingresos (Montilla Montaña, 2016)

2.1.4. Responsabilidad medioambiental

La responsabilidad medioambiental es una preocupación que en general está teniendo tendencias al alza en la mayoría de las empresas en el mundo, ya que cada vez se hace más concientización del cuidado que se debe tener con el planeta, y que también hasta cierto punto es un tema que ahora en la industria moderna le da mucho más valor al producto que una compañía ofrece en el mercado. También las operaciones de las empresas de la actualidad, se ven bastante presionadas debido a que día a día los entes gubernamentales de los países, especialmente los países desarrollados, se preocupan y generan diferentes normativas, recomendaciones y leyes que van enfocadas a la reducción de los impactos ambientales que las empresas tiene especialmente con sus residuos de sus procesos, como por ejemplo residuos de aguas sucias, huellas de carbono, contaminación auditiva, entre otras cosas más, sin dejar de mencionar que también la sociedad que está mucho más informada que antes con el auge del acceso a la información de la sociedad actual, presionan también para luchar por los cuidados medioambientales por el cual debería de preocuparse toda la ciudadanía en general.

En este contexto, uno de los departamentos que más pueden influir en la responsabilidad medioambiental de la empresa es el área de mantenimiento, ya que esta juega un papel muy importante en la implementación de tareas de mantenimiento, independientemente el tipo de metodología que se utilice, que sean sostenibles y más allá de optimizar la eficiencia y disminuir el número de intervenciones de mantenimiento, también minimicen los efectos adversos que tienen las empresas con el medio ambiente, ya que los técnicos en sus actividades diarias pueden realizar actividades que disminuyan los efectos de las emisiones de gases contaminantes, pueden hacer modificaciones de las máquinas a fin de disminuir los contaminantes, así como también las estrategias de mantenimiento incluyen una gestión adecuada de los desechos que generan los equipos, optimizando el consumo de la energía eléctrica, reducción de emisiones de gases contaminantes, y también el uso de materiales reciclables o de segunda vida para disminuir la contaminación por medio de desechos, puntos que son claves para la responsabilidad medioambiental de mantenimiento.

Existen empresas que tiene departamentos de medio ambiente, como por ejemplo la empresa de pinturas en que está basado el estudio cuenta con su propio departamento de medio ambiente, que se encarga de velar que se cumplan todas las normativas para el correcto cuidado de los recursos naturales que se ven involucrados en la producción de pinturas, como lo es el agua la cual entra en contacto con diferentes químicos por lo que se tiene diferentes medios de tratamiento de agua para luego depositarla en un dique de infiltración, el tema del consumo energético con iniciativas como la eficiencia energética.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

La ingeniería de mantenimiento es una función que tiene el personal de una compañía en la cual su principal objetivo es tener la responsabilidad de garantizar que las técnicas de mantenimiento que se están utilizando son las más eficaces, que los equipos o instalaciones que se realizan como parte del programa de proyectos de ingeniería, se diseñen o se modifiquen para garantizar que los equipos serán fácilmente mantenibles, un ejemplo de la mantenibilidad de los equipos se puede observar en una empresa de manufactura, la cual tiene una instalación de red de tuberías de diferentes medidas para mover ciertos líquidos, estos líquidos tienen distribuidos de

manera estratégica filtros para garantizar la limpieza de los líquidos que allí transportan, pero en un claro ejemplo de lo que no se debe hacer es que no se consideró la mantenibilidad de la instalación de los filtros de canasta, por lo que ahora que el sistema completo funciona, los filtros necesitan mantenimiento y dos de estos no se pueden sacar ya que topan con la tubería, está más que claro que desde el inicio existe un problema con la ingeniería del proyecto, ya que son problemas que no se consideraron a la hora de realizar el diseño y no se pensó en que mantenimiento necesita intervenir, por lo tanto se debe dejar bien claro que desde el punto de vista de ingeniería se deben considerar que en la gestión de cualquier activo físico siempre será necesario mantenerlo y de vez en cuando será necesario modificarlo.

Algunos de los principales diccionarios definen el área de mantenimiento como “Hacer que continúe” (Oxford) o mantener algo en el estado existente (Webster) lo que significa preservar algo.

Con el mantenimiento centrado en la confiabilidad se tiene la tarea de identificar todos los fallos funcionales de los activos de la planta, las funciones que estos realizan y también identifica todas las causas probables que generan estos fallos, luego de eso dentro de la metodología se procede a identificar los efectos que generarán estos posibles modos de fallo y a determinar en qué medida importan los efectos. Una vez recopilada esta información, se puede seleccionar la política de gestión de activos que más se vaya adecuando a la compañía, es importante tener claro que cada política de empresa será diferente a la de otra empresa, ya que estas políticas dependerán siempre de las necesidades de cada una de las empresas. Este tipo de mantenimiento es una filosofía de mantenimiento en realidad, que optimiza la confiabilidad de un equipo o sistema que funciona bajo condiciones de trabajo previamente definidas en función de cuan críticos son los activos tomando en cuenta posibles efectos que originaran los modos de falla de los activos sobre la seguridad o el medio ambiente.

El mantenimiento basado en la confiabilidad es un método de mantenimiento cuyo principal objetivo es mejorar la confiabilidad en la operación de los sistemas, basando la filosofía en un estudio detallado y exhaustivo de los activos que conforman la planta, separándolos por las

diferentes zonas o partes del proceso en el ámbito productivo. El estudio que se realiza dentro de la planta para la implementación de RCM, no solamente se toman en cuenta las características ya sea técnicas o de funcionamiento de cada uno de los equipos, sino que más bien se hace un estudio del área como un solo conjunto, es decir que se estudia un proceso y en lugar de ver a un equipo como individual, se ve de manera más específica la función que estos cumplen en el proceso centrándose en el impacto que tiene cada uno dentro de lo funcional u operacional, de seguridad y del medio ambiente, lo que ayudará también a definir cuáles de estos equipos son críticos y se les dará prioridad para las tareas de mantenimiento. RCM es un proceso para establecer los niveles mínimos de mantenimiento seguros, garantizando al mismo tiempo que un equipo continúe funcionando de acuerdo con su diseño dentro del contexto operativo actual. Esto se logra proporcionando un medio para determinar las estrategias óptimas de mantenimiento y operación, basadas en la probabilidad y las consecuencias de los modos de falla analizados.

Es posible hacer una comparación entre dos de las filosofías de mantenimiento más importantes que se pueden implementar al momento, que son el mantenimiento productivo total TPM y el mantenimiento centrado en confiabilidad, ya que con ambos se obtienen importantes resultados para garantizar que las fallas tendrán tendencias a la disminución, la diferencia entre estas dos metodologías es que el TPM tiene como objetivo principal incrementar la productividad de los equipos buscando el apoyo de los operarios para lograrlo, y el RCM tiene como objetivo final garantizar la confiabilidad de un proceso o de un equipo. Hay estudios de empresas en el mundo que han logrado la implementación de ambas metodologías, como por ejemplo una empresa en Etiopía. (Gedefaye Achamu, 2018)

Para entender más el tema de mantenimiento basado en la confiabilidad, se puede remontar a un ejemplo de la historia de la aeronáutica por medio del cual se iniciaron las investigaciones correspondientes que dieron origen a la evolución del mantenimiento centrado en confiabilidad, y todo inició debido a que en los años 50 cuando la industria aeronáutica estaba en pleno auge y el crecimiento del número de vuelos estaba en alza, Stanley Nowlan y Howard Heap iniciaron una investigación muy concienzuda y meticulosa, sobre la accidentalidad de la aviación comercial de Estados Unidos, ya que en aquellos años la accidentalidad de los vuelos aéreos comerciales era de aproximadamente sesenta accidentes por cada millón de despegues según las estadísticas y el

estudio que realizaron Nowlan y Heap, y ellos lograron identificar que de todos esos accidentes que sucedían aproximadamente cuarenta accidentes por cada millón de despegues, aproximadamente dos terceras partes, se debían a fallas relacionadas a los equipos en sí (Nowlan & Heap, 1978). Esta cantidad de accidentes era un número muy elevado para la época, ya que, si se escala a la situación y condiciones actuales, sería más o menos un promedio de dos accidentes aéreos por día en el mundo, lo cual sería una catástrofe tomando en cuenta la cantidad de vuelos y la cantidad de personas que las aerolíneas traslada a diario.

Está bien claro cuáles eran los objetivos principales de la realización del estudio, que es mejorar la seguridad de la aviación civil y disminuir hasta lo más cercano a cero la cantidad de accidentes, como resultado de varios años de investigación se creó el libro “Reliability Centered Maintenance” que ahora es la base inicial del sistema de mantenimiento basado en confiabilidad (Nowlan & Heap, 1978), y en la base también del documento llamado Evaluación del Mantenimiento y desarrollo del programa MSG con el cual se realizó la planeación de programas de mantenimiento para los fabricantes de aviones y las aerolíneas.

En la actualidad, las estadísticas de accidentes aéreos son mucho más favorables, ya que ahora son dos accidentes por cada millón de despegues alrededor del mundo (Nowlan & Heap, 1978) lo cual ha convertido a la aeronáutica civil en el sistema de transporte de personas más seguro en el mundo, incluso estadísticamente es más probable tener un accidente en un vehículo conduciendo en el pueblo más tranquilo, que tener un accidente en un vuelo aeronáutico. Gracias al estudio de Nowlan y Heap se llegó a la conclusión que desmintió algunos paradigmas que se tenían como verdad casi absoluta en los años 50's y estos son:

- La relación entre la edad de un componente y su desgaste (principalmente donde hay contacto con la materia prima, producto intermedio o terminado) o deterioro no es lineal.
- No todos los equipos/componentes se comportan de acuerdo con la “curva de la bañera” (Curva A de la Tabla 1).
- Hay conexión entre la confiabilidad de un componente y la edad operacional.
- Cuanto más a menudo se revise menor es la probabilidad de falla.

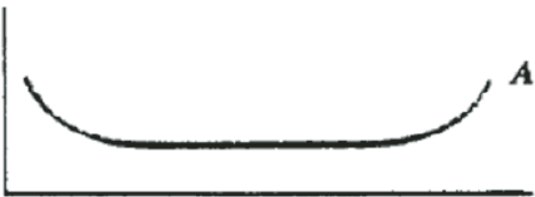
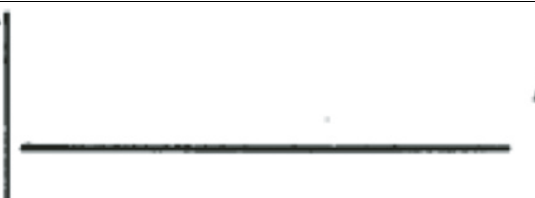
- Un equipo posee de fábrica una capacidad para cumplir o no una función o cometido, y mantenimiento no puede garantizar por sí mismo que esa capacidad sea aumentada.

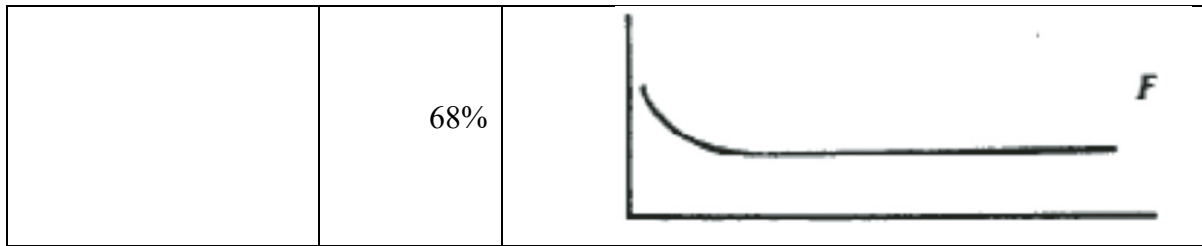
Por otro lado, también se llegaron a conclusiones o paradigmas nuevos luego de la investigación, lo cual se pudo comprobar y son los siguientes:

- No existe un único modelo de patrón de falla (el de “la bañera”), sino que son seis patrones diferentes.
- Los modelos de patrón de falla dependen de la complejidad de las máquinas/equipos. Entre más complejos sean los equipos se comportarán de acuerdo con los patrones E y F, mientras que entre más simples sean, se comportarán de acuerdo con los modelos A, B y C (Curvas de la Tabla 1).
- El RCM encontró que los efectos y consecuencias de una falla dependen de cada entorno productivo en particular, es decir reconoció el concepto de la trilogía máquina – operador – medio ambiente o contexto operacional.
- La función que un equipo provee no es única, sino que depende del contexto operacional.
- Cada componente/equipo/máquina posee de fábrica su propia combinación de modos de falla y su propia intensidad de falla (confiabilidad inherente). Éstos se pueden alterar (para mal) al introducirlo en un contexto operacional o trilogía máquina – operador – medio ambiente particular.
- Puesto que un componente/equipo/máquina es la suma de sus partes, cada una de las cuales poseen su propia confiabilidad, entonces será imposible obtener una confiabilidad superior (e incluso igual) a la del componente de mejor confiabilidad. La confiabilidad global es posible cuantificarla, gracias a los aportes y herramientas provistas por la Estadística y la Teoría de la Confiabilidad.
- Cualquier intento de definir un programa/plan o política de mantenimiento debe comenzar por la definición de las funciones o estándares de funcionamiento esperados en un contexto operacional.

- Mantenimiento lo único que puede hacer es garantizar que el componente/equipo/máquina provea su capacidad incorporada o su confiabilidad inherente.

Tabla 1: Patrones de falla de componentes de la industria aeronáutica en Estados Unidos
(Nowlan & Heap, 1978)

11% podría beneficiarse de una edad límite de funcionamiento	4%	
	2%	
	5%	
89% no puede beneficiarse de una edad límite de funcionamiento	7%	
	14%	



- Curva A: Curva de la bañera. La máquina/equipo/componente posee alta mortalidad infantil, es decir tienen una probabilidad inicial de falla alta, luego de lo cual se estabilizan, para finalizar la vida útil en una zona de desgaste acelerada.
- Curva B: El patrón de falla “ideal” y tradicional antes del RCM. Pocas fallas a lo largo de la vida útil, culminando en una zona de desgaste elevado.
- Curva C: Un constante incremento de la probabilidad de falla infantil, seguida de un comportamiento aleatorio de la probabilidad de falla.
- Curva D: Rápido crecimiento de la probabilidad de falla, seguida de un comportamiento aleatorio.
- Curva E: Fallas aleatorias, sin ninguna relación entre la edad y la probabilidad de falla.
- Curva F: Alta mortalidad infantil, seguida de un comportamiento de aleatorio de la probabilidad de fallos.

Solo en los patrones de Falla A, B, y C hay una relación predecible entre el desgaste del componente y su vida útil, sumando en los tiempos del estudio el 11% de los equipos/componentes de la industria aeronáutica. Por otro lado, los patrones que muestran una relación aleatoria entre la edad y el desgaste, es decir los patrones D, E y F, totalizaban el 89% de los equipos/componentes de dicha industria (Nowlan & Heap, 1978); esta elevada aleatoriedad propició el advenimiento y desarrollo del Mantenimiento Predictivo en la década de 1970, con el objetivo de anticiparse y predecir la ocurrencia de fallas. El estudio de Nowlan y Heap mostró que a mayor complejidad del equipo/componente, el comportamiento de sus patrones de falla obedecían a los modelos E y F. Con todo este panorama de nuevos conceptos, conocimientos, paradigmas tradicionales rotos y nuevos paradigmas, fue diseñada la metodología RCM.

2.2.1. Ventajas del mantenimiento centrado en confiabilidad

El mantenimiento centrado en confiabilidad es una de las filosofías de mantenimiento que ha demostrado en gran manera que ha generado mejoras sustanciales en la industria de la aviación civil, y efectivamente fue ese el fin con el cual fue creado el RCM por parte de Nowlan y Heap. La aplicación de mantenimiento RCM en otras industrias diferentes a la aviación, también ha mostrado que se obtienen resultados muy exitosos, es esa la esencia por la que el objetivo del presente trabajo de investigación es la aplicación en una empresa de fabricación de pinturas.

Algunas de las ventajas de la aplicación del RCM según (Montilla Montaña, 2016) son:

- Mejora de la seguridad y el cuidado del medio ambiente. Hay que recordar que RCM prioriza la afectación a las personas y al entorno.
- Mejora de los rendimientos operativos, porque se reduce significativamente la cantidad y severidad de las fallas, y como se adquiere un mejor conocimiento de las máquinas/equipos, se simplifican y mejoran los procedimientos operativos a pie de máquina.
- Disminución de los costos totales de Mantenimiento rutinario, porque se reduce la cantidad y complejidad de las tareas de Mantenimiento.
- Se propicia el trabajo multidisciplinario, promoviendo el trabajo en equipo con relaciones armoniosas y colaborativas entre diversas dependencias de la compañía.
- Se garantiza el cumplimiento de la vida útil de las máquinas/equipos al aplicar Mantenimiento predictivo.
- Si RCM se aplicara en una empresa que tiene implementado el Mantenimiento Preventivo, la carga de trabajo rutinaria preventiva se puede reducir entre un 40% y un 70%. La razón de esta reducción es que el mantenimiento preventivo aplica a los diversos equipos, concienzudamente a cada cierta frecuencia, las tareas recomendadas por el fabricante y las sugeridas por la experiencia, sin importar mucho la criticidad de la máquina dentro del proceso productivo, mientras que en el RCM, primeramente se desarrolla un análisis de criticidad por áreas y secciones para identificar las máquinas/equipos más críticos, seguidamente se aplica el análisis AMEF para determinar la criticidad de cada subsistema dentro de las máquinas/equipos críticos, y por último se concentran los esfuerzos en dichos subsistemas. Si RCM se aplicara para desarrollar un nuevo sistema de mantenimiento en

una empresa, el resultado sería que la carga de trabajo de mantenimiento será mucho menor que si el sistema se hubiese desarrollado por los métodos convencionales.

- Se crea o se mejora la base de datos mantenimiento, gracias a la adecuada aplicación de los análisis AMEF y de la elaboración y documentación de los consecuentes planes de acción.

2.2.2. Disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de los activos

Dentro del departamento de mantenimiento de una empresa cualquiera, existen algunos conceptos básicos que todo el personal debe manejar, ya que son conceptos indispensables para cualquier campo en el que se desee aplicar alguna mejora en el proceso. Estos términos están completamente relacionados entre sí y determinan la efectividad operativa que tiene la planta. Es decir, para una compañía es clave comprender estos tres términos ya que son clave para realizar una correcta evaluación del desempeño de los equipos.

2.2.2.1. Disponibilidad

El tema de la disponibilidad es un concepto bastante interesante en la rama del mantenimiento, ya que desde el punto de vista de un equipo se refiere a la capacidad que tiene un activo para estar en funcionamiento en el momento en que se lo necesite, es decir llevar a cabo con éxito la función requerida, durante un tiempo determinado. La disponibilidad de un equipo de trabajo es un valor cuantitativo, por lo que es posible calcularlo en base a la siguiente fórmula:

$$D = 100x \frac{TPP - TPNP}{TPP}$$

Donde: D: Porcentaje de la disponibilidad de la máquina/equipo

TPP: Es el tiempo programado de producción.

TPNP: Es el tiempo en el que ocurren paros no programados.

2.2.2.2. Confiabilidad

La confiabilidad de un equipo es un concepto que, para la implementación de mantenimiento centrado en la confiabilidad, es uno de los pilares más importantes de un sistema de RCM, ya que este permite analizar la probabilidad de que un sistema funcione sin fallos durante un periodo de tiempo definido, lo cual es de suma importancia para realizar el estudio en donde se trate de predecir las fallas con base al comportamiento de los equipos, ayudando en la reducción de costos. Básicamente es la probabilidad que una máquina o equipo no falle durante su operación. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}}$$

Donde: TPEF: Confiabilidad o tiempo promedio entre fallas.

T_{op} : Es el tiempo real de operación de la planta.

N_{arr} : Es el numero de arranques de la planta.

2.2.2.3. Mantenibilidad

La mantenibilidad de un equipo se refiere a la facilidad con que este puede ser reparado o puesto en sus condiciones óptimas de funcionamiento cuando se presenta un fallo, es decir la probabilidad de que se pueda reparar en un periodo de tiempo dado cuando el mantenimiento es realizado por medio de tareas o procedimientos ya definidos en un plan de mantenimiento. Este concepto también se puede evaluar por medio del tiempo promedio de reparaciones:

$$TPPR = \frac{T_{nop}}{N_{arr}}$$

Donde: TPPR: Mantenibilidad o tiempo promedio para reparar.

T_{nop} : Es el tiempo real que no opera la planta.

N_{arr} : Es el numero de arranques de la planta.

2.3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN EXPERIENCIAS DE PAISES DESARROLLADOS COMO ESTADOS UNIDOS Y SUECIA.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM es una estrategia de gestión de mantenimiento que ha sido ampliamente utilizada en los departamentos de mantenimiento de diferentes empresas de los países desarrollados como por ejemplo Estados Unidos y Suecia, ya que por medio de la aplicación de RCM estas empresas saben determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo de la planta siga funcionando y realizando todas las acciones para lo cual fue diseñado en su contexto operacional actual (Soporte & compañía, s.f.), ya que todo elemento físico que se pone en servicio se espera que cumpla con funciones específicas de acuerdo al proceso al cual está ligado dicho equipo, por lo tanto con las actividades que se realizan cuando es mantenido lo que se espera es que vuelva a realizar las funciones específicas antes mencionadas, todo esto con el objetivo de optimizar los recursos, la reducción de costos y sobre todo el aumento de la vida útil de los activos en cuestión. En estos países se ha desarrollado en gran manera la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad en diversas industrias entre las cuales está la industria energética, de manufactura, entre otras, para garantizar la confiabilidad operativa y la continuidad del servicio.

2.3.1. Industrias que utilizan RCM en la actualidad

El mantenimiento centrado en confiabilidad ha sido ampliamente utilizado en diversas industrias de los países desarrollados, entre las cuales se encuentran:

- **Industria aeronáutica:** En Estados Unidos uno de los principales lugares en donde se aplica el RCM es en la industria de la aviación comercial y militar, que en realidad ha sido de las industrias que han aportado fuertemente para el desarrollo y adopción de la metodología RCM para garantizar la confiabilidad y sobre todo la seguridad de las aeronaves cuando se encuentra prestando el servicio de traslado de personas, ya que en esta industria una falla no simplemente detiene una máquina, sino que puede llegar a cobrar muchas vidas de personas, por lo que algunas aerolíneas famosas de Estados Unidos implementan RCM para evaluar los riesgos de las fallas que puedan presentar los aviones, transformándolas en actividades que mantienen en buen funcionamiento las aeronaves (Nowlan & Heap, 1978).

- **Industria energética:** Las empresas de energía especialmente en Suecia, utilizan también el mantenimiento centrado en confiabilidad para mejorar el rendimiento de sus plantas de energía nuclear y termoeléctrica.
- **Manufactura y procesos industriales:** En sectores de manufactura también es muy viable y son varias empresas las que adoptan la aplicación de esta metodología por todos los beneficios que se pueden obtener de la aplicación de la misma, algunos ejemplos pueden ser empresas del sector automotriz o empresas de la producción de acero, las fábricas estadounidenses aplican este tipo de gestión de mantenimiento para aumentar la disponibilidad en sus líneas de producción, maximizando las ganancias, eliminando lo más que se pueda el tiempo muerto y mejorando el ciclo de vida de los equipos.

2.3.2. Proyección a futuro del RCM

Realizando una proyección a futuro acerca del mantenimiento centrado en confiabilidad, realmente se ve una metodología que es bastante prometedora a nivel mundial, ya que el mundo está atravesando una transformación digital en casi la mayoría de los procesos industriales, ya que están pasando de maquinaria un tanto análoga, a diferentes tecnologías que ahora generan una gran cantidad de información útil que está a disposición de las diferentes compañías, como por ejemplo la implementación de Internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial, tecnologías como big data, es decir se está haciendo una transición de industria hacia la comúnmente denominada Industria 4.0, en la cual todas las empresas que lo apliquen pueden tener acceso a un monitoreo en tiempo real de sus maquinarias así como del estado de la producción en cualquier hora y desde cualquier parte del mundo. Se espera que, a un futuro cercano de corto o mediano plazo, las corporaciones en el mundo empiecen a adoptar más la utilización e implementación de diferentes metodologías de mantenimiento para ser competitivos y sobre todo garantizar la continuidad de sus negocios, estrategias como mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en confiabilidad, entre otros.

2.3.3. Industrias de pintura que aplican RCM

Uno de los sectores que es base en el estudio de este documento, es el sector industrial químico específicamente de los fabricantes de pinturas, este tipo de empresas también han adoptado diferentes metodologías de mantenimiento para garantizar el correcto funcionamiento de

sus activos, entre los cuales está la aplicación de RCM. La industria de la pintura industrial se enfrenta a varios desafíos relacionados con la optimización del rendimiento de sus equipos, la calidad del producto y la gestión eficiente de los recursos. Las empresas de pinturas que operan fabricando productos para los sectores más exigentes como la industria automotriz, la industria de la construcción o pinturas de grado alimenticio, dependen en gran manera de sistemas de producción complejos y costosos que deben funcionar con la máxima eficiencia para garantizar disponibilidades cercanas al 100%, reducir tiempos de inactividad, minimizar el desperdicio de materia prima, y sobre todo garantizar que el producto final mantenga una calidad consistente entre lotes, específicamente en los colores de las pinturas, ya que en una pintura de calidad se espera que un tono de color sea exactamente el mismo, ya sea que se compre ahora, se compre dentro de un mes o se compre en 10 años.

Por lo tanto, las actividades del departamento de mantenimiento deben ir orientadas a uno de los principales sistemas de gestión de mantenimiento, como por ejemplo el mantenimiento centrado en confiabilidad, ya que éste ofrece un enfoque estratégico para gestionar y garantizar el correcto funcionamiento de los activos con el objetivo de maximizar su confiabilidad, disminuir los tiempos muertos, aumentando el rendimiento a lo largo del tiempo. Esto es sumamente importante, ya que la implementación de RCM elimina el hecho de simplemente seguir con un programa de mantenimiento preventivo o peor aún, un programa de mantenimiento reactivo o correctivo, ya que esta basa todas sus actividades en un análisis detallado para identificar las funciones críticas del sistema, las consecuencias de las fallas y finalmente, las estrategias más eficientes para prevenir esas fallas o mitigarlas cuando ocurren.

- Optimización del rendimiento de los equipos

En la actualidad las fábricas de pintura industrial son líneas de producción con equipos altamente automatizados y que generalmente deben operar durante periodos de tiempo prolongados sin interrupciones para cumplir con la demanda de producción y la demanda del mercado, ya que estas fábricas proveen producto que luego se convierte en materia prima para industrias de pintura de vehículos, de estructuras industriales, de diferentes estructuras que estarán a la intemperie, algunos de los equipos que tienen estas empresas son molinos de materias primas, mezcladores de pinturas y diferentes productos, sistema de control de diferentes temperaturas,

humedades y presión, equipos de dispersión en línea, equipos dosificadores, los cuales funcionan en conjunto y a veces controlados desde un panel central, que son importantes para mantener la productividad de las empresas. Es decir, que una falla en cualquiera de estos equipos puede desencadenar un paro en la cadena de producción generando muchas pérdidas para la empresa en concepto de costo de oportunidad.

- Gestión de energía

El proceso de fabricación de pintura puede llegar a ser un proceso altamente demandante en cuanto a energía eléctrica, ya que algunos productos tienen tiempos de proceso que son extremadamente altos, cómo por ejemplo 10 horas de mezcla, por lo tanto este tipo de procesos puede llegar a ser intensivo en cuanto a consumo de energía eléctrica, especialmente si se fabrican grandes volúmenes de pintura, otro ejemplo es que en estas plantas de manufactura se suelen utilizar diferentes equipos en sus procesos, como por ejemplo hornos, molinos e incluso equipos auxiliares al proceso de producción como compresores, sistema de enfriamiento, bombas para agua, montacargas, generadores, que en conjunto generan alto consumo de energía eléctrica. Poco a poco, para las compañías también ha tomado importancia la gestión eficiente de la energía eléctrica, ya que esto reduce los costos operativos y también es crucial para alcanzar los objetivos de sostenibilidad, en ese sentido RCM permite identificar áreas en las que el consumo de energía puede ser optimizado encontrando en dónde ajustar el proceso y así mejorarlo. Por ejemplo, hay empresas certificadas en norma ISO50001.

- Mantenimiento basado en el análisis de fallas críticas.

Uno de los aspectos más importantes de la implementación de la metodología de mantenimiento basado en confiabilidad es el análisis de efectos y criticidad de las fallas ya que en el estudio de mantenimiento se sabe que las fallas no siempre son iguales, por lo tanto tienen consecuencias diferentes, algunas mucho más graves que otras, por ejemplo a una máquina le puede fallar una luminaria que simplemente es para comodidad del operario, así como también le puede fallar una faja de transmisión que básicamente detendrá la máquina y el impacto será mucho más grave. RCM permite realizar una priorización de las fallas, y en la industria de pinturas, algunos de estos fallos pueden afectar directamente en la calidad del producto como, por ejemplo,

una falla del sistema de enfriamiento hará que el tono de color cambie por alta temperatura o si un sistema de dosificación falla la cantidad de materia prima agregada no será la de la formula.

- Garantía de calidad constante.

Uno de los puntos más importantes para las empresas que se dedican a la fabricación de pinturas es garantizar la calidad constante de sus productos, pues fluctuaciones en el tema de calidad pueden dañar significativamente la reputación de la empresa y generar elevados costos adicionales en concepto de reprocesos. La aplicación de la metodología RCM busca garantizar que los equipos que se ven involucrados directamente en la calidad del producto funcionen correctamente.

2.4. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN EL SALVADOR

El mantenimiento basado en confiabilidad es una metodología estructurada que se utiliza para garantizar la fiabilidad de los activos de una empresa con el objetivo de mantenerlos en óptimas condiciones de funcionamiento basando en un análisis para determinar los riesgos y la criticidad de las fallas garantizando así, que se realizarán acciones y tareas de mantenimiento priorizando los diferentes tipos de fallas desde las más críticas hasta las de criticidad que se puede considerar despreciable o más bien de riesgo asumible. Este método ha sido ampliamente adoptado en todos los diferentes países desarrollados del mundo como Estados Unidos, que es uno de los pioneros en la implementación de este tipo de metodología, países europeos como Suecia, entre otros. A pesar de que esta metodología ha sido mayormente adoptada en países desarrollados, también en El Salvador está empezando a ganar terreno, por así decirlo, especialmente en sectores clave que pueden ser el sector energético, el sector textil o el sector azucarero. Existen diferentes tipos de empresas locales que operan bajo estándares muy altos de producción por lo que están tomando conciencia de los beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad y otras metodologías, implementando estrategias orientadas a la mejora continua y a la optimización del mantenimiento de sus activos, lo cual es mayormente adoptado por empresas que son multinacionales o que expanden su mercado hacia el exterior del país.

Se ha podido observar en ejemplos de países desarrollados que la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad genera muchas ventajas y sobre todo beneficios en las compañías que han adoptado su implementación, pero a pesar de todo eso y de todos los ejemplos que hay a nivel Mundial, en El Salvador aún se enfrentan enormes desafíos para implementar este tipo de metodología. Algunos de estos desafíos que se deben superar para lograr la implementación de RCM en diferentes empresas son la conciencia y formación que a pesar de que algunas empresas ya han empezado a implementarlo aún hay una falta de conciencia generalizada en el país sobre los beneficios y la importancia de esta metodología ya que hay brechas muy grandes en el campo de la educación por las grandes deficiencias en cuanto a la capacitación técnica en los programas educativos, a las limitaciones tecnológicas que existen en el interior del país ya que el uso de tecnologías avanzadas como sensores inteligentes, monitoreo remoto, internet de las cosas y big data, aún están en fases iniciales en muchas empresas y hay centros de estudio en los que incluso hoy en día no se conocen estos conceptos importantes del avance tecnológico, por lo tanto, la falta de infraestructura tecnológica en algunas industrias y la educación puede retrasar la implementación total del mantenimiento predictivo y de los diferentes métodos de mantenimiento que existen en la actualidad.

En el tema cultural de la población también existe una gran resistencia al cambio, especialmente en el personal de mayor edad que labora en las empresas ya que muchas veces aún se prefieren métodos tradicionales de mantenimiento como el reactivo el preventivo. Otro punto clave en los desafíos que se enfrenta el país son los costos iniciales para la implementación de esta metodología ya que la inversión inicial para implementar RCM es sumamente alta, en capacitación del personal, en la adquisición de tecnologías de monitoreo, software especializado, que es un desafío muy grande para algunas empresas, especialmente para pequeñas y medianas empresas en las que los márgenes de ganancia son pequeños y les resulta prácticamente imposible implementar todas las tecnologías necesarias para adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad.

A pesar de todo esto en El Salvador ya existen empresas que están iniciando con la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad, consolidándose principalmente en sectores que requieren altos niveles de disponibilidad de equipos y una gestión eficiente de los recursos.

Las principales empresas que tienen una implementación de RCM son los ingenios como, por ejemplo, el ingenio La Cabaña es una de las compañías que han adoptado la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad para optimizar sus operaciones, mejorar la disponibilidad de sus plantas y reducir los costos de mantenimiento. Después de estas empresas no se tiene mucha información respecto a la implementación de RCM en el país, y solamente existen algunos trabajos como tesis en los cuales se hace referencia a la aplicación de esta metodología como por ejemplo tesis que mencionan que se ha implementado en la industria geotérmica (Figueroa, 2020), otra que menciona que se ha implementado en una cadena de restaurantes de comida rápida (Cubas, 2023), pero son más que todo trabajos didácticos.

El marco legal salvadoreño aún está en proceso de adaptación de nuevos estándares internacionales de diferentes temas, entre los cuales se encuentra el tema de mantenimiento. A pesar de esta adaptación el país solamente cuenta con normativa sobre la gestión de riesgo industrial y seguridad laboral, pero está más enfocado a seguridad, pero una implementación formal del RCM en las normativas del país aún no existe, por lo que no existe normativa que recomiende a las empresas la aplicación de este tipo de metodología, y no se ve un panorama favorable de que exista una normativa en un futuro cercano.

2.5. CONCLUSIONES PARCIALES

En el presente capítulo que se finaliza, se ha abordado el tema del mantenimiento en general, en el cual se ha realizado una pequeña reseña de las diferentes definiciones de mantenimiento dependiendo un poco del punto de vista desde donde se aborde, poco a poco se ha ido avanzando en la teoría de la aplicación del mantenimiento desde lo más básico del mantenimiento correctivo que está orientado directamente a la falla, es decir que se interviene un equipo en el que ya ha ocurrido la falla y todos reaccionan ante la parada de la planta, hasta modelos de mantenimiento más especializados como el mantenimiento centrado en confiabilidad o mantenimiento basado en el riesgo o mantenimiento basado en condición, que son modelos de mantenimiento más completos que van más allá de solamente resolver una falla, sino que utilizan modelos matemáticos para determinar las causas que provocan las fallas, determinar la criticidad de cada una y la consecuencia que esta tendrá, y con base a eso prevenir que sucedan paros de

producción, agregando valor a la compañía y sobre todo garantizando la eficiencia operativa. Durante la investigación se puede observar que el mantenimiento industrial se ha actualizado significativamente en la forma en que se gestionan los activos, utilizando metodologías de mantenimiento básicas como el mantenimiento preventivo, complementado con enfoques más avanzados como el RCM.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología que, desde sus orígenes hasta la actualidad, se ha enfocado en mejorar la confiabilidad operativa de los sistemas. Su objetivo principal es garantizar el funcionamiento óptimo de los activos mediante un análisis detallado, clasificándolos según las distintas zonas o etapas del proceso productivo. Además, esta filosofía no solo incrementa la disponibilidad de los equipos, sino que también contribuye a la optimización de los costos de mantenimiento. Este enfoque ha sido adoptado de manera exitosa en diversas industrias, principalmente en países desarrollados como Estados Unidos y Suecia, donde el RCM ha permitido una gestión más eficiente de los recursos, una reducción significativa de los tiempos de inactividad y una mayor prolongación de la vida útil de los equipos. En sectores como la aeronáutica, la energía, y la manufactura, el RCM ha sido fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad de los equipos.

Una de las conclusiones de la investigación es que el RCM no solamente es aplicable a los activos de la industria de la aeronáutica, sino que también es adaptable a diferentes sectores de la industria tales como el sector de la energía o también sectores de manufactura como por ejemplo los ingenios. En El Salvador el mantenimiento centrado en confiabilidad aún se encuentra en etapas iniciales, ya que existen muchos desafíos que las industrias deben solventar antes de pensar en la aplicación de este tipo de metodologías, pero aun así ya existen empresas que están iniciando con la metodología de RCM como por ejemplo los ingenios, que debido a la naturaleza de sus procesos, deben garantizar un correcto funcionamiento de todos los dispositivos que se ven involucrados en producción, y además en procesos auxiliares como la generación de energía eléctrica. Algunos de los principales desafíos que se enfrentan para la implementación del RCM en El Salvador es la falta de alguna norma que oriente y que fomente la aplicación de estas metodologías, ya que en el

país se abordan ya temas de seguridad industrial pero adicional no existe nada más, a menos que cada empresa decida iniciar con la aplicación.

Las proyecciones a futuro sobre el RCM se espera que sean muy buenas, especialmente con el avance de la Industria 4.0 y las tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y el big data, que permitirán hacer un mantenimiento cada vez más detallado. Estas tecnologías no solo mejorarán los diagnósticos y las tareas de mantenimiento, sino que también optimizarán los procesos industriales por lo que se espera que en los próximos años el RCM sea más accesible y eficiente.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS EN UNA EMPRESA DE PINTURAS EN EL SALVADOR

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) aplicando índices de eficiencia energética no corresponde a un sistema autónomo separado de las actividades de mantenimiento normal, sino que es un complemento a las actividades anteriores que enriquece las estrategias existentes. Este enfoque permite a los equipos ejecutar sus funciones de manera eficiente desde el punto de vista energético, además de los requisitos operativos que ya tienen. El método utilizado para este proceso se presenta en distintas etapas que permitirán implementar la metodología incorporando la eficiencia energética como un parámetro fundamental en la toma de decisiones.

3.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

En la mayoría de las industrias de manufactura de El Salvador, las estrategias de mantenimiento utilizadas se concentran principalmente en asegurar la operación continua de los equipos, muchas veces sin considerar actividades de mantenimiento y mucho menos considerar de manera explícita el desempeño energético asociado al uso de los equipos. Esto representa una gran oportunidad de mejora en todos los sectores de la industria salvadoreña pero especialmente en las que el consumo energético es un costo considerable.

La implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad con criterios de eficiencia energética, tal como se está proponiendo, permitirá mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, además permitirá optimizar el uso de la energía eléctrica en los procesos clave para el departamento de producción.

El enfoque de mantenimiento centrado en confiabilidad está dirigido a una planta de fabricación de pinturas ubicada en El Salvador, la cual pertenece a una empresa multinacional con presencia en varios países. Aunque la planta en El Salvador cuenta con una estructura de mantenimiento preventiva y correctiva muy bien estructurada, existe una oportunidad de mejora en cuanto al tema de eficiencia energética, ya que actualmente no se contemplan indicadores energéticos en la planificación de mantenimiento.

Para el análisis de factibilidad de implementación, no se debe considerar solamente la infraestructura técnica existente, sino también los aspectos organizacionales como la cultura corporativa, el compromiso de la alta dirección y la coordinación entre los departamentos involucrados. Adoptar un enfoque de mantenimiento centrado en confiabilidad requiere colaboración de áreas como mantenimiento, producción, calidad, teniendo siempre una fuerte alineación con los objetivos estratégicos de la empresa.

Debido a que realizar una implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad con un enfoque especial hacia la eficiencia energética requiere un análisis más detallado, la presente investigación se concentra en aquellos equipos o subsistemas que representen un uso significativo de la energía eléctrica y que al mismo tiempo tengan un impacto relevante en la operación y la calidad del producto final. Para ello se aplicarán diferentes herramientas, como por ejemplo el análisis de Pareto, mediciones energéticas reales, criterios de severidad y frecuencia de fallo, para definir cuáles son los equipos críticos. El resultado de esto será la priorización de activos en donde las acciones que se proponen para mantenimiento generen mayor retorno en términos de eficiencia energética y, sobre todo, confiabilidad operativa.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE LA FÁBRICA

La fábrica en la que se realizará el estudio es una empresa multinacional del sector industrial dedicada a la fabricación y comercialización de pinturas, con presencia consolidada en Centroamérica desde finales de la década de 1950. Su sede regional se estableció inicialmente en El Salvador, desde donde ha coordinado la expansión hacia otros países como Guatemala, Costa Rica, Panamá, Nicaragua y Honduras. La planta principal de producción está ubicada en la zona oriental del país, y cuenta con procesos altamente tecnificados para la elaboración de pinturas, solventes y otros productos químicos relacionados. En cuanto a la gestión del mantenimiento, la empresa opera bajo un enfoque preventivo y correctivo combinado, apoyado por sistemas computarizados de gestión de mantenimiento que permiten la planificación, control y mejora continua de la maquinaria e infraestructura. Además, mantiene una cultura organizacional centrada en la seguridad industrial, el cumplimiento normativo y la mejora continua, factores clave para garantizar la disponibilidad y confiabilidad de sus equipos, así como la calidad del producto final.

Esta estructura de mantenimiento se encuentra alineada con los objetivos de productividad y sostenibilidad de la organización, permitiendo responder de forma eficiente a las exigencias del mercado y a la evolución tecnológica del sector. A pesar de tener una estructura de mantenimiento bien organizada, esta simplemente se basa en los dos tipos de mantenimiento básicos, que son las actividades preventivas y correctivas, lo cual claramente es una oportunidad de mejora para mantenerse en la competencia.

3.2.1. Organización espacial de la planta



Figura 12: Plano de la fábrica (Plano con nombres modificados de uno genérico de internet)

La planta de fabricación de pinturas se encuentra organizada por diferentes áreas, cada una de las cuales se encuentra equipada con distintos sistemas y dispositivos que intervienen en los procesos correspondientes. Por motivos de confidencialidad no se puede colocar un plano real de las instalaciones; no obstante, se coloca la Figura 12 a manera de ilustración modificado a partir

de un diseño genérico que se encuentra en fuentes públicas de internet, el cual representa un plano de una fábrica general de manufactura.

El proceso productivo inicia desde la recepción de las diferentes materias primas e insumos necesarios para la producción, para esto se encuentra una unidad encargada del pesaje de todos los camiones de transporte que ingresan en las instalaciones para registrar con precisión el peso neto de los materiales que son ingresados a la bodega. El área de almacenamiento está dividida en dos secciones:

- Bodega uno que está destinada al almacenamiento de las materias primas e insumos en general, incluidos envases. En cuanto a equipos solamente se utilizan montacargas para el movimiento y descarga de materiales.
- Bodega dos, está compuesta por un conjunto de tanques destinados al almacenamiento de las materias primas líquidas. Esta área representa uno de los sistemas más complejos de la fábrica debido a la gran cantidad de instrumentos que están integrados a este sistema, debido al monitoreo continuo por medio de varios tipos de transmisores, y al movimiento de materia prima por medio de elementos mecánicos como bombas y válvulas, todo desde un sistema automatizado que se encarga de controlar.

Las materias primas almacenadas son posteriormente procesadas en las plantas de producción, donde se lleva a cabo su transformación en productos terminados. Estas plantas se encuentran organizadas según el tipo de formulación del producto:

- Planta 1, dedicada a los productos base agua.
- Planta 2, dedicada a los productos base solvente.

Cada planta cuenta con diferentes equipos, adaptados a las características de los productos manejados. Por ejemplo, la infraestructura de la Planta 2 incluye medidas especiales de seguridad, como luminarias antiexplosivas, debido a la presencia de vapores inflamables similares a los que se encuentran en estaciones de servicio.

Dentro de estas plantas de proceso se encuentran los diferentes subprocesos como por ejemplo desembalaje, etiquetado, fabricación, embalaje de producto terminado y despacho.

Finalmente, la bodega de almacenamiento de producto terminado, que es el lugar desde donde se distribuye toda la pintura hacia cada uno de los destinos a los que se deba enviar, que al igual que la otra bodega no cuenta con mayor número de equipos que los montacargas.

3.3. SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS

Con base en la caracterización general de la planta, se identifican los subsistemas cuya operación tiene mayor impacto tanto en la confiabilidad del proceso productivo como en el consumo energético global de la fábrica. Esta selección se realiza considerando criterios técnicos, operativos y energéticos, como:

- La función que cumple cada subsistema en el proceso de fabricación de pinturas.
- El nivel de automatización y tecnología asociada.
- El impacto energético medido en kWh.
- La criticidad frente a paros no programados.
- Potencial de mejora mediante mantenimiento.

A partir de este análisis, se definen cinco subsistemas clave para el estudio, sobre los cuales se aplicará la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) con enfoque energético.

- Subsistema de tanques de almacenamiento de líquidos (Bodega 2): Éste, involucra el manejo de las materias primas de forma automatizada, utilizando diferentes elementos para realizar el almacenamiento de los líquidos, válvulas con apertura automática y diferentes tipos de sensores en el proceso. Su operación es continua para garantizar la disponibilidad de la materia prima en cualquier momento que sea requerida.
- Subsistema de agitación y mezcla (Plantas 1 y 2): Este subsistema pertenece directamente a la planta de fabricación, ya que en este se encuentran todos los equipos mezcladores de alta potencia, cada uno de estos equipos están adaptados según el tipo de

producto. La confiabilidad de estos equipos es esencial para garantizar que todo el producto terminado sea de calidad, ya que estos equipos operan de forma intensiva durante tiempos muy prolongados.

- Subsistema de bombeo y transferencia: Éste, involucra a todos los equipos presentes en la etapa de movimiento de fluidos, desde el almacenamiento de los productos hasta la llegada hacia los puntos de producción, utilizando equipos de bombeo, medidores de caudal, etc.

- Subsistema de control y automatización: Los equipos que conforman este subsistema, permiten el monitoreo, control y operación segura de todos los equipos de la planta, siendo éste vital para la estabilidad y funcionamiento del proceso.

- Subsistema de enfriamiento industrial: Este subsistema es uno de los equipos auxiliares de la planta, ya que asegura las condiciones adecuadas para la fabricación de todos los productos que se realizan en el día a día del proceso productivo.

Cabe destacar que el análisis más a detalle de la identificación de los usos significativos de la energía eléctrica se desarrollar más adelante. En esta sección únicamente se establecen subsistemas base sobre los cuales se aplicará la metodología.

3.4. DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE SUBSISTEMAS

La metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) parte de una comprensión detallada de las funciones operativas de cada equipo o subsistema. Esto es esencial para identificar sus posibles fallas funcionales, sus modos de falla y las consecuencias asociadas.

A continuación, se describen las funciones principales y secundarias de los subsistemas seleccionados, en función de los requisitos operativos que deben cumplir para asegurar su desempeño confiable y eficiente. Las funciones que realizan los subsistemas seleccionados son las siguientes:

- Subsistema de tanques de almacenamiento de líquidos (Bodega 2):
 - Función principal: Almacenar las materias primas líquidas que ingresan a la fábrica, mantenerlas disponibles en condiciones seguras.
 - Función secundaria: Medir y controlar los niveles de producto, asegurar la integridad de las conexiones mecánicas, prevenir derrames, medir condiciones de seguridad y garantizar correctos traslados de materia prima.

- Subsistema de agitación y mezcla (Plantas 1 y 2):
 - Función principal: Mezclar las materias primas según las fórmulas que están establecidas por el área de químicos formuladores.
 - Función secundaria: Operar con parámetros de velocidad establecidos por los químicos, mantener la consistencia del producto, minimizar el consumo de energía y prevenir el sobrecalentamiento de los motores.

- Subsistema de bombeo y transferencia:
 - Función principal: Trasladar los fluidos desde los tanques de almacenamiento, hasta cada uno de los puntos de fabricación en donde sea necesario.
 - Función secundaria: Controlar los flujos con que se traslada la materia prima, evitar golpes de ariete, detectar fugas, operar sin interrupciones.

- Subsistema de control y automatización:
 - Función principal: Es el sistema más complejo que está instalado en la planta de producción, ya que es básicamente un SCADA, supervisa, controla y registra todos los parámetros de operación.
 - Función secundaria: Generar toda una batería de alertas, ejecutar acciones automáticas de seguridad y permitir la interacción del personal con los procesos de forma segura.

- Subsistema de enfriamiento industrial:
 - Función principal: Proporcionar agua fría a los diferentes equipos que necesitan controlar la temperatura en algunos procesos específicos durante la fabricación.

- Función secundaria: Mantener una temperatura de operación constante en algunos procesos de la línea productiva, trabajar con eficiencia energética y garantizar un flujo y una presión adecuada al circuito de agua fría.

3.5. SELECCIÓN DE INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El análisis del desempeño energético es uno de los factores que son clave si se desea aplicar el mantenimiento centrado en confiabilidad, especialmente en industrias con procesos en los que se ven involucrados equipos eléctricos que se utilizan de una manera intensiva. Para una planta de fabricación de pinturas como la que se encuentra en El Salvador, la operación eficiente de todos sus subsistemas como mezcladores, molinos, etc. Tiene un impacto directo en los costos operativos, la sostenibilidad ambiental y la estabilidad del proceso productivo.

La planta de fabricación de pinturas ubicada en la zona oriental de El Salvador se encuentra en un entorno industrial típico de la región en el que los recursos energéticos se ven hasta cierto punto limitados y una estructura de mantenimiento en la que generalmente las empresas no integran criterios energéticos dentro de la planificación, sino que simplemente; en el mejor de los casos; se hace mantenimiento preventivo. La mayoría de las empresas pequeñas de la región solamente realizan mantenimiento correctivo, reaccionando a los problemas durante el proceso productivo sin embargo no tratan de prevenirlos. Ésta es la razón por la que es importante la incorporación de indicadores que permitan evaluar y monitorear los equipos que sean definidos como críticos y así vincular estos datos con las decisiones que se toman. Se han seleccionado 2 indicadores clave, el primero es el indicador base 100 y el segundo es el indicador CUSUM, esto debido a que son indicadores bastante aplicables a entornos industriales gracias a su capacidad de detectar desviaciones, en el consumo de energía eléctrica, por ejemplo.

3.5.1. Indicador Base 100

El indicador base 100 es una de las herramientas más simples de implementar y de calcular, pero también es una de las herramientas más robustas en el sentido de dar mucha información importante, ya que, por ejemplo, permite la visualización de cuál es el comportamiento que tiene el consumo energético en una compañía respecto a un periodo que se toma como referencia, lo

cual ayuda en gran manera a ir realizando mediciones comparativas para ver si está mejorando o empeorando el proceso. En la planta de pinturas de El Salvador este indicador será muy importante porque durante su proceso permitirá normalizar los datos del consumo de energía eléctrica y así compararlos objetivamente a lo largo del tiempo, pues, en la fabricación de pinturas influyen muchos factores que harán que el consumo sea variable en el tiempo, por ejemplo, dependerá de la cantidad de producto que se fabrique, también de la línea en que se esté trabajando, de la viscosidad, etc. La fórmula de cálculo de este indicador es la siguiente:

$$\text{Indicador Base 100} = \left(\frac{\text{Consumo actual}}{\text{Consumo del período base}} \right) \times 100$$

Para realizar el estudio se seleccionará un período base en el que se haya tenido una operación estable, o para hacerlo más apegado a la realidad se hará en un período probablemente de un año típico de producción, en el cual se tratará de tener acceso a la base de datos de la empresa y que proporcionen el consumo energético típico de un año, posterior a eso se calculará el índice mensual base 100 para algunos equipos más específicos, implementando medición de consumo energético localizado en algunos equipos.

Conociendo el consumo base que debería de tener la planta, resultará hasta cierto punto sencillo identificar las tendencias de aumento progresivo en el consumo de energía eléctrica, lo que ayudará a anticiparse a que aparezca una falla mayor, ya sea por deterioro mecánico o eléctrico del equipo.

3.5.2. Indicador de sumas acumuladas CUSUM

El indicador de sumas acumuladas CUSUM es la suma acumulada de desviaciones de consumo real y teórico. El consumo real y el consumo teórico determinan si no se consume energía o se consume en exceso durante el periodo de tiempo analizado. La fórmula para calcular este indicador se muestra en la ecuación.

$$\text{CUSUM} = \sum_{i=1}^n (CE_{\text{real}_i} - CE_{\text{teorico}_i})$$

Donde: CUSUM: Suma acumulada de desviaciones de consumo real y teórico.

CE_{real_i} : Representa el consumo real de energía.

$CE_{teorico_i}$: Representa el consumo teórico de energía.

3.6.IDENTIFICACIÓN DE USOS SIGNIFICATIVOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La identificación de los usos significativos de la energía eléctrica es de gran importancia para la integración, ya que, con base a la identificación se realizará la aplicación del plan de mantenimiento que se quiera proponer, permitiendo focalizar esfuerzos en aquellos equipos con mayor impacto en el consumo total de energía eléctrica.

3.6.1. Definición de USE según ISO 50001

Primeramente, se define qué es un uso significativo de la energía, según la literatura los USE son “Usos de la energía que representan un consumo de energía sustancial y/o que ofrecen un potencial considerable para la mejora del desempeño energético (3.5.6 ISO 50001:2018).” (Atia Consultores Ltda, 2022). El objetivo principal de este apartado es determinar cuáles son los procesos, sistemas o equipos en los cuales se concentra el mayor consumo de energía dentro de la planta de producción de pinturas, lo cual también ayudará a identificar el impacto que dichos equipos están teniendo sobre la productividad de la planta.

A partir de la presente implementación, se identifica una tarea pendiente que deberá abordarse en el mediano plazo. Una vez determinados los usos significativos de la energía eléctrica, será indispensable establecer un sistema de gestión energética que permita monitorear, controlar y optimizar dichos consumos. Esto garantizará que la información obtenida tenga una aplicación práctica y contribuya efectivamente a la mejora del desempeño energético y por ende contribuya a la optimización del proceso de mantenimiento de la empresa.

“Un SGEEn puede definirse como una metodología para lograr una cultura de la mejora sostenida y continua del desempeño energético en las organizaciones de forma costo-efectiva. La mejora requiere de la interacción y contribución de cada uno de los requisitos expresados dentro

del estándar internacional ISO 50001:2018” (Lázaro Flores Díaz, Israel Jáuregui Nares (CONUEE), 2020). Generalmente, según la norma ISO un sistema de gestión energética está basado en uno de los esquemas más famosos que es el ciclo PHVA (Planificar – Hacer – Verificar – Actuar).

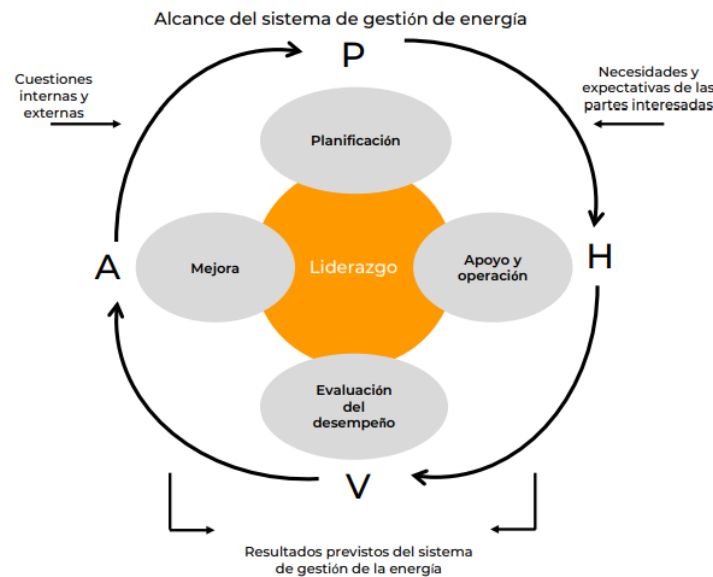


Figura 13: Ciclo de mejora continua (Lázaro Flores Díaz, Israel Jáuregui Nares (CONUEE), 2020)

3.6.2. Metodología aplicada para la identificación de los usos significativos de la energía

En la realización de este estudio, primero se hará una clasificación de los equipos de la planta de producción con base a una clasificación e identificación de los usos significativos de la energía eléctrica. Para esta clasificación se toma como base que la norma ISO 50001 permite que cada una de las empresas sea quien determine el criterio por medio del cual se van a determinar los USE (Uso significativo de energía) (Atia Consultores Ltda, 2022), ya sea por el consumo energético o por costo monetario. En este caso, se realizará por medio del nivel de consumo energético de cada uno de los equipos. La clasificación inicial que se realice no necesariamente será la definitiva ya que se debe monitorear de forma constante el consumo energético, y a medida

avanza el tiempo también avanzará la madurez del sistema de gestión de la energía lo que ayudará a trabajar de manera más eficiente.

- Inventario energético de los equipos: Como primera fase, se realiza un inventario de los equipos que operan en la planta desde el punto de vista energético en el cual se toman datos de interés de cada uno, luego se contrasta la información con la lectura de diferentes dispositivos de medición instalados en puntos clave de la fábrica con los cuales se puede hacer una aproximación bastante confiable del consumo de energía eléctrica de cada uno de los equipos del proceso productivo, así como también de los equipos de los sistemas auxiliares a la planta de producción.

- Lecturas reales de consumo: Se utiliza mediciones mensuales, tomando una muestra desde enero hasta abril de 2025 para obtener un perfil real del consumo eléctrico de cada sistema. Adicional en paralelo, se hace una comparación de los datos del medidor principal, realizando cálculos de la energía consumida que se ve reflejada en la factura de consumo de energía eléctrica.

- Proyección anual de consumo: Para completar el análisis, se realizó una proyección del consumo energético anual, aplicando una estimación basada en los valores registrados en los primeros meses del año, incorporando una leve fluctuación mensual.

- Aplicación del principio de Pareto: Uno de los criterios más utilizados en la industria para determinar los usos significativos de la energía es el principio de Pareto, el cual menciona en su definición que un 20% de la población tiene el 80% de algo, y el 80% de la población tiene el 20% restante de algo, lo cual supone que de todos los usos de la energía que hay en la planta solamente un 80% son significativos. Existen diferentes criterios que también se pueden utilizar (Atia Consultores Ltda, 2022):

- 80% de consumo de los principales procesos consumidores de energía eléctrica.
- Nivel de consumo por sobre un límite determinado por la compañía.
- Observar una tendencia creciente en el consumo de energía eléctrica.

- Se han detectado medidas de eficiencia energética que puede disminuir el consumo de energía.

3.6.3. Resultados del análisis energético

Primeramente, se realiza la segmentación de los equipos que se tomarán en cuenta para el análisis energético y se realizan las mediciones desde el mes de enero, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2: Consumo energético en kWh de los equipos – Enero a abril de 2025

Equipos	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Fabricación	145099.35	144185.61	138863.21	141791.88
Agua de enfriamiento	37317.39	37457.2	36714.84	37974.57
Tanques de materia prima	31723.76	32229.45	31355.44	31650.7
Aire comprimido	22795.34	23436.9	22696.96	22966.79
Cargadores de baterías	12822.92	12796.97	12499.66	12838.87
Colectores de polvo	8669.3	8711.67	8491.58	8546.38
Cargas Varias	7654.5	7753.49	7500.46	7622.97
Embalaje y desembalaje	7397.62	7452.23	7163.34	7330.68
Tomas	7318.17	7360.42	7156.45	7151.84
Iluminación	5023.06	4959.61	4924.68	5002.48
Otras áreas	3536.69	3540.72	3472.88	3470.37
Etiquetado	2884.53	2876.04	2812.99	2881.18
Cafetería	2421.31	2359.85	2395.73	2362.95
Envasado	2195.66	2133.42	2165.9	2180.91
Despacho	1845.55	1830.14	1785.56	1815.76

Luego que se han realizado las mediciones respectivas de los equipos que se ven involucrados en el proceso de producción desde inicio a fin Tabla 2, se realiza una proyección de consumo para los meses restantes de este año 2025, con el objetivo de obtener una proyección de consumo anual de la planta de producción, y con base a esa información obtener cuales son los usos significativos de la energía, utilizando la metodología de Pareto o sistema de 80/20 el cual servirá para definir cuáles son los equipos que consumen un total del 80% de la energía que se recibe por parte de las distribuidoras de energía eléctrica.

Los datos obtenidos son los siguientes Tabla 3:

Tabla 3: Consumo anual de energía eléctrica - Proyectado en MWh

Equipos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Fabricación	145.10	144.19	138.86	141.79	144.98	147.23	145.85	144.29	144.90	147.80	144.30	144.32
Agua de enfriamiento	37.32	37.46	36.71	37.97	37.38	37.13	37.57	37.41	37.83	37.77	37.19	37.62
Tanques de materia prima	31.72	32.23	31.36	31.65	32.29	31.93	32.12	32.35	31.94	32.33	31.91	32.28
Aire comprimido	22.80	23.44	22.70	22.97	23.29	23.27	23.32	23.39	22.96	23.04	23.24	23.44
Cargadores de baterías	12.82	12.80	12.50	12.84	12.86	12.60	12.67	12.69	12.85	12.88	12.65	12.81
Colectores de polvo	8.67	8.71	8.49	8.55	8.71	8.67	8.73	8.73	8.66	8.75	8.62	8.82
Cargas Varias	7.65	7.75	7.50	7.62	7.76	7.61	7.57	7.71	7.66	7.69	7.68	7.59
Embalaje y desembalaje	7.40	7.45	7.16	7.33	7.46	7.35	7.38	7.42	7.35	7.37	7.37	7.53
Tomas	7.32	7.36	7.16	7.15	7.33	7.16	7.33	7.35	7.26	7.20	7.25	7.36
Iluminación	5.02	4.96	4.92	5.00	4.97	4.93	4.93	4.97	5.01	4.94	4.94	5.09
Otras áreas	3.54	3.54	3.47	3.47	3.53	3.51	3.49	3.51	3.50	3.53	3.48	3.51
Etiquetado	2.88	2.88	2.81	2.88	2.88	2.87	2.84	2.82	2.86	2.85	2.88	2.90
Cafetería	2.42	2.36	2.40	2.36	2.38	2.39	2.40	2.41	2.41	2.39	2.40	2.42
Envasado	2.20	2.13	2.17	2.18	2.16	2.16	2.15	2.18	2.17	2.20	2.17	2.21
Despacho	1.85	1.83	1.79	1.82	1.82	1.83	1.80	1.80	1.81	1.84	1.82	1.84

Tabla 4: Consumo anual en MWh, consumo porcentual y consumo acumulado.

Equipos	Consumo de energía	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Fabricación	1733.62	48.39%	48.39%
Agua de enfriamiento	449.36	12.54%	60.94%
Tanques de materia prima	384.10	10.72%	71.66%
Aire comprimido	277.84	7.76%	79.42%
Cargadores de baterías	152.96	4.27%	83.68%
Colectores de polvo	104.10	2.91%	86.59%
Cargas Varias	91.81	2.56%	89.15%
Embalaje y desembalaje	88.57	2.47%	91.63%
Tomas	87.23	2.43%	94.06%
Iluminación	59.69	1.67%	95.73%
Otras áreas	42.08	1.17%	96.90%
Etiquetado	34.35	0.96%	97.86%
Cafetería	28.74	0.80%	98.66%
Envasado	26.06	0.73%	99.39%
Despacho	21.83	0.61%	100.00%

Con base a la Tabla 4 se construye el diagrama de Pareto con el cual quedarán definidos los usos significativos de la energía:

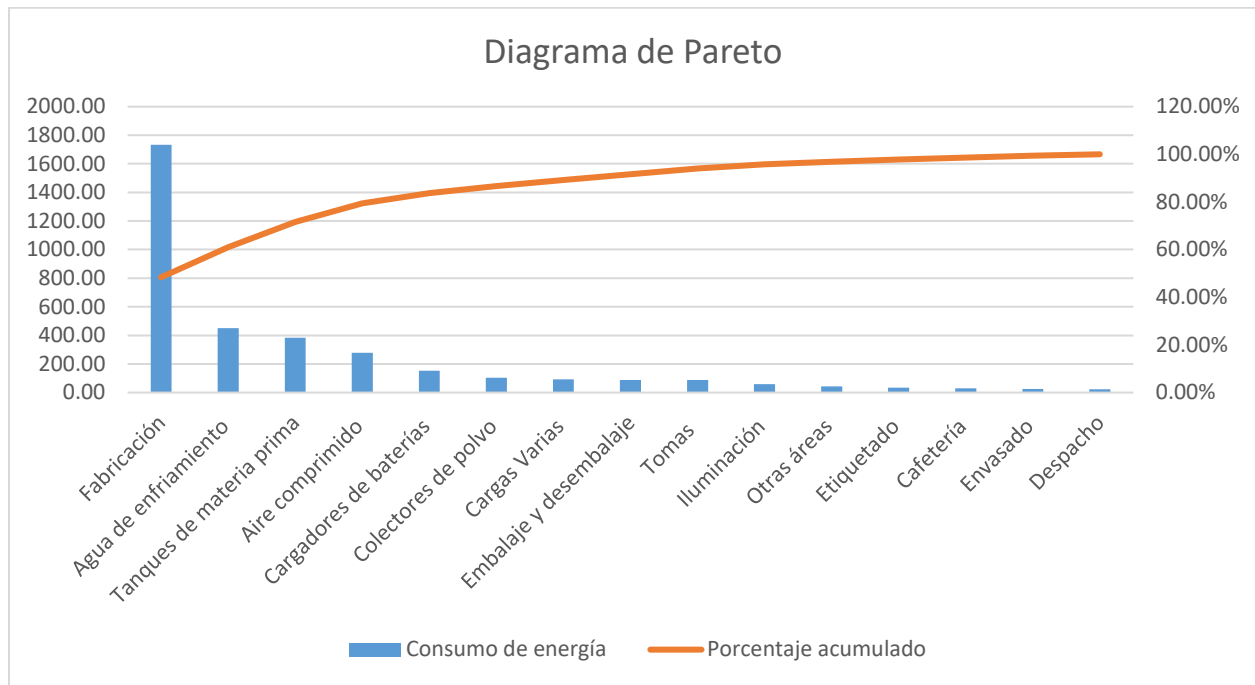


Gráfico 1: Diagrama de Pareto de consumo energético anual

Ya que se ha obtenido el diagrama de Pareto que se observa en el Gráfico 1 se determinan los usos significativos de la energía eléctrica para esta planta de producción en particular, los cuales son:

- Fabricación
- Agua de enfriamiento
- Tanques de materia prima
- Aire comprimido
- Cargadores de baterías

3.6.4. Sistema integrado de gestión energética (SGEn)

Una vez que se han determinado los usos significativos de la energía. La planta deberá avanzar hacia el diseño de un sistema de gestión de la energía conforme a los lineamientos de la norma ISO 50001:2018. Este sistema le permitirá a la planta de fabricación de pinturas:

- Monitorear y controlar el consumo de energético.
- Establecer objetivos de mejora.
- Estandarizar procedimientos eficientes.
- Asegurar una cultura de mejora continua energética.

Todo esto, deberá considerarlo la empresa y comenzar con la aplicación de la norma ISO en un futuro.

3.7. ANÁLISIS DE CRITICIDAD ENERGÉTICO DE EQUIPOS

Una vez que se han identificado los usos significativos de la energía, el siguiente paso en la implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad con enfoque de eficiencia energética, es determinar cuáles son los equipos más críticos, lo cual permitirá priorizar las acciones de mantenimiento, optimización y monitoreo continuo en función del impacto que cada equipo tiene en la operación de la planta en general.

El objetivo principal de esta etapa es realizar una clasificación de los equipos según su impacto en el desempeño energético de la planta, el grado de afectación a la producción en caso de falla, relevancia en términos de confiabilidad operativa, posibilidad de generar ahorros mediante mejoras o ajustes que se puedan realizar.

3.7.1. Metodología para el análisis de criticidad

“Las técnicas de análisis de criticidad son metodologías que permiten jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos). Un método de criticidad cualitativo muy utilizado dentro de las aplicaciones de RCM, es el proceso de jerarquización de sistemas basado en matrices de criticidad, que consideran dentro de su proceso de análisis la evaluación del

factor “Riesgo” (Parra, 1996). Este método integra el análisis de la probabilidad (frecuencia) de que se produzca un fallo y las consecuencias (nivel de severidad) que pueden traer consigo los fallos de los sistemas a evaluar. La definición de criticidad puede tener varias interpretaciones dependiendo del objetivo que se pretenda y de las necesidades de la organización, por lo que existe una gran diversidad de herramientas de criticidad.” (Carlos Parra Márquez, 2015)

Luego que se han obtenido los resultados del análisis de consumo energético que se ha realizado (Definición de los USE) y la caracterización funcional de los equipos, se propone una matriz de criticidad que permita priorizar los equipos clave para la implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en eficiencia energética. Para la construcción de la matriz de criticidad se considera dos variables clave, la frecuencia de falla (F) y la consecuencia de la falla (C).

- Frecuencia de falla: Número de fallas en un año (Ponderado del 1 al 5).
- Consecuencias: Será la combinación de los siguientes factores (Ponderado del 1 al 5):
 - 25% - Nivel de consumo energético (Ponderado del 1 al 5).
 - 25% - Impacto en la salud (Ponderado del 1 al 5).
 - 25% - Impacto en el medio ambiente (Ponderado del 1 al 5).
 - 25% - Impacto en producción (Ponderado del 1 al 5).

Tabla 5: Ponderación matriz de criticidad

Valor	Frecuencia (F)	Consecuencia (C)			
		Consumo energético	Salud	Medio ambiente	Producción
1	Muy baja – Falla poco frecuente	Muy baja – Sin impacto			
2	Baja – Falla poco probable	Baja – Afecta parcialmente			
3	Moderada – Falla ocasional	Moderada – Impacto medio			
4	Alta – Falla frecuente	Alta – Afecta significativamente			
5	Muy alta – Falla muy frecuente	Crítica – Falla que paraliza producción			

3.7.2. Aplicación de la matriz a equipos seleccionados

Los equipos que pertenecen a los cinco usos significativos de energía identificados en la sección anterior fueron analizados individualmente. La evaluación se hizo en conjunto con técnicos de mantenimiento y supervisores de planta, quienes aportaron experiencia práctica y conocimiento del comportamiento real de los equipos.

Tabla 6: Análisis de criticidad

EQUIPO	AREA	FRECUENCIA FALLAS	CONSUMO ENERGÉTICO	MEDIO AMBIENTE	SALUD	PRODUCCIÓN	CONSECUENCIA	TOTAL	JERARQUIZACIÓN
Sistema cargador de baterías	Bodega 1	1	1	4	4	5	4	15	Media criticidad
Chiller de 40 toneladas	Planta 1	1	3	1	1	1	2	7	Baja criticidad
Compresor 40 HP	Planta 1	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Compresor 40 HP	Planta 1	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 1	1	4	1	3	4	3	13	Baja criticidad
Mezclador de 2 HP	Planta 1	1	1	3	3	1	2	9	Baja criticidad
Mezclador de 20 HP	Planta 1	1	1	1	1	1	1	5	Baja criticidad
Mezclador de 40 HP	Planta 1	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Mezclador de 40 HP	Planta 1	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Compresor 40 HP	Planta 2	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Compresor 40 HP	Planta 2	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 2	1	4	1	3	4	3	13	Baja criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 2	1	4	1	3	4	3	13	Baja criticidad
Mezclador de 20 HP	Planta 2	1	1	1	1	1	1	5	Baja criticidad
Mezclador de 40 HP	Planta 2	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Mezclador de 40 HP	Planta 2	1	2	1	1	1	1	6	Baja criticidad
Mezclador de 2 HP	Planta 2	2	1	3	3	1	2	10	Baja criticidad
Chiller de 40 toneladas	Planta 2	2	3	1	1	5	3	12	Baja criticidad
Sistema cargador de baterías	Bodega 2	3	1	4	4	5	4	17	Alta criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 1	3	4	1	3	4	3	15	Media criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 1	3	4	1	3	4	3	15	Media criticidad
Mezclador de 150 HP	Planta 2	3	4	1	3	4	3	15	Media criticidad
Sistema de tanques de materia prima	Bodega 2	5	1	1	1	5	2	13	Muy alta criticidad

La clasificación de la criticidad de los equipos se ha realizado con base a la siguiente matriz
 Figura 14:

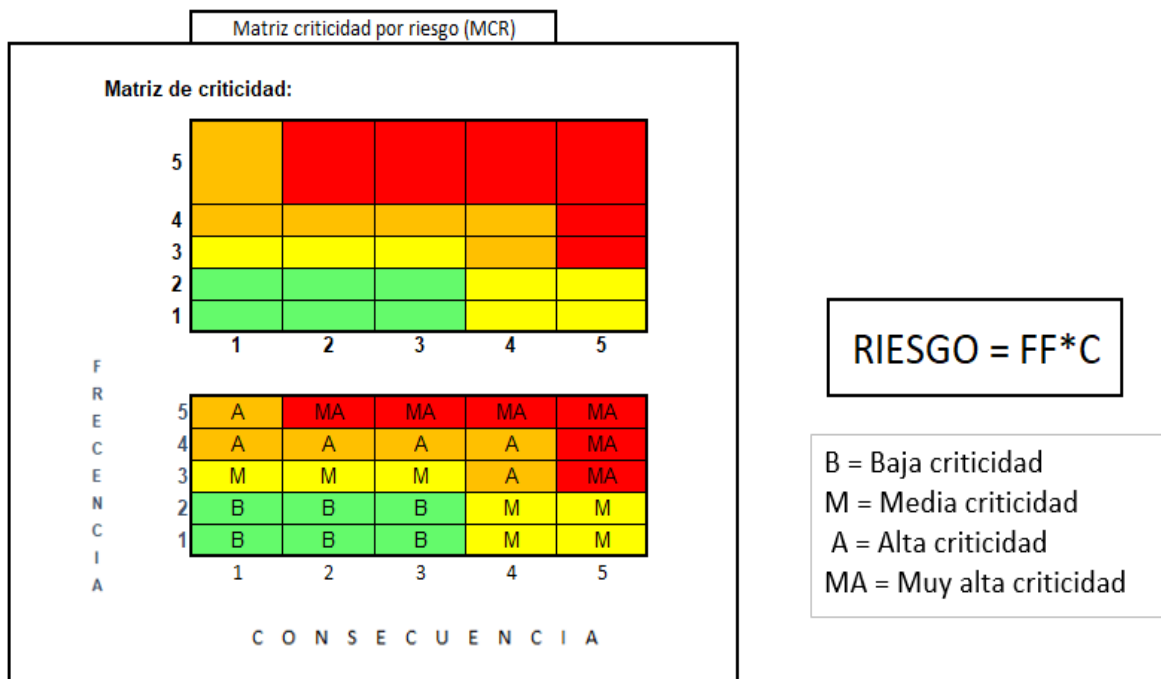


Figura 14: Matriz de criticidad

3.7.3. Resultados de análisis de criticidad

Con base al análisis que se ha realizado, se puede obtener que los equipos más críticos son los siguientes, obteniendo media, alta y muy alta criticidad respectivamente:

- Sistema cargador de baterías de Bodega 1
- Sistema cargador de baterías de Bodega 2
- Sistema de tanques de materia prima de Bodega 2
- Mezclador de 150 HP de Planta 1
- Mezclador de 150 HP de Planta 1
- Mezclador de 150 HP de Planta 2

3.8. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA

“El Análisis de los Modos y Efectos de Fallos (FMEA: Failures Modes and Effects Analysis) es la herramienta principal del RCM para optimizar la gestión de mantenimiento en una organización determinada ya que ayuda a responder las primeras cinco preguntas básicas del RCM (Woodhouse, 1996). El FMEA es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que ocurran y puedan afectar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. A partir del análisis realizado por los grupos de trabajo RCM a los distintos activos en su contexto operacional, se obtiene la información necesaria para prevenir las consecuencias y los efectos de los posibles fallos a partir de la selección adecuada de las actividades de mantenimiento. Estas actividades se eligen de forma que actúen sobre cada modo de fallo y sus posibles consecuencias” (Carlos Parra Márquez, 2015).

Ahora teniendo clara la definición, se realizó el análisis, pero esta vez enfocándolo a modos de falla desde el punto de vista energético.

3.8.1. Selección de equipos críticos

En la matriz desarrollada con anterioridad, se obtuvo un listado de equipos críticos basando el análisis en el consumo energético, así como en las consecuencias y la frecuencia de falla, el listado es:

- Sistema cargador de baterías de Bodega 1
- Sistema cargador de baterías de Bodega 2
- Sistema de tanques de materia prima de Bodega 2
- Mezclador de 150 HP de Planta 1
- Mezclador de 150 HP de Planta 1
- Mezclador de 150 HP de Planta 2

3.8.2. Identificación de modos de falla

Para cada uno de los equipos críticos mostrados en la sección anterior, se realizó una identificación de los diferentes modos de falla más comunes que pueden comprometer el correcto funcionamiento de los equipos, así como también pueden comprometer el comportamiento energético de los equipos. En este punto, el análisis se realiza un poco diferente al enfoque convencional que se le da siempre, pues, se hace mucho énfasis en las fallas que deriven en desviaciones del consumo eléctrico o también llamadas ineficiencias energéticas. Los modos de falla identificados son los siguientes:

Tabla 7: Identificación de modos de fallo

Equipo	Modo de falla energético	Efecto energético
Sistema cargador de baterías de Bodega 1	Carga prolongada por calibración incorrecta	Consumo excesivo de energía por sobrecarga innecesaria
Sistema cargador de baterías de Bodega 2	Pérdida de eficiencia del rectificador	Aumento sostenido del consumo durante la jornada operativa
Sistema de tanques de materia prima	Operación continua de bombas sin demanda real	Consumo innecesario por mal control del sistema
Mezclador de 150 HP de Planta 1	Operación fuera del punto de eficiencia	Consumo elevado por uso ineficiente del motor
Mezclador de 150 HP de Planta 1	Deficiencia en sistema de control de arranque	Picos de consumo y sobrecarga en el motor
Mezclador de 150 HP de Planta 2	Vibraciones por desbalance o desgaste mecánico	Mayor fricción, esfuerzo del motor y aumento del consumo

3.8.3. Matriz de efectos y modos de falla

Tabla 8: Matriz de efectos y modos de falla

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
1	Cargar baterías en tiempo	1	Batería carga de manera prolongada	1	Carga prolongada por calibración incorrecta	4	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Tiempo excesivo de carga, equipos fuera de uso Acción correctiva: Recalibrar controlador de carga	10	\$ 1,000.00	\$ 5,000.00	\$ -	\$ 60,000.00
		1	Batería no carga	2	Pérdida de eficiencia del rectificador	2	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Baja tensión y baterías no retienen carga Acción correctiva: Reemplazo del rectificador	12	\$ 1,000.00	\$ 4,000.00	\$ -	\$ 32,000.00
2	Recircular materia prima	3	Falla en recirculación	3	Operación continua de bombas sin demanda real	8	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Bombas activas sin flujo real Acción correctiva: Ajuste en lógica de control	6	\$ 800.00	\$ 2,000.00	\$ -	\$ 54,400.00
3	Mezclar producto	4	Mezcla ineficiente	4	Operación fuera del punto de eficiencia	3	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Mezcla inconsistente, consumo energético elevado Acción correctiva: Revisión de curva de carga y ajuste del variador	5	\$ 1,200.00	\$ 3,000.00	\$ -	\$ 27,000.00
				5	Deficiencia en sistema de control de arranque	4	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Arranques bruscos, picos de consumo y vibración Acción correctiva: Mantenimiento del arrancador suave	4	\$ 1,200.00	\$ 2,500.00	\$ -	\$ 29,200.00
				6	Vibraciones por desbalance o desgaste mecánico	2	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Ruidos, vibraciones, pérdida de eficiencia Acción correctiva: Balanceo dinámico, inspección mecánica	6	\$ 1,200.00	\$ 3,500.00	\$ -	\$ 21,400.00

3.9. PROPUESTAS DE PLAN DE MANTENIMIENTO

Luego del análisis de las fallas funcionales que generan cada uno de los equipos que se definieron como críticos y que tienen impacto directo con la eficiencia energética de la planta de producción, se puede realizar una propuesta de plan de mantenimiento estructurado, el cual no solamente estará enfocado en la confiabilidad que se espera que tengan los equipos de planta sino que también tendrá un pequeño enfoque en la eficiencia energética del proceso productivo, por lo que se ha realizado una tabla de los tipos de mantenimiento que se proponen para los diferentes modos de falla Tabla 9.

3.9.1. Mantenimiento por cada modo de falla

Tabla 9: Mantenimiento propuesto

Equipo	Modo de falla	Mantenimiento propuesto	Tareas recomendadas
Cargadores de baterías (Bodega 1)	Carga prolongada / No carga	Preventivo / Correctivo	Verificación de calibración, inspección de rectificador, limpieza de terminales y ventilación
Tanques de MP (Bodega 2)	Bombas operando sin demanda	Predictivo	Instalación de control de demanda (sensor de nivel), revisión periódica de lógica de control
Mezcladores 150 HP (Planta 1 y 2)	Arranque fuera de punto / vibraciones / baja eficiencia	Preventivo / Predictivo	Balanceo mecánico, revisión del sistema de arranque, ajuste de parámetros de operación, análisis de vibración
Sistema de control	Fallas por lógica de control	Correctivo / Predictivo	Revisión de lógica de programación, pruebas funcionales periódicas, actualización de firmware

3.9.2. Frecuencias de mantenimiento por cada falla

Con base a la información importante que se obtiene del análisis de la matriz de criticidad, se toma a bien realizar la siguiente propuesta de nuevos procedimientos adicionales a lo que ya se tiene Tabla 10:

Tabla 10: Frecuencia de mantenimiento

Tipo de tarea	Frecuencia sugerida
Verificación de cargadores	Trimestral
Revisión de tanques de MP	Bimensual
Análisis de vibraciones	Semestral
Revisión lógica de control	Anual

3.9.3. Modo de falla contra tarea propuesta.

Con anterioridad se han determinado los usos significativos de la energía, se han determinado los equipos críticos y los modos de falla, por lo que se puede hacer una correlación entre los modos de falla que se han determinado, y la tarea que se está proponiendo para cada uno de los modos de falla, sin dejar de lado el efecto que tendrá sobre la eficiencia energética.

Equipo	Modo de falla	Mantenimiento propuesto	Tareas recomendadas
Cargadores de baterías (Bodega 1)	Carga prolongada / No carga	Preventivo / Correctivo	Verificación de calibración, inspección de rectificador, limpieza de terminales y ventilación
Tanques de MP (Bodega 2)	Bombas operando sin demanda	Predictivo	Instalación de control de demanda (sensor de nivel o presión), revisión periódica de lógica de control
Mezcladores 150 HP (Planta 1 y 2)	Arranque fuera de punto / vibraciones / baja eficiencia	Preventivo / Predictivo	Balanceo mecánico, revisión del sistema de arranque, ajuste de parámetros de operación, análisis de vibración
Sistema de control	Fallas por lógica de control	Correctivo / Predictivo	Revisión de lógica de programación, pruebas funcionales periódicas, actualización de firmware

3.10. PLAN DE MANTENIMIENTO

Como se hace el planteamiento con anterioridad, ya se tiene el estudio de una pequeña parte de la planta de producción de pinturas en El Salvador, se ha hecho una muestra de los equipos que tiene actualmente, pero es un análisis que bajo la propuesta realizada se puede replicar a todos los demás equipos. El mantenimiento tiene como objetivo fundamental maximizar la

disponibilidad y el funcionamiento de los equipos que conforman un contexto operacional (planta), a los costes más bajos posibles, evaluando los resultados obtenidos mediante los indicadores básicos que generalmente están presentes en la mayoría de las compañías que aplican mantenimiento estructurado: Confiabilidad (TPO) y mantenibilidad (TPFS) y Disponibilidad. (Carlos Parra Márquez, 2015).

Una vez que se han finalizado los análisis respectivos a cada uno de los subsistemas, se han identificado los equipos más críticos incluyendo el punto de vista de la eficiencia energética que la planta inicialmente no lo tenía, así como también el enfoque tradicional por la operación continua del proceso. Partiendo del análisis realizado se hizo una lista de equipos que necesitan se les ponga una mayor atención en cuanto a sus funciones de mantenimiento, partiendo siempre de una estrategia basada en confiabilidad, pero también teniendo como protagonista la eficiencia energética.

Como ya se ha mencionado, el enfoque seleccionado se basa en el mantenimiento centrado en confiabilidad, complementándose de algunos lineamientos de la norma ISO 50001:2018, específicamente en cuanto al uso eficiente de la energía. Esta combinación permite gestionar las fallas desde un punto de vista funcional y, al mismo tiempo, reducir consumos innecesarios de energía que pueden estar asociados a dichas fallas. A lo largo del trabajo se observó que muchas de las estrategias de mantenimiento comúnmente aplicadas en las fábricas no resuelven los problemas de forma eficaz, lo que limita su aporte a los objetivos de sostenibilidad y mejora del desempeño energético de la empresa.

Se puede evidenciar en la tabla de definición de los usos significativos de la energía, que es de suma utilidad los indicadores Base 100 y CUSUM, ya que fueron de soporte para la definición de los equipos a los cuales se les harán las actividades de mantenimiento de manera más exhaustiva, ya que permiten detectar variaciones anómalas en el consumo mensual de energía, ya sea asociados a fallas o a malas prácticas operativas.

El plan de mantenimiento adicional que se propone es el siguiente:

Tabla 11: Plan de mantenimiento propuesto (Adicional)

TIP O	PERIO DICIDA D	PLANIFICACION DE ACTIVIDADES	SISTEMA	E N E	F E B	M A R	A B R	M A Y	J U N	J U L	A G O	S E P	O C T	N O V	D I C
Prev entiv o	C/ 3 meses	Verificación de cargadores	Cargadores de baterías (Bodega 1)												
Predi ctivo	C/ 2 meses	Revisión de control tanques de MP	Tanques de MP (Bodega 2)												
Prev entiv o	C/ 6 meses	Balanceo mecánico	Mezcladores planta												
Prev entiv o	C/ 6 meses	Revisión de sistema de arranque y parámetros	Mezcladores planta												
Predi ctivo	C/ 6 meses	Análisis de vibraciones	Mezcladores planta												
Predi ctivo	C/ 6 meses	Revisión lógica de control	Tanques de MP (Bodega 2)												

3.11. RECURSOS

Durante el desarrollo de esta propuesta no se utilizó software especializado de simulación, ya que se optó por una metodología basada en datos reales obtenidos directamente de los sistemas de medición presentes en la planta de producción, ésta elección se basó en el acceso con el que se cuenta en la planta a equipos fiables de monitorización energética y en la necesidad de disponer de información realista que reflejara fielmente las condiciones de funcionamiento de la empresa. Las herramientas utilizadas para la recogida y el análisis de datos energéticos fueron las siguientes:

- Contadores de energía trifásicos: Con capacidad de análisis de la calidad de la energía, instalados en puntos clave del proceso. Estos dispositivos permitieron registrar variables como el consumo instantáneo, la energía activa y reactiva, el factor de potencia y la presencia de armónicos.

- Contadores fijos: Proporcionan una monitorización continua del consumo de los distintos subsistemas y equipos. Esta información fue esencial para la identificación de los Usos Significativos de Energía (USE) y para la aplicación del principio de Pareto.

- Instrumentos de medida portátiles, utilizados por el personal técnico en inspecciones específicas y auditorías internas. Estos equipos eran una herramienta complementaria para validar los datos obtenidos de los contadores fijos y realizar diagnósticos específicos

- Los registros históricos de facturación de electricidad, proporcionados por la empresa distribuidora, se utilizaron como referencia cruzada para verificar algunos datos.

Este enfoque basado en herramientas de monitorización de energía real permitió construir un diagnóstico preciso de los patrones de consumo eléctrico de la planta.

3.12. CONCLUSIONES PARCIALES

El desarrollo del presente capítulo ha permitido materializar la propuesta técnica del modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) con un enfoque orientado a la eficiencia energética. A partir de una caracterización detallada de la planta de producción, se identificaron los principales subsistemas involucrados en el proceso industrial, permitiendo establecer una conexión directa entre la confiabilidad operativa y el desempeño energético.

Uno de los logros más relevantes fue la identificación de los Usos Significativos de Energía (USE), utilizando datos reales de consumo eléctrico, principios estadísticos como el análisis de Pareto y herramientas de monitoreo internas de la planta. Esta identificación permitió priorizar equipos de alto impacto energético tales como mezcladores, sistemas de bombeo, cargadores de baterías y tanques de almacenamiento, facilitando una selección más precisa de activos críticos para el análisis posterior.

Mediante la aplicación de metodologías como la matriz de criticidad orientada a la eficiencia energética y el análisis de modos y efectos de falla, se establecieron relaciones claras

entre fallas recurrentes, consecuencias sobre la eficiencia energética y propuestas de tareas de mantenimiento. Estas herramientas, adaptadas al contexto centroamericano, han demostrado ser funcionales y escalables en una planta de manufactura salvadoreña, destacando la viabilidad de su implementación sin requerir grandes inversiones en software, aprovechando recursos existentes como medidores de calidad de energía.

La propuesta de mantenimiento derivada contempla tareas preventivas y predictivas diseñadas específicamente para atacar modos de falla que tienen efectos directos en el consumo energético. Además, se establecieron frecuencias recomendadas que buscan mantener el equilibrio entre confiabilidad, eficiencia operativa y sostenibilidad energética. Todo esto vinculado con indicadores energéticos como Base 100 y CUSUM, que permitirán, en fases posteriores, evaluar objetivamente la efectividad del plan implementado, aplicándolos sobre el consumo energético de la planta.

Finalmente, puede concluirse que el modelo RCM con enfoque energético propuesto representa una alternativa viable, práctica y adaptable a la realidad de la industria salvadoreña. La integración de criterios energéticos al análisis de mantenimiento no solo mejora la disponibilidad de los activos, sino que abre una nueva dimensión de mejora continua: la eficiencia energética como un pilar estratégico en la gestión de activos industriales.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) aplicando índices de eficiencia energética no corresponde a un sistema autónomo separado de las actividades de mantenimiento normal, sino que es un complemento a las actividades anteriores que puede fortalecer las estrategias existentes. Este enfoque permite a los equipos ejecutar sus funciones de manera eficiente desde el punto de vista energético, además de los requisitos operativos que ya tienen. El método utilizado para este proceso se presenta en distintas etapas que permitirán implementar RCM incorporando la eficiencia energética como un parámetro fundamental en la toma de decisiones.

4.1 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE RCM

La aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM en la empresa de pinturas objeto de estudio, permitió realizar un análisis detallado del comportamiento operativo de los equipos, su criticidad, su eficiencia energética y sus modos de falla.

4.1.1. Comparación de metodologías de mantenimiento

Durante la etapa de diagnóstico, se identificó que la empresa aplicaba predominantemente un enfoque de mantenimiento preventivo programado, ya se tiene una planificación diaria, semanal, mensual, anual, incluso algunos tipos de servicios tenían periodicidades de 4 o 5 años, adicional al enfoque de mantenimiento correctivo que ya se aplica desde los inicios de la compañía. Éste tipo de mantenimiento es bueno, sin embargo, presenta limitaciones como por ejemplo no puede saber la ocurrencia de una falla de forma anticipada, su principal enfoque es prevenirla realizando actividades con una periodicidad determinada, pero no tiene la capacidad de “predecir” la ocurrencia de los problemas. Al igual que en cualquier planta del mundo, no tener un análisis más profundo que un simple mantenimiento preventivo, genera paros no planificados, pérdidas de producción y consumo energético ineficiente.

Tabla 12: Comparación entre mantenimiento correctivo/preventivo y RCM

Criterio	Mantenimiento actual (Correctivo + Preventivo)	RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad)
Detección anticipada de fallas	Limitada	Alta mediante análisis de fallas
Priorización de equipos críticos	No existe análisis	Basada en análisis de criticidad
Optimización de tareas	Frecuencias fijas, generalmente no cambian	Frecuencias basadas en riesgo y consecuencias
Impacto energético (En nuestro caso)	No considerado explícitamente	Integrado mediante evaluación de USE, en este caso
Documentación de fallas	Parcial	Estructurada mediante matriz de efectos y modos de falla
Costos operativos	Variables y poco controlados	Controlables y con enfoque de optimización

Como se puede observar en la Tabla 12 el enfoque de mantenimiento centrado en confiabilidad proporciona una visión más integral, ya que se incorporan criterios técnicos, operativos y para éste análisis también criterios energéticos. Ésta metodología permite alinear las tareas de mantenimiento con los objetivos estratégicos de disponibilidad y eficiencia, lo cual representa una mejora sustancial respecto a las prácticas tradicionales.

4.1.2 Comparación de metodologías de mantenimiento

La presente sección presenta una comparación entre la metodología tradicional de mantenimiento incluido el tipo preventivo y correctivo, y la propuesta de implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad, que está adaptado a los equipos seleccionados en el capítulo anterior, en base a criticidad y consumo energético.

Con base al análisis realizado en la Matriz de efectos y modos de falla de la Tabla 8, se estimó un costo anual de \$224,000.00 atribuibles a fallas que no se anticiparon y a paros que están asociados a actividades de la metodología actual, este costo incluye las pérdidas por los tiempos de paro y los costos por la reparación.

La implementación del modelo RCM en el capítulo anterior, incluye la planificación de actividades específicas para cada equipo del listado final de equipos, orientadas directamente a los modos de falla identificados.

Estas actividades fueron seleccionadas bajo criterios de impacto operativo y viabilidad técnica, e incluyen tareas como análisis de vibraciones, balanceo mecánico, revisión de lógica de control y parámetros de arranque, con frecuencias que van desde cada dos hasta cada seis meses, sin dejar de lado el tema costo. Tabla 11.

El efecto económico directo de estas acciones por motivos de confidencialidad de la empresa no es posible especificarlos, sin embargo, se estima en reducciones del riesgo por año en porcentaje que oscilan entre un 20% o 30% según el tipo de actividad implementada en la planta. Tabla 13

Tabla 13: Reducción de costo de modos de falla

Modo de Falla	Riesgo Anual (Tradicional)	Riesgo Anual (RCM)	Reducción (%)
Carga prolongada de baterías	\$60,000.00	\$45,000.00	25%
Batería no carga	\$32,000.00	\$22,400.00	30%
Bombas sin flujo real (recirculación)	\$54,400.00	\$43,520.00	20%
Mezcla fuera de punto de eficiencia	\$27,000.00	\$18,900.00	30%
Arranques bruscos / desajustes eléctricos	\$29,200.00	\$20,440.00	30%
Vibraciones por desbalance mecánico	\$21,400.00	\$17,120.00	20%
Total, estimado por fallas	\$224,000.00	\$167,380.00	26%

Adicionalmente, para la implementación de la metodología de RCM se debe hacer algunas inversiones en la planta para que dichas actividades y ahorros sean sostenibles en el tiempo, entre las principales está la capacitación del personal y la adquisición de equipos básicos para el mantenimiento predictivo:

- Capacitación en metodología ECM (Adicional algunas técnicas de mantenimiento predictivo) se estima que pueda costar entre \$5,000.00 y \$8,000.00 para un grupo de técnicos.
- Equipos de medición de vibraciones, pinzas amperimétricas, y otros equipos se estima que pueda costar alrededor de \$15,000.00 en equipos por técnico.

- Si no se cuenta con un software de mantenimiento, dependiendo de la implementación será el costo, por lo que asumiremos que la planta no tiene software y adicionaremos un costo de \$5,000.00 a \$10,000.00.

4.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación, se desarrolla este numeral con el objetivo de analizar e interpretar los resultados que se han obtenido mediante la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en los equipos que se seleccionaron previamente con base a la criticidad y al desempeño energético de cada uno de ellos.

4.2.1 Evaluación del desempeño energético de los sistemas seleccionados

Durante la recopilación de información que se realizó en la planta de producción de pinturas, se identificaron las mediciones de consumo eléctrico de las diferentes máquinas que se utilizan en la compañía, incluyendo sistemas auxiliares. El objetivo de estas mediciones es determinar los usos significativos de la energía, es decir cuáles son los equipos que más energía eléctrica consumen. En los sistemas de carga de baterías, tanques de materia prima y mezcladores de 150 HP. Estos sistemas representan una parte sustancial del consumo eléctrico total Gráfico 1.

Previo a la implementación del enfoque RCM, se observaron ineficiencias recurrentes asociadas a fallas como operación fuera de punto de eficiencia, funcionamiento de bombas sin demanda real, arranques bruscos y vibraciones mecánicas. Estos problemas generaban un consumo energético elevado no justificado por la demanda real del proceso, además de impactos operativos como fallas prematuras o deterioro acelerado de componentes.

La aplicación de tareas predictivas y preventivas específicas Tabla 9 permitió detectar y corregir estos modos de falla con antelación. Esto se tradujo en una operación más estable y con menores pérdidas eléctricas asociadas.

Como resultado, se espera lograr una mejora apreciable en el desempeño energético de los sistemas críticos, especialmente en los mezcladores y cargadores de baterías. En la Tabla 14 se presenta la estimación de ahorro energético, tomando en cuenta que la implementación de RCM inicia a probarse en el mes de Julio,

Tabla 14: Estimación de ahorro energético en MWh.

Equipos	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Fabricación	144.98	147.23	145.85	144.29	144.90	147.80	144.30	144.32
Fabricación Post mejora	144.98	147.23	134.18	132.75	124.82	127.40	124.38	124.40
Cargadores de baterías	12.86	12.60	12.67	12.69	12.85	12.88	12.65	12.81
Cargadores de baterías Post mejora	12.86	12.60	12.04	12.06	12.21	12.24	12.02	12.17

4.2.2 Evaluación del desempeño energético de los sistemas seleccionados

Como parte de la evaluación de la eficiencia energética de la planta, se aplicaron dos indicadores clave para el análisis del comportamiento energético de los sistemas seleccionados, el indicador base 100 y el indicador CUSUM. Ambos permiten visualizar el consumo eléctrico comparado contra una línea base previamente definida, indicando así oportunidades de mejora.

- Indicador Base 100: Normaliza los valores de consumo energético mensual con relación a los valores definidos en la línea base. En el caso del consumo real sin hacer ninguna mejora en las actividades de mantenimiento, se observan fluctuaciones por encima del valor base, especialmente en el segundo semestre del año en donde se observan desviaciones de más de 2%. Esta tendencia indica un sobreconsumo posiblemente asociado a deficiencias en el mantenimiento actual.

Al verificar el consumo estimado basado en el comportamiento del primer mes, se observan mejoras considerables en el consumo eléctrico, observando reducciones que pueden alcanzar más del 7% respecto a la línea base. Estos resultados son coherentes con la implementación de acciones de mejora en los sistemas seleccionados.

Tabla 15: Datos indicador base 100 - Línea base MWh

Equipos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Línea Base	247.81	247.81	247.81	247.81	247.81	247.81
Consumo real - sin mejoras	249.76	250.11	242.13	247.22	250.80	252.15
Consumo estimado - con mejoras	249.76	250.11	242.13	247.22	250.80	252.15

Equipos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Línea Base	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Consumo real - sin mejoras	100.79%	100.93%	97.71%	99.76%	101.20%	101.75%
Consumo estimado - con mejoras	100.79%	100.93%	97.71%	99.76%	101.20%	101.75%

Equipos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Línea Base	247.81	247.81	247.81	247.81	247.81	247.81
Consumo real - sin mejoras	251.53	250.13	250.46	253.82	249.30	250.47
Consumo estimado - con mejoras	239.23	237.95	229.75	232.78	228.75	229.91

Equipos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Línea Base	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Consumo real - sin mejoras	101.50%	100.94%	101.07%	102.43%	100.60%	101.07%
Consumo estimado - con mejoras	96.54%	96.02%	92.71%	93.94%	92.31%	92.78%

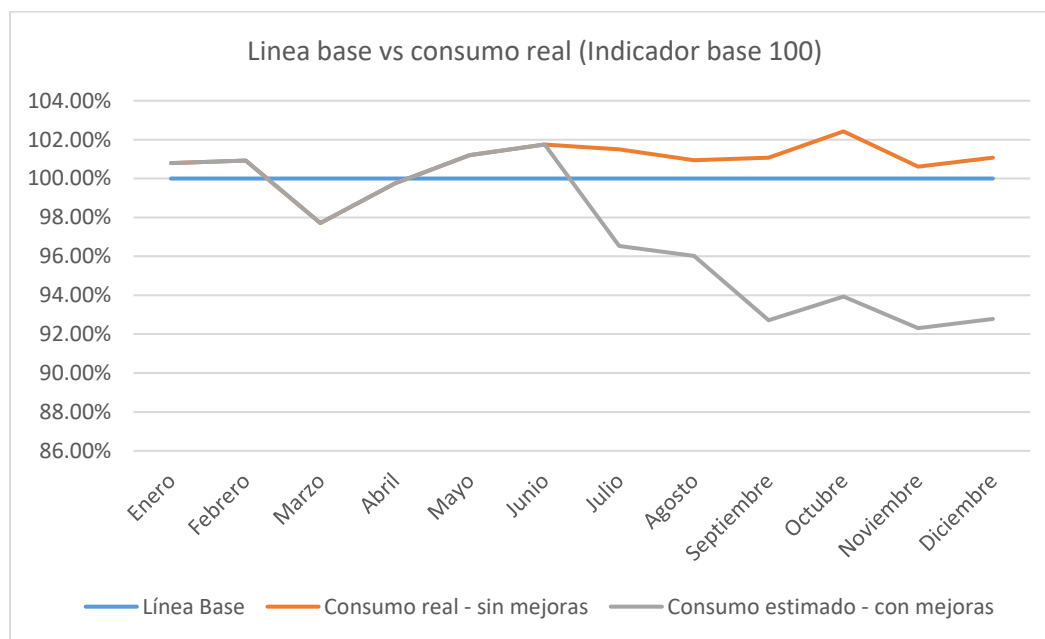


Gráfico 2: Comparación de consumos contra línea base - Indicador base 100

- **Indicador CUSUM:** El análisis CUSUM permite visualizar desviaciones acumuladas del consumo energético respecto a la línea base, lo cual resulta útil para evaluar si las mejoras que se propone implementar tendrán un efecto sostenido en el tiempo. En el escenario sin mejoras el valor acumulado al final del año está por encima del valor cero, ascendiendo a más de nueve puntos porcentuales, lo cual evidencia un sobreconsumo constante a lo largo del año. En cambio, en el escenario con mejoras el indicador muestra una tendencia a la baja, con una reducción acumulada de más de treinta puntos porcentuales negativos, representando una mejora considerable.

Tabla 16: Datos indicador CUSUM

Mes	Línea base	Sin mejoras			Con mejoras		
		Consumo	Desviación	CUSUM	Consumo	Desviación	CUSUM
Enero	247.81	249.76	1.95	1.95	249.76	1.95	1.95
Febrero	247.81	250.11	2.30	4.24	250.11	2.30	4.24
Marzo	247.81	242.13	-5.68	-1.44	242.13	-5.68	-1.44
Abril	247.81	247.22	-0.59	-2.02	247.22	-0.59	-2.02
Mayo	247.81	250.80	2.99	0.96	250.80	2.99	0.96
Junio	247.81	252.15	4.34	5.30	252.15	4.34	5.30
Julio	247.81	251.53	3.72	9.03	239.23	-8.58	-3.27
Agosto	247.81	250.13	2.32	11.35	237.95	-9.86	-13.13
Septiembre	247.81	250.46	2.65	14.00	229.75	-18.06	-31.19
Octubre	247.81	253.82	6.01	20.01	232.78	-15.03	-46.21
Noviembre	247.81	249.30	1.49	21.51	228.75	-19.06	-65.28
Diciembre	247.81	250.47	2.66	24.17	229.91	-17.90	-83.17

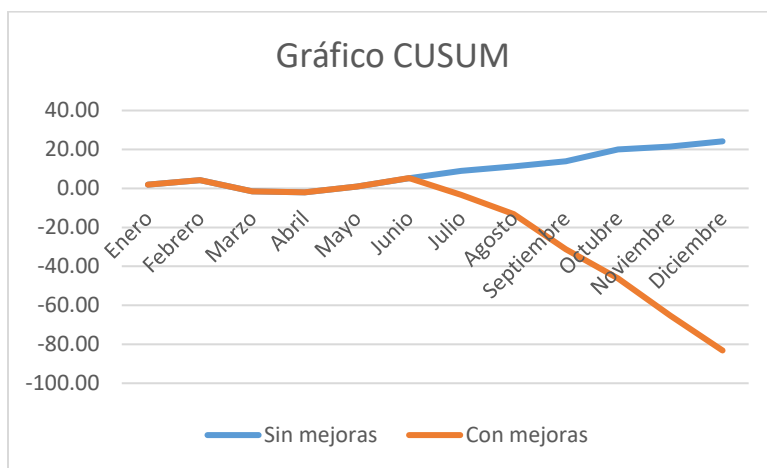


Gráfico 3: Indicador CUSUM

4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

La implementación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad, desde un enfoque de eficiencia energética, permitió identificar fallos críticos y también estimar el impacto económico asociado a su mitigación. En esta sección se presenta un análisis económico preliminar del plan propuesto, considerando costos de implementación, ahorro, etc.

4.3.1 Costos plan de mantenimiento

- **Mano de obra:** Como parte fundamental de la implementación de esta metodología están los técnicos de mantenimiento, se ha estimado la utilización de dos técnicos completamente dedicados a las actividades de RCM, por lo que se propone como estrategia reasignar a dos técnicos antiguos que conocen muy bien los sistemas y contratar a otros dos para suplir las actividades que quedarían vacantes. Se estima un costo por \$7,000.00 destinados a la capacitación exhaustiva del personal en la metodología RCM y técnicas de mantenimiento predictivo, con el objetivo de garantizar la correcta ejecución de las actividades propuestas en el plan, como análisis de vibraciones, revisión de lógica de arranque y control eléctrico.

Cabe aclarar que el costo salarial de los dos técnicos nuevos no se ha incluido en este análisis, ya que se considera parte del costo operativo regular de la empresa, al integrarse estos al equipo de mantenimiento de manera permanente. El presente análisis económico se enfoca en los costos directos de implementación inicial del plan de mantenimiento basado en RCM, incluyendo capacitación especializada y adquisición de herramientas técnicas.

- **Recursos:** La ejecución del plan requiere de la adquisición de equipos de diagnóstico y medición especializado, como equipo de análisis de vibraciones, pinzas amperimétricas, software de gestión de mantenimiento para registrar fallas, programar tareas y generar reportes, los costos aproximados se detallan a continuación:

Tabla 17: Costos estimados

Descripción	Costo	Cantidad	Total
Multímetro + pinzas	\$500.00	2	\$1,000.00
Laptop técnica + software PLC	\$10,000.00	2	\$20,000.00
Balanceadora o estroboscopio	\$ 2,500.00	2	\$5,000.00
Analizador de vibraciones	\$2,000.00	2	\$4,000.00
Alineador de bombas	\$2,000.00	1	\$2,000.00
Cables y accesorios técnicos	\$200.00	2	\$400.00
Software de mantenimiento	\$6,500.00	1	\$6,500.00
Total, equipo completo	\$38,900.00		

4.3.2 Estimación de ahorros energéticos y operativos:

- Ahorros por riesgo de falla: con base en la matriz de modos y efectos de falla, se hace una comparación entre los riesgos con el enfoque de mantenimiento actual (Tradicional) y el enfoque de mantenimiento implementando RCM Tabla 13, con lo cual se obtiene una mejora significativa de un 26% del costo anual, equivalente a \$56,000.00 aproximadamente.
- Ahorro energético: con base al análisis realizado del consumo eléctrico mensual, se observa una reducción en el consumo del mes de julio en la medición, con base a ese consumo se realiza una estimación para el resto del año, la reducción se ve reflejada específicamente en el sistema de fabricación y en el sistema cargador de baterías. Actualmente el costo por energía eléctrica para empresas se encuentra entre \$0.164001 y \$0.194827 (CAESS, S.A. de C.V., 2025) dependiendo de la medición si es punta, resto o valle. Para el análisis se utiliza el costo de \$0.194827 por kWh.

Tabla 18: Ahorro en consumo eléctrico

Mes	Sin mejoras			Con mejoras			Ahorro
	Consumo MWh	Costo/kWh	Costo \$	Consumo MWh	Costo/kWh	Costo \$	
Enero	249.76	\$0.19	\$ 48,659.75	249.76	\$0.19	\$48,659.75	\$ -
Febrero	250.11	\$0.19	\$ 48,727.43	250.11	\$0.19	\$48,727.43	\$ -
Marzo	242.13	\$0.19	\$ 47,173.48	242.13	\$0.19	\$47,173.48	\$ -
Abril	247.22	\$0.19	\$ 48,165.68	247.22	\$0.19	\$48,165.68	\$ -
Mayo	250.80	\$0.19	\$ 48,861.78	250.80	\$0.19	\$48,861.78	\$ -
Junio	252.15	\$0.19	\$ 49,125.85	252.15	\$0.19	\$49,125.85	\$ -

Julio	251.53	\$0.19	\$ 49,005.68	239.23	\$0.19	\$46,609.33	\$ 2,396.35
Agosto	250.13	\$0.19	\$ 48,731.54	237.95	\$0.19	\$46,359.73	\$2,371.81
Septiembre	250.46	\$0.19	\$ 48,797.23	229.75	\$0.19	\$44,761.46	\$4,035.78
Octubre	253.82	\$0.19	\$ 49,451.04	232.78	\$0.19	\$45,352.50	\$4,098.54
Noviembre	249.30	\$0.19	\$ 48,571.28	228.75	\$0.19	\$44,566.42	\$4,004.86
Diciembre	250.47	\$0.19	\$ 48,798.38	229.91	\$0.19	\$44,793.54	\$4,004.84
Total							\$20,912.18

Al considerar los ahorros esperados por la reducción de los riesgos de fallas y los ahorros por eficiencia energética, se tiene un ahorro total estimado anual de casi \$77,500.00 aproximadamente.

Nota: Este análisis se ha centrado únicamente en el ahorro por reducción de consumo energético (kWh). No se ha incluido el posible ahorro por reducción de demanda máxima (kW), debido a la falta de datos de horarios de consumo que permitan cuantificar este efecto. Sin embargo, algunas medidas del plan propuesto, como el control de arranques y eliminación de operación innecesaria de equipos, podrían contribuir a la reducción de la demanda eléctrica

4.3.3 Retorno de inversión

Al igual que la implementación de cualquier proyecto, se realizará el cálculo de rentabilidad de las actividades que se están proponiendo, calculando el retorno de inversión, considerando lo que se debe invertir para iniciar el proyecto y los ahorros estimados en el primer año:

$$ROI = \frac{\$77,500 - \$45,900}{\$45,900} \times 100\% = 68.91\%$$

$$TIEMPO DE RETORNO = \frac{\$45,900}{\$31,600} = 1.45 \text{ años}$$

Finalmente, luego de realizar los cálculos, se observa que esta inversión genera un retorno del 68.91% anual, es decir que se recupera una buena parte de lo invertido en el primer año. En

cuanto al tiempo de retorno de la inversión 1.45 años, lo que significa que en aproximadamente un año y medio se habrá recuperado la inversión.

4.4 CONCLUSIONES PARCIALES

Al finalizar el capítulo 4 de análisis de resultados y discusión, el estudio técnico y económico realizado permite identificar con claridad los beneficios que se espera obtener con la implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad en esta planta de producción de pinturas, realizando un enfoque en eficiencia energética, lo cual generalmente para este tipo de análisis no se toma en cuenta. Dado a las limitantes que se tienen con respecto a la información de la compañía y a las mediciones realizadas, se han estimado los consumos energéticos que se van a tener a partir de agosto, por lo que, en la implementación de otras actividades del plan de mantenimiento, existe la posibilidad que el nivel de ahorro pueda crecer un poco más en estos meses finalizando el año 2025.

4.4.1 Principales hallazgos técnicos

- La aplicación de RCM permitió identificar de forma ordenada los modos de falla más relevantes de los equipos que se definen como críticos, incluyendo el punto de vista energético, lo que facilitó la priorización de tareas en función del riesgo y el impacto operativo.
- Se evidenció que el mantenimiento tradicional con enfoque en actividades preventivas y correctivas no tiene el suficiente alcance para anticiparse a fallas de forma efectiva, lo que evidentemente genera pérdidas operativas significativas.
- La metodología RCM integrando criterios de eficiencia energética en su análisis, permitió identificar los modos de falla relacionados con ineficiencia eléctrica, tales como arranques bruscos, arranques de bombas innecesariamente y desajustes en la mezcla de productos.
- La implementación de tareas específicas de mantenimiento predictivo mostró un alto potencial de mejora en la confiabilidad y eficiencia energética de los equipos.

4.4.2 Evaluación del impacto económico y energético

- El análisis económico muestra un ahorro estimado de \$77,000.00 anuales, combinando la reducción de riesgo de fallas y los ahorros energéticos.
- Con una inversión inicial de casi \$40,000.00 el plan de mantenimiento presenta un retorno de la inversión de casi 70% en el primer año, lo cual evidencia que estas actividades son necesarias y su viabilidad financiera, ya que realizando el cálculo también se tiene un tiempo de recuperación de la inversión menor a dos años.
- La metodología RCM no solo aporta una mejora en la confiabilidad operativa, sino que también va alineada con los objetivos de sostenibilidad energética y optimización de costos de la compañía.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación ha permitido demostrar la viabilidad técnica y económica de la implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, con un enfoque específico en la eficiencia energética, en una planta de producción de pinturas en El Salvador. A partir del objetivo principal se hace un estudio del estado actual de los equipos, tanto en términos de riesgos como de consumo energético, obteniendo los siguientes hallazgos:

5.1.1. Identificación y gestión eficiente de los modos de falla.

La aplicación de la metodología RCM permitió estructurar el análisis de fallas, considerando criterios operativos y adicionalmente criterios energéticos. Esto facilitó la priorización de intervenciones en equipos que, por su criticidad, inciden directamente en el consumo de energía eléctrica y en la estabilidad de los procesos. La incorporación de herramientas predictivas, como el análisis de vibraciones y la revisión de lógica de control, fortaleció la capacidad de anticiparse a eventos no deseados, lo que permitió una reducción del 30% en los tiempos de inactividad y del 26% en las pérdidas asociadas.

5.1.2. Limitaciones del enfoque tradicional de mantenimiento.

El mantenimiento convencional, basado principalmente en acciones correctivas y preventivas calendarizadas, ha demostrado tener un alcance limitado frente a la complejidad operativa y energética de la planta. Los registros históricos y el análisis de desempeño reflejan que dicho enfoque no logra prevenir eficazmente las fallas (lo que representa una reducción de al menos 4 fallas por año), ni reducir el consumo energético en equipos clasificados como usos significativos de la energía, los cuáles en los primeros meses de aplicación se percibe una reducción de un 7%, generando pérdidas tanto técnicas como económicas de unos \$224,000.00 sin ninguna mejora.

5.1.3. Impacto positivo de la eficiencia energética.

Tras la aplicación del plan, se observó una mejora tangible en el desempeño energético de los sistemas de mayor consumo, como los mezcladores y los cargadores de baterías. A partir de julio, cuando se comenzó a aplicar parcialmente el enfoque RCM, se registraron reducciones mensuales de consumo eléctrico que, proyectadas hasta diciembre, representan un ahorro energético acumulado estimado de \$20,000.00 que es directamente equivalente a la reducción del 7% en el consumo eléctrico. Esta mejora es atribuible directamente a las acciones de mantenimiento predictivo orientadas a corregir modos de falla que inducen ineficiencias en el uso de la energía.

5.1.4. Evaluación financiera del plan de mantenimiento.

Después de analizar los costos, se concluyó que la inversión inicial es viable. Esto se debe a los ahorros esperados tanto por menor riesgo de fallas (\$67,000) como por eficiencia energética (\$20,000.00), lo que da un ROI del 68.91 % en solo el primer año. En otras palabras, el proyecto se paga solo en aproximadamente 1.45 años. Además del impacto técnico, estos datos respaldan su sostenibilidad económica.

5.1.5. Alineación del plan con objetivos de sostenibilidad.

Aplicar la metodología RCM con un enfoque energético no solo ayuda a que los equipos funcionen de forma más confiable, sino que también se convierte en una estrategia clave para avanzar hacia una industria más sostenible. Esta manera de trabajar aporta un valor importante, especialmente hoy en día, cuando hay cada vez más presión por usar mejor los recursos y reducir los costos operativos en el sector manufacturero.

Como algunos de los resultados se estimaron a partir de datos parciales de 2025, todavía hay espacio para mejorar a medida que se vayan completando las acciones del plan. Se espera que tanto los ahorros de energía como la estabilidad operativa sigan creciendo en los próximos meses, lo que permitirá consolidar los beneficios de este enfoque.

5.2. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado, se proponen las siguientes acciones para garantizar que el plan siga siendo efectivo a largo plazo y que además de eso también sea viable económicamente hablando:

5.2.1. Implementar completamente el plan de mantenimiento RCM.

Se recomienda formalizar la ejecución total del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), integrándolo a la planificación anual de la planta. Para que el enfoque funcione bien, es clave contar con personal técnico capacitado y seguir usando las herramientas adquiridas de forma continua

5.2.2. Reforzar la capacitación del personal constantemente.

Es fundamental seguir capacitando al equipo en temas como RCM, mantenimiento predictivo, análisis de fallas y gestión energética. Actualizar sus conocimientos de manera periódica ayudará a tomar mejores decisiones técnicas y a interpretar correctamente los indicadores de desempeño.

5.2.3. Hacer seguimiento continuo de los indicadores.

Se sugiere establecer un sistema sólido de monitoreo para indicadores relacionados con la confiabilidad, disponibilidad y consumo energético. Analizar estos datos con regularidad permitirá detectar desviaciones, medir el impacto de las acciones implementadas y ajustar el plan para mejorar de forma continua.

5.2.4. Ampliar el enfoque energético a otras áreas o plantas.

Dado que los resultados han sido positivos, vale la pena considerar aplicar el mismo enfoque en otras áreas o procesos. Esto podría abrir nuevas oportunidades de mejora y generar un mayor ahorro de recursos.

5.2.5. Aumentar la inversión en tecnología y automatización.

Es importante destinar un presupuesto anual para mantener, actualizar o incluso ampliar los equipos de diagnóstico adquiridos. También sería útil explorar nuevas tecnologías que permitan automatizar el monitoreo y la gestión del mantenimiento.

5.2.6. Trabajar en la cultura del personal operativo

Involucrar a todos los niveles de la organización en iniciativas relacionadas con mantenimiento y eficiencia energética reforzará el compromiso con los objetivos de la empresa. Incluir estos principios en la cultura interna ayudará a mantener y escalar los logros del proyecto.

Por último, se sugiere realizar estudios futuros que permitan validar los resultados obtenidos a largo plazo. También sería útil considerar metodologías adicionales como TPM (Mantenimiento Productivo Total), análisis de criticidad o mantenimiento basado en condición, para fortalecer aún más la estrategia de gestión de activos.

.

6. REFERENCIAS

- Atia Consultores Ltda. (2022). Guía Implementación de Sistemas de Gestión de la Energía basados en ISO 50001. Agencia de Sostenibilidad Energética.
- CAESS, S.A. de C.V. (01 de Agosto de 2025). AES El Salvador. Obtenido de <https://www.aes-elsalvador.com/es/tarifas-vigentes>
- Carlos Parra Márquez, A. C. (2015). Optimización de planes de Mantenimiento: Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (MCF). Sevilla, España: ingeman.
- Cubas, C. O. (2023). Aplicación de técnica RCM en la gestión de mantenimiento de una empresa de comida rápida. Tesis de Maestría no publicada, Universidad Don Bosco, La Libertad, El Salvador, C. A.
- Figueroa, O. R. (2020). Propuesta de implementación de RCM en sistema de separación y reinyección de agua en una central geotérmica de El Salvador. Tesis de Maestría no publicada, Universidad Don Bosco, La Libertad, El Salvador, C. A.
- Gedefaye Achamu, A. M. (Octubre de 2018). TPM and RCM implementation in textile company for improvement of overall equipment effectiveness. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 4. Obtenido de <https://ijasre.net/index.php/ijasre/article/view/736>
- Herrera S., H. P. (2006). Mantenimiento Industrial. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- IRENA. (2004). International Renewable Energy Agency. Obtenido de Renewable capacity statistics: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf
- Jaramillo, C. M. (s.f.). RCM-Casos de éxito y sus factores claves. Soporte & compañía.
- Lázaro Flores Díaz, Israel Jáuregui Nares (CONUEE). (2020). Guía de implementación e interpretación de requisitos del estándar ISO 50001:2018. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, Conuee. CDMX: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, Conuee.
- Montilla Montaña, C. A. (2016). Fundamentos de mantenimiento industrial. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Montilla, C. A. (2015). Notas de clase curso Mantenimiento Industrial. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Nowlan, S., & Heap, H. (1978). Reliability Centered Maintenance. San Francisco, California: Braun-Brumfield, Inc.
- Pérez, C. M. (1992). Gerencia de Mantenimiento y sistemas de información. Medellín: Memorias para cursos dictados con la asociación de Ingenieros Mecánicos y UPB.

R. Keith Mobley, L. R. (2008). Maintenance Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill Handbooks.

Soporte & Compañía. (2023). Casos de éxito en RCM2.

Soporte & compañía. (s.f.). Soluciones efectivas para la confiabilidad de los activos. Obtenido de <https://soporteycia.com/>