UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2019-09

HERRAMIENTA DE CONTROL PARA CUANTIFICAR LA EFECTIVIDAD DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO.

BELTRÁN SILVA, MIGUELANGEL

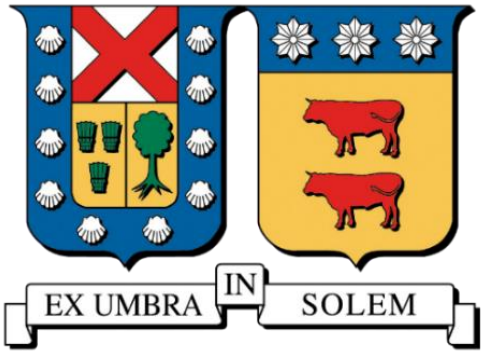
https://hdl.handle.net/11673/49748

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

SANTIAGO – CHILE



HERRAMIENTA DE CONTROL PARA CUANTIFICAR LA EFECTIVIDAD DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO

MIGUELANGEL BELTRÁN SILVA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: SR. PABLO VIVEROS GUNCKEL

PROFESOR CORREFERENTE: SR. RODRIGO MENA BUSTOS

Septiembre de 2019

DEDICATORIA

Esta tesis se la quiero dedicar a mis padres, Karina Silva y Miguel Beltrán debido a que gracias a ellos es que e podido alcanzar mis metas y objetivos en la vida, son ellos las personas mas importantes para mí y quienes se merecen la dedicación de mi tesis por todo lo que han hecho por mi siempre. Les deseo lo mejor en lo que venga desde ahora y mi apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por permitirme realizar todo lo que me he propuesto tanto en mi vida personal como en la profesional, ya que sin ellos nada de esto estaría ocurriendo.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis hermanos y abuelos por el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida y por ayudarme a que pudiera lograr este objetivo tan anhelado.

En tercer lugar, quisiera agradecer a los profesores Pablo Viveros y Rodrigo Mena por su guía y dirección en este proceso tan difícil, la empatía y apoyo que siempre me otorgaron. Además, agradezco mucho el grato ambiente de trabajo en el que se realizó esta tesis y la confianza depositada en mí.

Por último, me gustaría agradecer a cada una de las personas que fueron parte de mi crecimiento en la universidad, sin ellos mi estadía en ella hubiera sido mucho más difícil, por lo que su amistad y apoyo recordaré por siempre.

ABSTRACT

Los avances tecnológicos y el escenario industrial de hoy hacen que el mantenimiento de activos físicos sea cada vez mas importante dentro de las empresas, llevando a que cada vez sea más necesario un mayor presupuesto para una correcta implementación del plan.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una herramienta de control que permita cuantificar la efectividad del plan de mantenimiento, y de esta forma medir la eficacia en la aplicación de las políticas de mantenimiento y la eficiencia de los recursos. Por lo tanto, la herramienta busca que el mayor presupuesto que hoy tiene el área de mantenimiento se utilice rigurosamente en la mantención de los activos físicos que son parte importante de las operaciones de las empresas.

La metodología propuesta para la realización de esta herramienta cuenta con indicadores de adherencia según el desempeño real del plan de cada una de las actividades que lo componen, siendo esta, la base de los árboles de valor por política que se construyen para la desagregación de los índices de efectividad y su posterior análisis, encontrando de forma más sencilla, en qué nivel del plan se está produciendo una diferencia mayor con el desempeño esperado. Además, cuenta con herramientas gráficas que dan el apoyo para un análisis global del plan de mantenimiento, desde la cobertura que se les da a los modos de falla con gráficos y matrices de cobertura, hasta la filtración de los gráficos de dispersión de los principales indicadores de efectividad por política de mantenimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 11

2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES 12

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 14

4. OBJETIVOS 16

4.1. Objetivo general: 16

4.2. Objetivos específicos: 16

5. ALCANCE 17

6. MARCO TEÓRICO 18

6.1. Efectividad de un Plan de Mantenimiento 18

6.2 Reliability Centered Maintenance - RCM 20

6.2.1. Origen de la Metodología RCM 20

6.2.2. Concepto RCM 21

6.2.3. Implementación de RCM 23

6.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla – AMEF 25

6.3.1. Concepto AMEF 25

5.3.2. Falla Funcional 26

5.3.3. Modo de Falla 27

5.3.4. Efectos de la Falla 30

5.3.5. Consecuencias de la Falla 32

5.4 Políticas de Mantenimiento 33

5.4.1. Mantenimiento Correctivo (CM) 34

5.4.2. Mantenimiento Preventivo (PM) 35

5.4.3. Mantenimiento según condición (CBM) 35

5.4.4. Mantenimiento Predictivo (PrM): 36
7. METODOLOGÍA 37
7.1. Justificación de la Propuesta Metodológica 37
7.2. Desarrollo de la Propuesta 39
7.2.1. Presentación de la Herramienta 39
7.2.2. Diagnóstico del Plan de Mantenimiento 42
7.2.3. Información de Entrada 47
7.2.4. Cálculo de Indicadores 59
7.2.5. Herramientas Graficas y Plan de Control 81
7.2.6. Preguntas de Interés 97
8. ANÁLISIS Y RESULTADOS (Aplicado a datos de ejemplo) 99
8.1. Análisis de los indicadores de efectividad del plan por política de mantenimiento 99
8.1.1. Mantenimiento Correctivo (CM) 100
8.1.2. Mantenimiento Preventivo (PM) 103
8.1.3. Mantenimiento según Condición (CBM) 106
8.1.4. Mantenimiento Predictivo (PrM) 109
8.2 Análisis de las herramientas gráficas de apoyo 112
8.2.1. Matrices de Cobertura 112
8.2.2. Patrones Gráficos 114
8.2.3. Resultados del control del plan 122
9. CONCLUSIONES 124
REFERENCIAS 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 7 preguntas claves de RCM 22

Tabla 2. Ejemplo de AMEF: Fallas funcionales. 27

Tabla 3. Ejemplo de AMEF: Modo de falla. 29

Tabla 4. Ejemplo de AMEF: Efectos de modo de falla. 31

Tabla 5. Ejemplo de la descripción general del plan de mantenimiento. 42

Tabla 6. Ejemplo de la descripción de las actividades de mantenimiento preventivas. 43

Tabla 7. Ejemplo de la descripción de las actividades de mantenimiento correctivas. 44

Tabla 8. Ejemplo de clasificación de las políticas de mantenimiento. 44

Tabla 9. Ejemplo de la información general requerida de los modos de falla. 45

Tabla 10. Información general de los costos de mantenimiento de los modos de falla. 46

Tabla 11. Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento correctivo. 50

Tabla 12. Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento preventivo. 51

Tabla 13. Información de los indicadores básicos y reales del mantenimiento según condición. 53

Tabla 14. Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento predictivo. 54

Tabla 15. Ejemplo de la información de horas hombre según las especialidades de mano de obra. 56

Tabla 16. Ejemplo de la información de los costos según las especialidades de mano de obra. 56

Tabla 17. Ejemplo de la información y valor de la interpretación. 57

Tabla 18. Indicadores de adherencia según la eficacia de las políticas de mantenimiento. . 63

Tabla 19. Indicadores de adherencia según la eficiencia de los costos directos del plan de mantenimiento. 64

Tabla 20. Indicador de adherencia según la ineficiencia de los costos directos del plan de mantenimiento. 65

Tabla 21. Indicadores de la desviación de la efectividad del plan de mantenimiento. 65

Tabla 22. Indicadores de la desviación de la eficiencia e ineficiencia del plan de mantenimiento. 66

Tabla 23. Ejemplo de cálculo de ponderadores de los factores del indicador de efectividad. 69

Tabla 24. Ejemplo de la primera matriz de cálculo de los ponderadores de los costos directos según la eficiencia. 70

Tabla 25. Ejemplo de la segunda matriz de cálculo de ponderadores de los costos directos según la eficiencia. 70

Tabla 26. Ejemplo de los ponderadores de los costos directos según la eficiencia. 71

Tabla 27. Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento correctivo. 72

Tabla 28. Indicadores principales de efectividad del mantenimiento correctivo. 73

Tabla 29. Indicador de efectividad del mantenimiento correctivo. 73

Tabla 30. Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento preventivo. 74

Tabla 31. Indicadores principales de efectividad del mantenimiento preventivo 75

Tabla 32. Indicador de efectividad del mantenimiento preventivo 75

Tabla 33. Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento según condición 76

Tabla 34. Indicadores principales de efectividad del mantenimiento según condición. 76

Tabla 35. Indicador de efectividad del mantenimiento según condición. 77

Tabla 36. Indicadores básicos de efectividad del plan predictivo. 77

Tabla 37. Indicadores principales de efectividad del mantenimiento predictivo. 78

Tabla 38. Indicador de efectividad del mantenimiento predictivo. 79

Tablas 39. Indicadores de la desviación de la efectividad del mantenimiento correctivo y preventivo. 79

Tabla 40. Indicadores de la desviación de la efectividad del mantenimiento según condición y predictivo. 80

Tabla 41. Ejemplo de la interpretación del cumplimiento de expectativa según nivel de cumplimientos. 95

Tabla 42. Control del plan a través de los indicadores de efectividad a nivel de las políticas de mantenimiento. 96

Tabla 43. Control del plan a través de los indicadores de efectividad a nivel de las actividades. 96

Tabla 44. Análisis de resultados obtenidos en el control del plan por política de mantenimiento. 122

Tabla 45. Análisis de resultados obtenidos en el control del plan por actividad de mantenimiento. 123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de implementación de RCM. (Fuente: A. Crespo, 2007) 24

Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología de AMEF (Fuente: A. Aguilar-Otero et al., 2010) 25

Figura 3. Categorías de las consecuencias de los modos de falla. (Fuente: C. Parra, 2008) 33

Figura 4. Sinóptico de las políticas de mantenimiento. (Fuente: E. Zio, 2013) 34

Figura 5. Metodología propuesta e integración entre las diferentes fases. (Fuente: Elaboración propia) 41

Figura 6. Ejemplo de matriz de cobertura preventiva. Indicador de cobertura del costo de mantenimiento a cargo de la actividad i para el modo de falla j según una política preventiva. (Fuente: Elaboración propia) 83

Figura 7. Ejemplo de matriz de cobertura a la falla. Indicador de cobertura del costo de mantenimiento a cargo de la actividad i para el modo de falla j según la política a la falla. (Fuente: Elaboración propia) 83

Figura 8. Gráfico de la herramienta. Desempeño esperado del palan de mantenimiento por modo de falla j. (Fuente: Elaboración propia) 85

Figura 9. Gráfico 2 de la herramienta. Desempeño real del plan de mantenimiento por modo de falla j. (Fuente: Elaboración propia) 86

Figura 10. Gráfico 3 de la herramienta. Eficacia del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia). 87

Figura 11. Gráfico 4 de la herramienta: Eficiencia del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia) 88

Figura 12. Gráfico 5 de la herramienta. Ineficiencia del plan de mantenimiento según la actividad. (Fuente: Elaboración propia) 89

Figura 13. Gráfico 6 de la herramienta. Efectividad del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia) 90

Figura 14. Gráfico 7 de la herramienta. Desviación de la eficacia del plan de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia) 91

Figura 15. Gráfico 8 de la herramienta. Desviación de la eficiencia del plan de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia) 92

Figura 16. Gráfico 9 de la herramienta. Desviación de la ineficiencia del plan. (Fuente: Elaboración propia) 93

Figura 17. Gráfico 10 de la herramienta. Desviación de la efectividad del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia) 94

Figura 18. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento correctivo (CM). (Fuente: Elaboración propia) 100

Figura 19. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento preventiva (PM). (Fuente: Elaboración propia) 103

Figura 20. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento según condición (CBM). (Fuente: Elaboración propia) 106

Figura 21. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento predictivo (PrM). (Fuente: Elaboración propia) 109

Figura 22. Matrices de cobertura en costo de mantenimiento para los modos de falla atendidos preventivamente y a la falla. (Fuente: Elaboración propia) 112

Figura 23. Matrices de cobertura en tiempo fuera de servicio por el mantenimiento para los modos de falla atendidos preventivamente y a la falla. (Fuente: Elaboración propia)..... 113

Figura 24. Gráfico 11 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento correctivo. (Fuente: Elaboración propia)..... 118

Figura 25. Gráfico 12 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento preventivo. (Fuente: Elaboración propia)..... 119

Figura 26. Gráfico 13 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento según condición. (Fuente: Elaboración propia)..... 120

Figura 27. Gráfico 14 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento predictivo. (Fuente: Elaboración propia)..... 121

1. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo la idea del mantenimiento ha cambiado debido a una mayor automatización en la gestión de éste, al aumento de la complejidad de la maquinaria, a las nuevas técnicas de mantenimiento, a un nuevo enfoque de la organización y sus responsabilidades. Es por esto que ahora, el mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas. Éstas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medio ambiente, un conocimiento creciente de la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan [J. Moubray, 2004].

Las expectativas del mantenimiento pueden verse reflejadas en distintos aspectos, debido a que "una industria contiene numerosos tipos de equipos y procesos que son un desafío de controlar y mantener para lograr el mayor rendimiento y beneficio para la planta" [C. Lindberg, 2015]. Por lo tanto, la complejidad de la industria actual conlleva a que el mantenimiento este destinado a ser un pilar fundamental de toda empresa que se respete y quiera ser considerada competitiva, es por esto que las empresas intentan establecer expectativas de aplicación y resultados en el desarrollo de técnicas y métodos para la detección, control y ejecución de actividades de mantenimiento que garanticen el buen desempeño de la maquinaria. (E. Hernández y E. Navarrete, 2001).

Dado lo anterior es que surge la necesidad de los encargados del mantenimiento de los activos físicos, de obtener evaluaciones de efectividad de los planes de mantenimiento que se están ejecutando en la empresa, pudiendo medir la calidad de estos.

2. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

A continuación, se definen algunos conceptos importantes que facilitan la comprensión del presente trabajo:

- **Actividades de Mantenimiento:** Actividades que se llevan a cabo según la política de mantenimiento a cargo, teniendo como propósito principal mantener o reparar una unidad funcional para que de esta forma se conserve o restaure el activo pudiendo cumplir con las funciones esperadas.
- **Adherencia del Plan de Mantenimiento:** Capacidad del usuario o dueño del plan de mantenimiento de cumplir con las expectativas creadas previamente de forma correcta, con los costos y tiempos esperados.
- **Cobertura del Plan de Mantenimiento:** Inversión u operación llevada a cabo para reducir la exposición existente al riesgo por parte de los sistemas a mantener. La cobertura puede llevarse a cabo a nivel de política de mantenimiento, actividad o modo de falla.
- **Costo de Oportunidad por Mantenimiento:** Costo indirecto de mantener un activo, ya que es el costo de tomar la decisión de mantener y por lo tanto perder los beneficios que tendría la operación del sistema durante la duración de la reparación/reemplazo.
- **Desempeño Esperado del Plan de Mantenimiento:** Nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario del plan de mantenimiento realizado a un activo o sistema expresado en la evaluación de variables determinantes en su rendimiento.

- **Desempeño Real del Plan de Mantenimiento:** Nivel de desempeño real de la aplicación del plan de mantenimiento realizado a un activo o sistema expresado en la evaluación de variables determinantes en su rendimiento.
- **Eficacia del Plan de Mantenimiento:** Capacidad de lograr los objetivos y metas programadas del plan de mantenimiento según las políticas asociadas, con los recursos disponibles y en un tiempo predeterminado por la expectativa del plan**.**
- **Efectividad del Plan de Mantenimiento:** Capacidad de llevar a cabo el plan de mantenimiento según los objetivos y desarrollo esperado de este, basado principalmente en la eficacia, eficiencia e ineficiencia del plan.
- **Eficiencia del Plan de Mantenimiento:** Capacidad de alcanzar los objetivos y metas programadas del plan de mantenimiento con el mínimo de recursos disponibles (mano de obra, repuestos, materiales u servicios) y tiempo para su ejecución.
- **Indicador de Mantenimiento:** Es un parámetro numérico que facilita la información sobre un factor importante identificado por mantenimiento dentro de los procesos, respecto a expectativas del usuario en cuanto a costo o tiempo.
- **Ineficiencia del Plan de Mantenimiento:** Incapacidad de llevar a cabo el plan de mantenimiento con el menor tiempo fuera de servicio del sistema, reduciendo el costo de oportunidad de tomar la decisión de mantener el activo.

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Hoy las compañías ya se han dado cuenta de la importancia del mantenimiento en la organización, por lo que lo han incorporado a su esquema general y lo han administrado en interacción con las demás funciones. “Por lo tanto, el desafío de diseñar el modelo ideal para impulsar las actividades de mantenimiento se ha convertido en un tema de investigación y en una pregunta fundamental para alcanzar la eficacia y la eficiencia de la gestión del mantenimiento y cumplir los objetivos de la empresa” [Prasad Mishra et al., 2006]. Este modelo ideal es la expectativa de funcionalidad que se espera por parte del activo físico según las distintas actividades de mantenimiento a las cuales sean sometidos, es por esto que, “la moderna gestión del mantenimiento incluye todas aquellas actividades destinadas a determinar objetivos y prioridades de mantenimiento, las estrategias y las responsabilidades” [P. Viveros et al., 2013].

La moderna gestión del mantenimiento a la cual se refiere tiene el desafío de poder ser medida desde su ejecución hasta los resultados que de esta se obtengan, dado el parámetro de un modelo ideal que impulse las actividades de mantenimiento o un resultado esperado definido por la empresa.

En cualquier área de una organización siempre será posible definir un resultado esperado (expresado como meta, una cantidad, una variación, un porcentaje, etc.), un costo estimado y un tiempo específico para llevar a cabo la labor que se propone como meta o tarea. Pues bien, la combinación de esos elementos, o sea, el resultado, el costo y tiempo, permiten medir objetivamente el grado de efectividad y eficacia del área de una

organización, y hacer comparaciones entre ellas aún disímiles en el contenido de la labor (C. Mejía, 1998)

Dicho lo anterior es que se plantea la necesidad de tener un indicador de efectividad que pueda medir la diferencia existente entre este plan ideal de gestión de mantenimiento y la ejecución y resultado de este, de forma que se pueda evaluar qué tan bien se está realizando el mantenimiento y si lo obtenido puede ser medido objetivamente en un indicador de eficiencia y eficacia que pueda mostrar un cálculo cuantitativo en términos del tiempo y costo gastado.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general:

Elaboración de una herramienta que permita cuantificar la efectividad real de la aplicación de un plan de mantenimiento de activos físicos en términos de la ejecución del plan y los resultados según la expectativa de éste.

4.2. Objetivos específicos:

La cuantificación de la efectividad del plan de mantenimiento tiene que cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Establecer un indicador de efectividad de la ejecución real del plan de mantenimiento para cada política definida según el nivel de expectativa creada, en tiempo y costo.
- Establecer un indicador de desviación de la ejecución real del plan de mantenimiento para cada política definida según el nivel de expectativa creada, en tiempo y costo.
- Incorporar a los indicadores herramientas gráficas a nivel de actividad de mantenimiento y modos de falla, y una perspectiva de desagregación de los indicadores para su análisis hasta el mínimo nivel.

5. ALCANCE

La realización de este trabajo busca la obtención de una herramienta que otorgue un índice de efectividad de los planes de mantenimiento que son necesarios en la actualidad para la conservación y continuidad funcional de sistemas complejos en la industria.

Dicho lo anterior, es que se define como un trabajo que tiene dos tipos de alcance, por una parte, tiene un alcance del tipo descriptivo, ya que su función principal es la de medir la ejecución de un plan de mantenimiento y sus consecuencias intentando dar conocimiento de la semejanza que hay entre dos resultados, uno ideal y otro esperado.

Por otra parte, el alcance es del tipo exploratorio debido a que, si bien existe información acerca de los variados planes de mantenimiento existentes en la actualidad, se intenta llegar a una herramienta novedosa que otorgue indicadores nuevos de adhesión del plan de mantenimiento e indicadores de resultados según parámetros de desempeño creados.

El indicador busca ser de utilidad para los operadores de mantenimiento, pudiendo identificar los errores que se están cometiendo a la hora de la realización del plan, así mejorar la continuidad operacional de la planta y con esto los resultados de la gestión del mantenimiento.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Efectividad de un Plan de Mantenimiento

La importancia de los activos físicos en la industria de hoy lleva a que se establezcan planes de mantenimiento lo más efectivos posibles, es por esto que la efectividad de un plan te mantenimiento se está convirtiendo en una de las principales preocupaciones de la empresa. A modo general, "este concepto involucra la eficiencia y la eficacia, es decir, el logro de los resultados programados en el tiempo y con los costos más razonables posibles. Supone hacer lo correcto con gran exactitud y sin ningún desperdicio de tiempo o dinero" [C. Mejia, 1998]

El mantenimiento juega un rol relevante a la hora de lograr un objetivo y "La efectividad enfatiza que tan bien un departamento o función cumple con sus objetivos o necesidades de la empresa" [A. Crespo, 2007], por lo tanto, muchos programas están siendo conducidos para mejorar la eficiencia y eficacia de sus planes de mantenimiento.

La eficiencia es un concepto fundamental en la definición de efectividad, pero "el termino eficiencia tiene dos significados bastante diferentes. El primero mide el rendimiento, relacionado con la inversión, mientras que el segundo mide que tan bien está funcionando algo en relación con que tan bien debería estar haciéndolo" (J. Moubray, 2004). De este modo, dada la expectativa de resultados de un plan de mantenimiento es que la eficiencia mide que tan bien está funcionando el plan en relación con lo planificado. Al medir la eficiencia de un plan de mantenimiento, mediremos, por ejemplo, nuestra capacidad para garantizar niveles adecuados de

habilidades, la preparación adecuada para el trabajo, las herramientas adecuadas, el cumplimiento del calendario, etc. “Por lo tanto si queremos medir la eficiencia, mediremos que tan bien las diferentes actividades de mantenimiento están siendo desarrolladas, no si las actividades en sí mismas están correctas” [A. Crespo, 2007]. Es por esto que, la eficiencia basa sus resultados en el desarrollo de las actividades de mantenimiento actuando con el mínimo gasto o esfuerzo necesario, midiendo la forma en que se realiza la tarea y no si esta es la correcta, permitiendo minimizar los costos directos del mantenimiento como lo es la mano de obra y los demás recursos de mantenimiento requeridos.

Dicho lo anterior, es que se puede identificar que el desarrollo de las actividades de mantenimiento está directamente relacionado con la efectividad del plan de mantenimiento por lo que “Todos los aspectos de la eficacia y la eficiencia del mantenimiento se ven afectados por que tan bien se planifican y controlan las actividades de mantenimiento, desde la utilización general de mano de obra, hasta la duración de las interrupciones individuales” [J. Moubray, 2004]

El segundo concepto fundamental que explica la efectividad, es la eficacia, la cual “puede representar la satisfacción general de la compañía con la capacidad y condición de sus activos o la reducción del costo total de la compañía obtenido dada la capacidad de producción que está disponible cuando se es necesaria” [A. Crespo, 2007]. Por lo tanto, representa la medida del cumplimiento de los objetivos de la empresa y una medida de la obtención de resultados esperados por los clientes dado que “el seguimiento y análisis de los resultados que se van obteniendo en la instalación con la

implementación de un nuevo plan de mantenimiento son tareas que resultan de capital importancia para la evaluación de su eficacia" [A. Fernandez, 2003]. De este modo, dada la expectativa de resultados de un plan de mantenimiento es que la eficacia mide que tan buenos son los resultados del plan en relación con lo planificado.

Además, la eficacia de un plan de mantenimiento permite medir el desempeño de los costos indirectos de mantenimiento, desde los más importantes como los son los costos relacionados a las pérdidas de producción hasta las últimas instancias, como los costos de insatisfacción de los clientes (A. Crespo, 2007).

6.2 Reliability Centered Maintenance - RCM

6.2.1. Origen de la Metodología RCM

RCM es una metodología de mantenimiento centrada en la confiabilidad, la cual se originó hacia a fines de la década de los años 60 entre la industria aeronáutica norteamericana y el gobierno dada la incorporación de aeronaves más grandes con sistemas complejos que requerían diseñar actividades de mantenimiento apropiadas con frecuencias optimas. Howard Heap y Stanley Nowlan trabajaron para el departamento de Defensa de Estados Unidos realizando esta metodología, la cual tenía como objetivo establecer los procedimientos de mantenimiento apropiados que permitieran reducir los tiempos de parada por mantenimiento, reducir los costos de mantenimiento e incrementar la seguridad de los vuelos (C. Parra, 2008). Heap y Nowlan en su libro "Reliability-centered maintenance" hacen referencia a que "El término mantenimiento centrado en la

confiabilidad se refiere a un programa de mantenimiento programado diseñado para darse cuenta de las capacidades de confiabilidad inherentes de los equipos" [H. Heap y S. Nowlan, 1978]. Esta definición fue la primera que se le dio a RCM más específicamente aplicada a la industria aeronáutica, pero debido al éxito de esta metodología de mantenimiento fue adaptado y adecuado para cubrir las necesidades de otras industrias, pudiendo definirse como: Filosofía de gestión del mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo se encarga de optimar la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema, tomando en cuenta los posibles efectos que originaran los modos de fallas de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones" [C. Parra, 2008]

6.2.2. Concepto RCM

Dado el éxito de RCM ha llevado a que diferentes procesos que difieren significativamente del original sean llamados según sus defensores como RCM, es por esto que se ha tenido como resultado una creciente demanda internacional por un estándar que aclare y establezca los criterios necesarios para que un proceso efectivamente se le pueda llamar "RCM". Por lo tanto se creó la norma SAE JA 1011 (1999) para describir los criterios mínimos que cualquier proceso debe cumplir para ser llamado RCM, y posteriormente se crea la norma SAE JA 1012 (2002) que intenta detallar y clarificar aún más estos criterios y términos claves de RCM definiéndolo como "RCM es un proceso especifico que se utiliza para identificar las políticas que deben

implementarse para administrar los modos de falla que podrían causar la falla funcional de cualquier activo físico en un contexto operacional dado" [SAE JA 1012, 2002].

RCM es una metodología que se centra en la relación que existe entre la organización y los activos físicos que la componen, es por esto que, se necesita saber qué tipo de elementos físicos existen dentro de la empresa y cuáles de estos deben estar sujetos al proceso de revisión de RCM (J. Moubray, 2004). Para esto RCM propone 7 preguntas básicas a contestar, de las cuales 5 son respondidas a través de la herramienta AMEF y las otras 2 son propias de la aplicación de RCM sobre los activos físicos de la organización (A. Crespo, 2007):

Tabla 1. *7 preguntas claves de RCM*

AMEF	1	¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo asociados a su contexto operacional actual?
	2	¿De qué manera el activo no cumple con sus funciones?
	3	¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
	4	¿Qué pasa cuando sucede cada falla funcional?
	5	¿Cuál es la importancia de cada falla funcional?
Lógica RCM	6	¿Qué se puede hacer para prevenir cada falla funcional?
	7	¿Qué se debe hacer si es que no se puede encontrar una tarea preventiva adecuada?

(Fuente: A. Crespo, 2017)

El análisis de estas 7 preguntas básicas permite que RCM proponga un procedimiento que permita identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, pudiendo identificar estrategias efectivas de

mantenimiento que permitan garantizar el cumplimiento de estándares requeridos por los procesos de producción, algunas características generales de RCM según C. Parra, 2008 son:

1. Herramienta que permite ajustar las acciones de control de fallas (estrategias de mantenimiento) al entorno operacional.

2. Metodología basada en un procedimiento sistemático que permite generar planes óptimos de mantenimiento / produce un cambio cultural.

3. Los resultados de la aplicación del RCM, tendrán su mayor impacto en sistemas complejos con diversidad de modos de falla (ejemplo: equipos rotativos grandes).

4. Maduración: mediado plazo – largo plazo.

6.2.3. Implementación de RCM

La implementación de RCM comienza con la conformación del equipo que realizará RCM para en su fase final, obtener la documentación de un plan de mantenimiento. Tiene como objetivo poder contestar a las 7 preguntas básicas de la metodología, es por esto que, el grupo de trabajo al cual se le encarga su aplicación debe ser especializado y predefinido para cumplir las distintas funciones, según C. Parra, 2008 son los siguientes:

- Ingeniero de Procesos: Visión global del negocio.
- Facilitador: Asesor metodológico.
- Especialista: Experto en área.

- Programador: Visión sistemática de la actividad.
- Mantenedor: Expertos en reparación y mantenimiento.
- Operador: Experto en manejo/operación de sistemas y equipos.

Este equipo de trabajo tiene que ser alineado, coordinado, comprensivo, respetuoso y confiado de los procedimientos que lleva a cabo, los cuales se pueden ver mejor representados en el siguiente proceso de implementación RCM que establece A. Crespo, 2007:

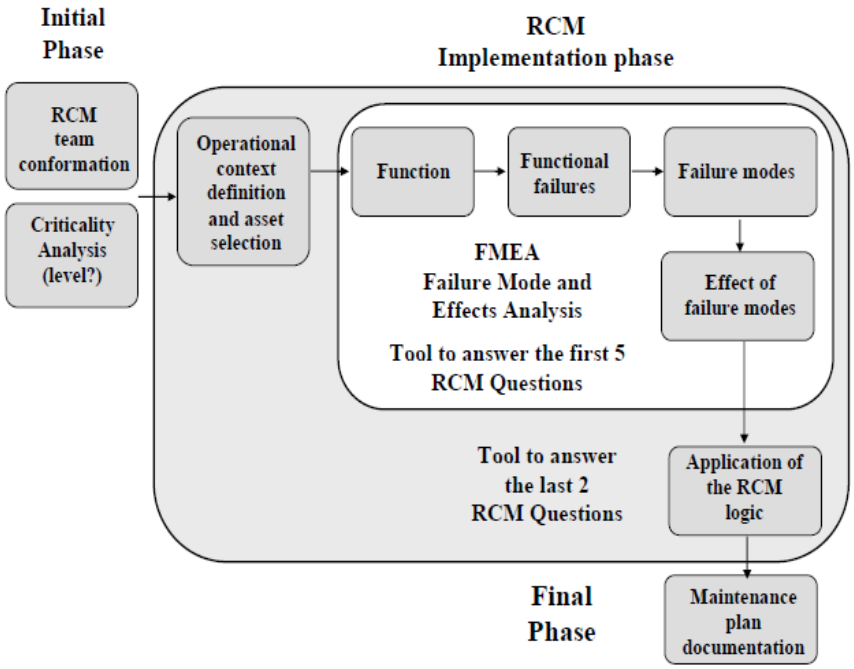


Figura 1. Proceso de implementación de RCM. (Fuente: A. Crespo, 2007)

6.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla – AMEF

6.3.1. Concepto AMEF

AMEF es reconocido como la herramienta más fundamental de la metodología RCM. Debido al enfoque práctico y cualitativo, es la forma de análisis de confiabilidad y riesgo más ampliamente comprendida y aplicada en toda la industria. AMEF se ocupa de la identificación de sus modos de falla, causas y frecuencias de falla (confiabilidad), y los efectos que pueden ocurrir si ocurre una falla específica durante la operación (riesgo) del proceso (A. Crespo, 2007). Este análisis tiene "como objeto identificar los modos de falla que representan un mayor riesgo, para posteriormente seleccionar la mejor tarea de mantenimiento, ya sea preventiva, predictiva, correctiva o en su caso acciones adicionales o complementarias" [J. Aguilar-Otero et al., 2010].

En la siguiente figura, se muestra el diagrama de bloques para la metodología de análisis de modos y efectos de falla:

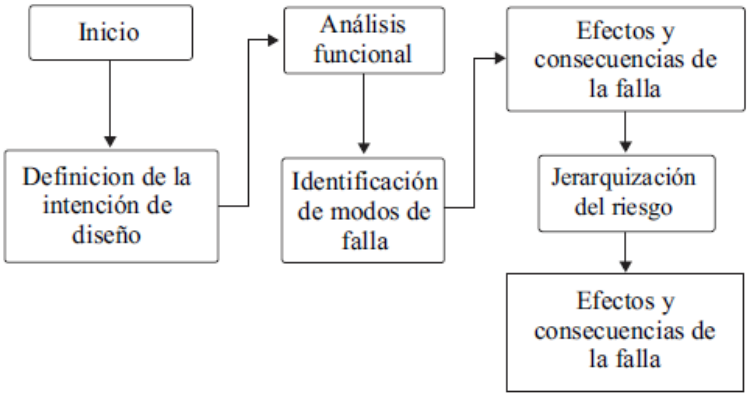


Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología de AMEF (Fuente: A. Aguilar-Otero et al., 2010)

5.3.2. Falla Funcional

“Una falla funcional es definida como la inhabilidad del equipo para mantener un estándar deseado de rendimiento (función)” [A. Crespo, 2007]. Mas detalladamente, “es una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el estándar de ejecución esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña, trayendo como consecuencia que el activo no pueda cumplir con su función o la cumpla de forma ineficiente” [C. Parra, 2008].

La falla funcional puede ser total, es decir, cubre una perdida global de funcionamiento, o también pueden ser situaciones en la que el bien continúa funcionando, pero se desempeña fuera de los limites deseados, por ejemplo, la función primaria de una bomba desde el tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto, esta función podría padecer de las siguientes dos fallas funcionales (J. Moubray, 2004)

- No puede impulsar agua directamente (Falla Total).
- Puede hacerlo, pero a menos de 800 litros por minuto (Falla Parcial).

La falla funcional se puede dividir en tres categorías de severidad, las cuales pueden ser definidas como sigue:

- Falla Catastrófica.
- Falla Degradada.
- Falla Incipiente.

Un ejemplo del análisis AMEF según su función, la descripción de la función y sus fallas funcionales puede verse en la siguiente tabla (A. Crespo, 2007):

Tabla 2. *Ejemplo de AMEF: Fallas funcionales.*

FMEA Item: Heat exchanger without change of phase		
Function	Function description	Functional failure
Primary	- Provide correct heat exchange at a desired rate	Unable to provide any heat /catastrophic
		Provide reduced/excessive heat exchange /degraded
Auxiliary	- Contain cooling and heating fluids	Unable to contain cooling and heating fluids / catastrophic
		Contain partially cooling and heating fluid /degraded
	- Prevent mixing of cooling and heating fluids	Unable to prevent mixing of fluids / catastrophic
		Partial mixing of fluids / incipient
Protective and control	- Control the process	Unable to control the process / catastrophic
	- Prevent damage to heat exchanger and downstream equipment	Unable to prevent damage to heat exchanger equipment / catastrophic
Information	- Condition monitoring	
Interface	- None	

(Fuente: A. Crespo, 2007)

5.3.3. Modo de Falla

"Un modo de falla podemos definirlo como la forma en la que un activo pierde la capacidad de desempeñar su función, o en otras palabras la forma en que un activo falla" [J. Aguilar-Otero, 2010]. Por lo tanto, es la manera en que se observa una falla o el incumplimiento de una de las funciones (M. Rausand, 1998).

Los modos de falla podríamos llamarlos también, como las causas de las fallas funcionales, ya que los modos de falla son las causas físicas que originan la aparición de éstas. Es por esto que, las actividades de mantenimiento originadas desde RCM para prevención, anticipación o corrección de las fallas funcionales, están orientadas a atacar los modos de falla específicos según la falla funcional que origina (cada falla funcional puede tener más de un modo de falla).

El grupo de trabajo RCM debe tener en cuenta que es casi seguro que el nivel de detalle al cual se pueden identificar los modos de fallas será siempre mayor, que el nivel detalle al cual se identifican las funciones y las fallas funcionales de un determinado activo. Por ejemplo, si el sistema constituye el nivel de detalle seleccionado para identificar las funciones y las fallas funcionales, los posibles niveles a los cuales se identificarán los modos de fallas serán: grupos de equipos, equipos individuales o partes de equipos (C. Parra, 2008). Además, el grupo de trabajo tiene que considerar la posibilidad de registrar todos los modos de falla, excluyendo aquellos cuya probabilidad de ocurrencia es sumamente baja, por lo tanto, para registrar los modos de falla se debe tener las siguientes consideraciones:

- Modos de falla asociados a un activo, ocurridas anteriormente en un contexto operacional similar o parecido.
- Modos de falla asociados a un activo, que sin haber ocurrido aún en el actual contexto operacional o en uno similar, tienen una probabilidad de falla razonable (identificada estadísticamente).

- Modos de falla asociados a un activo, cuyos efectos sean severos para la seguridad humana, el ambiente o las operaciones

Un ejemplo del AMEF a nivel de modo de falla con su respectivo MTTF en el caso de tenerlo disponible según la data se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 3. *Ejemplo de AMEF: Modo de falla.*

FMEA Item: Heat exchanger (HE) without change of phase				
Function	Function Description	Functional failure	Failure mode	MTTF months
Primary	- Provide correct heat exchange at a desired rate	Unable to provide any heat /catastrophic	Complete stoppage of fluid	--
			External rupture	--
		Provide reduce/excessive heat exchange /degraded	Partial reduction in fluid flow	--
			Partial external rupture	48
			Plugged	--
Auxiliary	- Contain cooling and heating fluids	Unable to contain cooling and heating fluids / catastrophic	External rupture	48
		Contain partially cooling and heating fluid /degraded	Partial external rupture	--
	- Prevent mixing of cooling and heating fluids	Unable to prevent mixing of fluids / catastrophic	Internal rupture	28
		Mixing partial of fluids / incipient	Partial internal rupture	18
Protective and control	- Control the process	Unable to control the process / catastrophic	Control system fail	6
	- Prevent damage to HE and downstream equipment	Unable to prevent damage to heat exchanger equipment / catastrophic	Support structure fails	72
Information	- Condition monitoring			
Interface	- None			

(Fuente: A. Crespo, 2007)

5.3.4. Efectos de la Falla

"Los efectos de las fallas describen que sucede cuando se presenta un modo de falla" [J. Moubray, 2004]. Esta descripción de lo sucedido dada la ocurrencia de un modo de falla son los tiempos de inactividad, los efectos en la calidad del producto, evidencia que la falla ha ocurrido y amenazas a la seguridad y el ambiente. Además, la descripción de estos efectos debería incluir toda la información necesaria para soportar la evaluación de las consecuencias de la falla (A. Crespo, 2007) – Los efectos de las fallas no son lo mismo que consecuencias de las fallas dado que el efecto de la falla responde a la pregunta "¿Qué sucede?", mientras que la consecuencia responde a "¿Cómo afecta?" (J. Moubray, 2004) – es por esto que las descripciones de los efectos de la falla deben registrar los siguiente:

- Evidencias (si es que hay) que la falla ha ocurrido.
- Amenazas (si es que hay) para la seguridad y el ambiente.
- Efectos (si es que hay) en la producción u operación.
- Daños físicos (si es que hay) causado por la falla.
- Reparaciones necesarias para corregir los efectos de la falla.

Los posibles efectos que provocara cada modo de falla deberán ser analizados por el grupo de trabajo de RCM antes mencionado, para decidir si la ocurrencia de cada modo de falla será evidente o no para el personal que labora dentro del contexto operacional.

Un ejemplo del AMEF a nivel de los efectos del modo de falla se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 4. Ejemplo de AMEF: Efectos de modo de falla.

FMEA Item: Heat exchanger without change of phase				
Function type and description	Functional failure	Failure mode	MTTF months	Effects of failure modes
Primary: - Provide correct heat exchange at a desired rate	Unable to provide any heat /catastrophic	Complete stoppage of fluid	--	Total loss of heat exchange /this failure has operational consequences
		External rupture	--	Total loss of heat exchange/this failure could have safety and environmental consequences
	Provide reduce/excessive heat exchange /degraded	Partial reduction in fluid flow	--	Partial loss of heat/ operational consequences
		Partial external rupture	48	Partial loss of heat/ operational consequences
		Plugged	--	Partial loss of heat / operational consequences
Auxiliary: - Contain cooling and heating fluids	Unable to contain cooling and heating fluids / catastrophic	External rupture	48	Major loss of process fluid to atmosphere /this failure could have safety and environmental consequences
	Contain partially cooling and heating fluid /degraded	Partial external rupture	--	Partial loss of process fluid to atmosphere/ safety and environmental consequences
Auxiliary: - Prevent mixing of cooling and heating fluids	Unable to prevent mixing of fluids / catastrophic	Internal rupture	28	Major leakage between media/operational consequences
	Mixing partial of fluids / incipient	Partial internal rupture	18	Leakage between media/ operational consequences

(Fuente: A. Crespo, 2007)

5.3.5. Consecuencias de la Falla

Las consecuencias de la falla son: “Los efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple (evidencia de falla, en la seguridad, en el ambiente, en la capacidad de operación, en los costos de reparación directos o indirectos)” [SAE JA1012, 2002]. Notar la diferencia anteriormente expuesta entre efectos y consecuencias de la falla, “para el caso de las consecuencias, estas son referidas a los impactos derivados de la falla derivada en los diversos receptores de interés [J. Aguilar-Otero, 2010]. Estos impactos derivados de la falla se establecen como el impacto que cualquier modo de falla puede tener sobre la organización, lo cual dependerá de los siguientes factores (C. Parra, 2008):

- Del contexto operacional donde trabaje el activo.
- Del estándar de ejecución deseado, asociado a una determinada función.
- De los efectos y consecuencias físicas que puede provocar la ocurrencia de cada modo de falla

La combinación de estos tres factores mencionados hace que cada modo de falla tenga una forma característica de impactar dando respuesta a cómo y cuánto importa cada falla, la razón de esto es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlos y sugiere con que esfuerzo debemos tratar de encontrarla.

Si una falla tiene consecuencias significativas, es importante tratar de prevenirlas, de lo contrario si las consecuencias no son significativas, entonces no merece la pena hacer cualquier tipo de mantenimiento sistemático que no sea el de rutinas básicas, es por

esto que las consecuencias de las fallas van directamente relacionadas con la selección de la política de mantenimiento utilizada para cada equipo (J. Moubray, 2004).

RCM clasifica las consecuencias de las fallas en cuatro grupos (C. Parra, 2008):

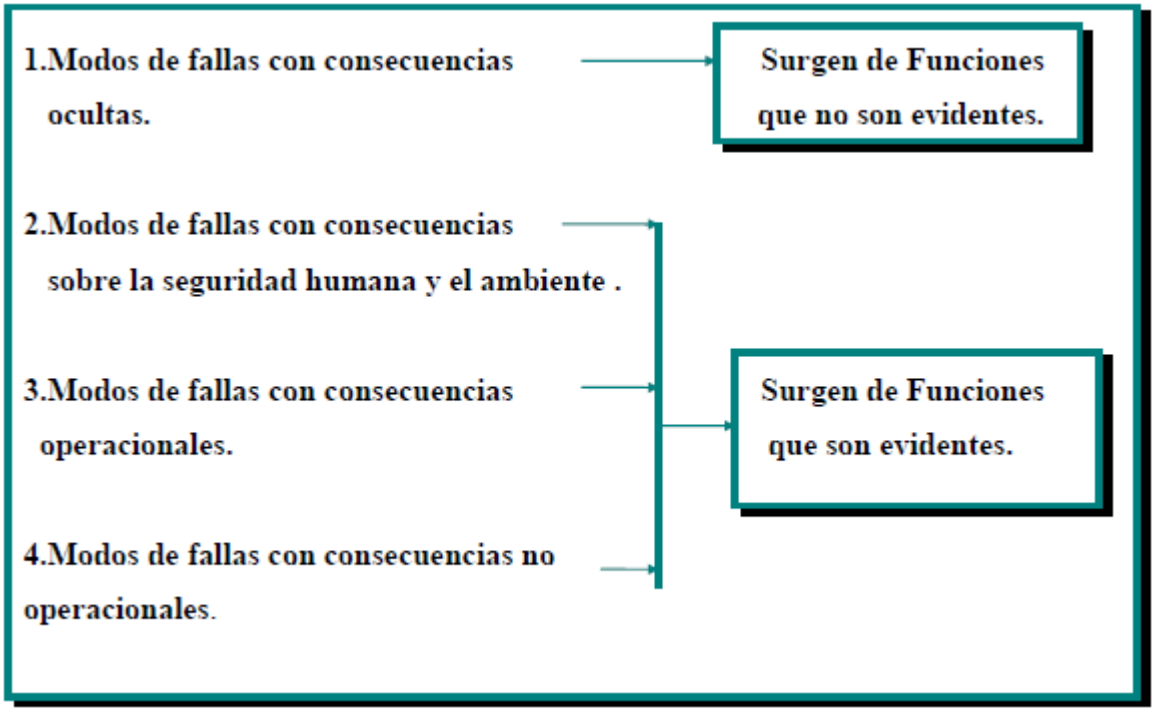


Figura 3. Categorías de las consecuencias de los modos de falla. (Fuente: C. Parra, 2008)

5.4 Políticas de Mantenimiento

Debido a la dimensión, complejidad y relevancia económica del mantenimiento hoy en día, es que se concluye el deber de establecer alineamientos y principios claros a través de un modelo que lo rija. Es por esto que, una enorme cantidad de enfoques de modelos de mantenimiento han sido desarrollados para la optimización y gestión de este según el contexto tecnológico. Usualmente estos enfoques son divididos en dos grupos principales: Mantenimiento Correctivo (CM) y Mantenimiento programado. En (E. Zio, 2013) se divide

el mantenimiento programado entre el Mantenimiento Preventivo (PM), Mantenimiento según Condición (CBM) y Mantenimiento Predictivo (PrM). Explicando su comportamiento como sigue:

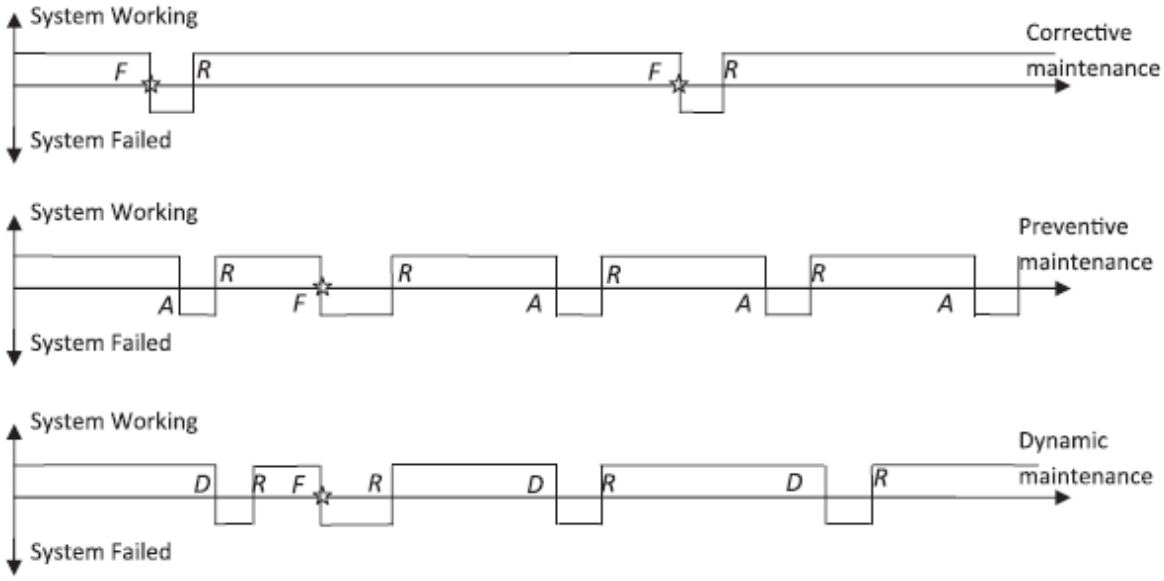


Figura 4. Sinóptico de las políticas de mantenimiento. (Fuente: E. Zio, 2013)

5.4.1. Mantenimiento Correctivo (CM)

El mantenimiento correctivo es el "mantenimiento llevado a cabo después de la detección de la falla para efectos de restauración" (ISO 14224, 2016). Para los sistemas que están bajo la estrategia de CM, los componentes son operados hasta la falla por lo que necesita de acciones de renovación o reparación para ser desarrolladas. "El CM es el enfoque más antiguo para mantenimiento y hoy en día todavía se adopta en algunas industrias, especialmente para equipos que no son críticos para la seguridad ni cruciales

para el rendimiento de producción de la planta, y cuyos repuestos están fácilmente disponibles y no son caros" (E. Zio, 2013)

5.4.2. Mantenimiento Preventivo (PM)

El mantenimiento preventivo es el "mantenimiento llevado a cabo para mitigar la degradación y reducción de la probabilidad de falla" (ISO 14224, 2016). Esta acción se lleva a cabo a través de un mantenimiento cíclico según una edad de reemplazo, esto debido a que el "PM abarca todas las acciones realizadas en un intento de retener un ítem en condiciones específicas al proporcionar inspección sistemática, detección y prevención de fallas incipientes" (E. Zio, 2013). Este mantenimiento preventivo tuvo sus primeros estudios por el año 1960, por lo tanto, desde aquellos años que una enorme cantidad de modelos y métodos de optimización han sido introducidos con el fin de reducir las fallas, por razones de seguridad y apagones no programados por razones económicas.

5.4.3. Mantenimiento según condición (CBM)

El mantenimiento según condición es "el mantenimiento preventivo basado en la evaluación de la condición física, esta evaluación de condición puede ser por observación del operador, conducido de acuerdo con un cronograma, o por monitoreo de condición de los parámetros del sistema" (ISO 14224, 2016). Este monitoreo permite una inspección del tiempo de vida del activo a través de la revisión de parámetros como la vibración, la temperatura, la lubricación, contaminación entre otros factores. "La motivación del CBM es que el 99% de las fallas de los equipos sean precedida por

ciertos signos, condiciones o indicaciones de que una falla va a ocurrir. Por lo tanto, CBM es necesario para una mejor gestión de la salud del equipo, para costos del ciclo de vida más bajo, para evitar fallas catastróficas etc.” (R. Ahmad, 2012).

5.4.4. Mantenimiento Predictivo (PrM):

El mantenimiento predictivo es “el mantenimiento basado en la predicción de la futura condición de un ítem estimado o calculado de un conjunto o definido de información histórica y conocidos parámetros operaciones futuros” (ISO 14224, 2016). Este mantenimiento es uno de los últimos principios y lineamientos a seguir, es comúnmente conocido como la mejora del mantenimiento según condición, ya que si bien mantiene según la condición en la que se encuentre el activo, es una actualización, ya que el conocimiento del actual estado de degradación de los componentes (diagnóstico) es complementado con una predicción de su futuro comportamiento (…) la estimación precisas provee tiempo para oportunamente planear y preparar la reparación o el reemplazo del componente” (E. Zio, 2013).

7. METODOLOGÍA

7.1. Justificación de la Propuesta Metodológica

La propuesta metodología que se presenta es una ayuda para la gestión del mantenimiento desde la perspectiva de efectividad de la ejecución de las intervenciones de mantenimiento y la adherencia con el plan de mantenimiento según la política preventiva o a la falla que se le aplique a cada actividad.

El análisis de efectividad que realiza esta metodología se basa en la comparación de una expectativa previamente generada para la adherencia y los resultados de la aplicación de las distintas políticas de mantenimiento, y la realidad al ejecutar el plan de mantenimiento. Esta comparación se cuantifica en cuatro indicadores principales de efectividad para cada una de las políticas de mantenimiento descritas en (E. Zio, 2013) Mantenimiento Correctivo (CM), Mantenimiento Preventivo (PM), Mantenimiento según Condición (CBM) y el Mantenimiento Predictivo (PrM).

La herramienta desagrega los indicadores de efectividad según una perspectiva de eficiencia técnica, la cual involucra las expectativas que se tienen de la aplicación de cada una de las políticas de mantenimiento según indicadores propios de cada política, la otras dos perspectivas que se desagregan en la herramienta son netamente de costos, la primera referida a eficiencia económica de los costos de intervención de cada modo de falla y por lo tanto a cada actividad de mantenimiento (costo directo), la segunda es referida al costo de oportunidad debido al costo de ineficiencia que representa el tiempo fuera de servicio por mes el mantenimiento programado y a la falla.

Además, la herramienta otorga flexibilidad en el resultado de los indicadores de mantenimiento debido a que, para la obtención de la eficiencia técnica se establecen ponderaciones para cada indicador, ponderación que dependerá de los objetivos que tenga el plan de mantenimiento a evaluar, otorgándole a cada decisión una interpretación en importancia con un valor numérico que logra la cuantificación de esta mirada subjetiva de cada indicador de las políticas de mantenimiento. Esta ponderación para la eficiencia económica, se logra a través de la utilización de parte del Proceso de Análisis Jerárquico (Saaty, 1980) que toma en cuenta los criterios de ponderación esperados por actividades de mantenimiento utilizadas en cada política de mantenimiento y los costos directos que son representados en los costos de mano de obra, repuestos, materiales y servicios que son la cuantificación de las expectativas establecidas por la gestión del mantenimiento.

La visualización que otorga esta herramienta está representada por matrices de cobertura que determinan los costos esperados utilizados para la intervención de los modos de falla según actividad, además utiliza herramientas gráficas a nivel de modos de falla, permitiendo la identificación de la cobertura que se les otorga a cada uno según costo y tiempo fuera de servicio. Para el análisis grafico de los indicadores se evidencia la influencia de cada una de las tres perspectivas o criterios utilizados para la obtención de los indicadores finales de efectividad y un diagnóstico de la eficiencia y efectividad de cada política de mantenimiento utilizada.

7.2. Desarrollo de la Propuesta

7.2.1. Presentación de la Herramienta

Esta herramienta de medición de la efectividad de un plan de mantenimiento según las políticas de mantenimiento aplicadas necesita de cierta información de entrada para poder realizar los cálculos de los indicadores por actividad, los indicadores de efectividad y las herramientas gráficas. La serie de entradas necesarias son la data de los costos de mantenimiento de los modos de falla, data general de las actividades de mantenimiento, data de los tiempos de las actividades de mantenimiento, data de las políticas de mantenimiento aplicadas y la información de la gestión de mantenimiento.

Ya con la información de entrada coleccionada, la herramienta calculará los costos directos (costo de repuestos, materiales y servicios), con el costo de mano de obra y los costos de ineficiencia (asumido por el tiempo fuera de servicio), tanto de la expectativa generada por la gestión de mantenimiento como de lo ocurrido en la realidad del plan de mantenimiento.

Luego de obtener los costos por actividad, se calculan los indicadores porcentuales por actividad que miden la variación porcentual entre los valores de los indicadores por políticas, los costos directos y costo de ineficiencia. Al mismo tiempo, la herramienta calcula las ponderaciones que tendrán los indicadores porcentuales por actividad en los indicadores finales de efectividad por política, esto gracias a la evaluación subjetiva de la gestión de mantenimiento de la eficacia y la aplicación de matrices pareadas a la eficiencia y a la ineficiencia.

Posteriormente, se procede al cálculo de los indicadores de efectividad de cada política de mantenimiento, el cual viene por 3 indicadores principales calculados según los indicadores por actividad y sus ponderaciones anteriormente mencionada, los cuales son la efectividad técnica, la eficiencia económica y el costo de oportunidad, representados gráficamente por arboles de valor que construyen los indicadores finales.

Finalmente, se cuenta con herramientas gráficas que permiten una mayor visualización de las distintas conclusiones numéricas a la que llega la metodología, la primera son las matrices de cobertura de los tiempos fuera de servicios y costos directos esperados, reales y su variación por modo de falla y actividad que lo atiende. La segunda es el gráfico de burbujas que representa los costos directos y tiempos fuera de servicios de los modos de falla según mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. La tercera es el gráfico de dispersión tanto de los indicadores principales de efectividad filtrados según política como de los indicadores principales de la desviación de la efectividad del plan.

La herramienta, para concluir, ofrece un control del plan pidiendo medir el nivel de cumplimiento de la expectativa acerca de la aplicación del plan de mantenimiento según política y actividad de mantenimiento, entregando los porcentajes de cumplimiento pudiendo determinar las causas acordes al análisis y propuestas de mejora para una mayor adherencia al plan que obtenga mejores resultados.

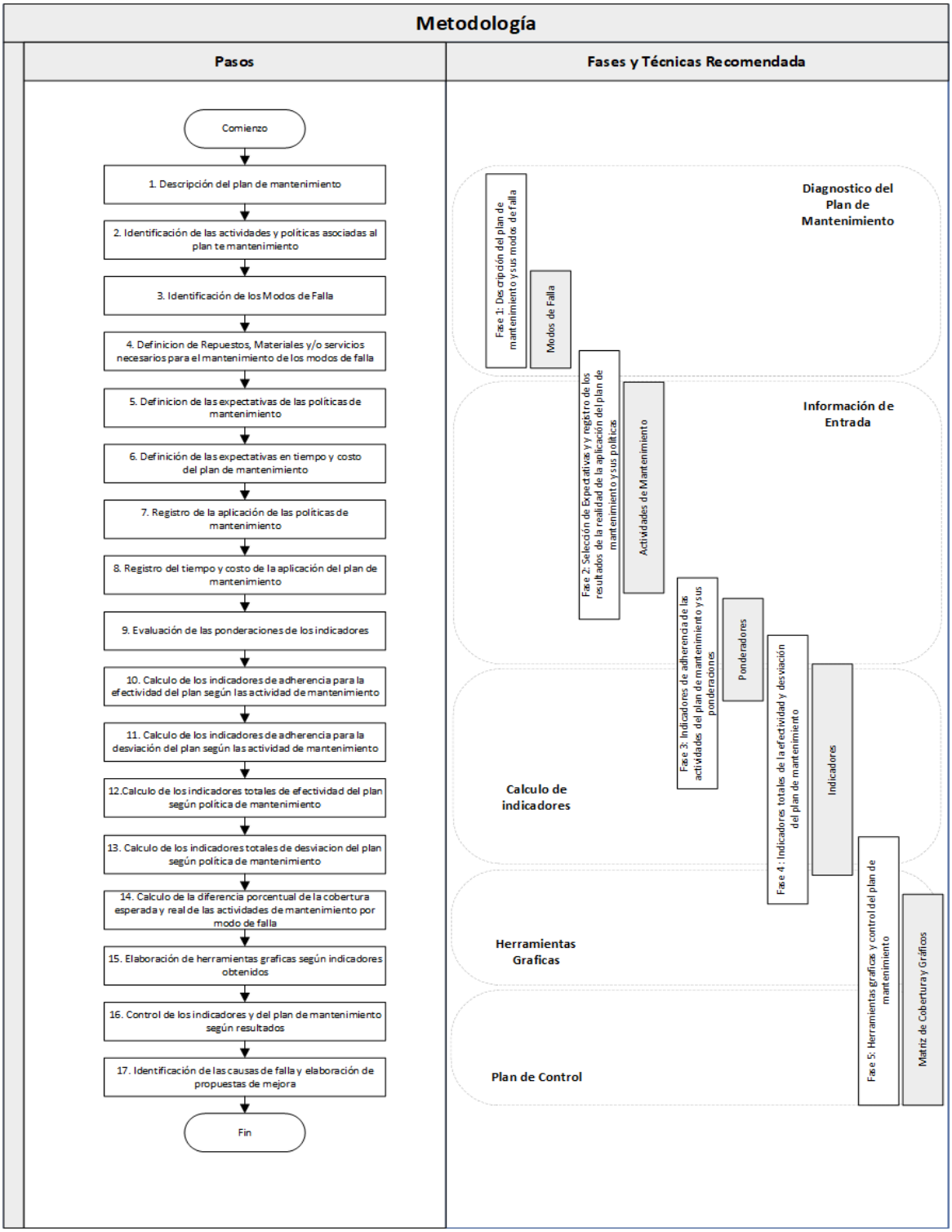


Figura 5. Metodología propuesta e integración entre las diferentes fases. (Fuente: Elaboración propia)

.

7.2.2. Diagnóstico del Plan de Mantenimiento

Fase 1: Descripción del plan de mantenimiento y sus modos de falla

Esta primera fase de la metodología requiere del cumplimiento de los primeros 4 pasos de la figura 5, haciendo un diagnóstico completo del plan de mantenimiento desde la descripción general de éste, pasando por la descripción de actividades de mantenimiento tanto preventivas como correctivas, y terminando por la descripción de la clasificación de las políticas de mantenimiento utilizadas en el plan.

Además, esta fase de la metodología requiere variada información de los modos de falla que ataca el plan de mantenimiento, desde el elemento y verbo que lo definen hasta los costos de su mantenimiento

Información del plan de mantenimiento

La descripción general del plan de mantenimiento consta principalmente del área en la cual se desarrollará el plan, el sistema y subsistema que necesita de mantenimiento, los equipos involucrados y una breve descripción general de las funciones del plan de mantenimiento.

Tabla 5. *Ejemplo de la descripción general del plan de mantenimiento.*

Plan de Mantenimiento	Área	Climatización
	Sistema	Sistema de impulsión de aire
	Subsistema	Ventilador de impulsión radial TPF50C-4-4000W
	Equipo(s)	Unidad Manejadora de Aire CDT G.7 PASILLO N°7
	Descripción	Asegurar una operatividad y funcionamiento de 364 días en el año del ventilador de impulsión mediante inspecciones, mediciones, monitoreos y mantenimientos preventivos. Medir y controlar parámetros de operatividad y funcionamiento del equipo mediante actividades descritas. Realizar informes

		técnicos de desviaciones encontradas, como también usar esta información para alimentar el historial de eventos. Considerar la adquisición de repuestos para mantenimientos correctivos según la necesidad que se presente.

(Fuente: Elaboración Propia)

Las actividades de mantenimiento del plan se diferencian entre actividades de mantenimiento correctivas y preventivas, las cuales requieren del número de actividad, el nombre de esta y una breve descripción de la función que realiza esta actividad.

Tabla 6. *Ejemplo de la descripción de las actividades de mantenimiento preventivas.*

	N° Actividad	Nombre Actividad	Descripción de Actividad
Actividades de Mantenimiento Preventivas	1	Limpieza del variador de frecuencia	Limpieza del variador de frecuencia y sus componentes
	3	Inspección de rodete	Verificación del estado de suciedad, circulación del aire libre de obstrucciones, estado de desgaste del rodete soldaduras y ausencia de ruidos extraños
	4	Reapriete de sujeciones, pernos	Reapriete de tornillería de soporte de motor, base, conjunto motor-rodete
	5	Medición de temperatura del motor	Medición de temperatura en distintos puntos del motor con pirómetro
	7	Inspección de motor	Verificación de ausencia de vibraciones excesivas, ruidos extraños, estado de desgaste de la carcasa
	8	Medición de tensión del variador de frecuencia	Medición de tensión eléctrica del variador de frecuencia con tester
	9	Limpieza de rodete	Limpieza programada del rodete y sus componentes

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 7. *Ejemplo de la descripción de las actividades de mantenimiento correctivas.*

	N° Actividad	Nombre Actividad	Descripción de Actividad
Actividades de Mantenimiento Correctivas	2	Cambio de rodete	Cuando la aleta del rodete se deforma o se desgasta, también en caso de que las costuras de sus soldaduras sufran desgaste por suciedad
	6	Cambio de sujeciones	Cuando algún tornillo de sujeción se desgasta por acción natural o fatiga de material
	10	Cambio de motor	Cuando componentes del motor se queman por variaciones bruscas en el voltaje, corriente o entra en contacto con altos niveles de humedad

(Fuente: Elaboración Propia)

El plan de mantenimiento tiene diferentes políticas de mantenimiento que lo componen, de las cuales se requiere el número de política de mantenimiento, el nombre y una breve descripción de ésta.

Tabla 8. *Ejemplo de clasificación de las políticas de mantenimiento.*

	N° Política	Nombre Política	Descripción de Política
Políticas de Mantenimiento	1	CM	Operación a la falla sin ninguna actividad de mantenimiento preventivo
	2	PM	Mantenimiento basado en un modelo dependiente de la edad, intentando determinar los intervalos óptimos de mantenimiento
	3	CBM	Mantenimiento basado en la medición constante de la degradación de la falla a través de la medición de la profundidad de la grieta periódicamente.
	4	PrM	Mantenimiento basado en el conocimiento actual del estado de degradación del componente, complementado con la predicción de su futuro comportamiento

(Fuente: Elaboración Propia)

Información de los modos de falla:

La información necesaria de los modos de falla es el número del modo de falla, el elemento que causa la falla y el verbo que evidencia la falla.

Tabla 9. *Ejemplo de la información general requerida de los modos de falla.*

Modos de Falla	Elemento	Verbo	Modo de Falla
MF1	Variador de Frecuencia	Sucio	Variador de Frecuencia Sucio
MF2	Rodete	Desgastado	Rodete Desgastado
MF3	Rodete	Deforme	Rodete Deforme
MF4	Rodete	Desbalanceado	Rodete Desbalanceado
MF5	Sujeciones	Sueltas	Sujeciones Sueltas
MF6	Sujeciones	Vibran excesivamente	Sujeciones Vibran excesivamente
MF7	Motor	Sobrecalentado	Motor Sobrecalentado
MF8	Sujeciones	Desgastadas	Sujeciones Desgastadas
MF9	Motor	Vibra excesivamente	Motor Vibra excesivamente
MF10	Variador de Frecuencia	Sobrecalentado	Variador de Frecuencia Sobrecalentado
MF11	Variador de Frecuencia	Se dispara	Variador de Frecuencia Se dispara
MF12	Rodete	Obstruido	Rodete Obstruido
MF13	Rodete	Sucio	Rodete Sucio
MF14	Motor	Sucio	Motor Sucio
MF15	Motor	Se detiene	Motor Se detiene

(Fuente: Elaboración Propia)

Información de los costos de intervención de los modos de falla:

Para cada modo de falla se requiere la información de los costos del mantenimiento de estos, por lo tanto, información de los repuestos necesarios y sus costos, los materiales necesarios y sus costos, y los servicios externos necesarios y sus costos:

NR: Número de repuestos necesarios para la intervención de los modos de falla.

R: Conjunto de repuestos.

R_r: Costo repuesto r. $r = 1..NR$

$RDet_{r,j}$: Efecto del repuesto r sobre el modo de falla j. $\forall r \in R, \forall j \in MF$

$$RDet_{r,j} = \begin{cases} 1 & \text{Repuesto r es necesario para intervenir el modo de falla j} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

NM: Número de materiales necesarios para la intervención de los modos de falla.

M: Conjunto de materiales.

M_m: Costo material m. $m = 1..NM$

$MDet_{m,j}$: Efecto del material m sobre el modo de falla j. $\forall m \in M, \forall j \in MF$

$$MDet_{m,j} = \begin{cases} 1 & \text{Material m es necesario para intervenir el modo de falla j} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

NS: Número de servicios externos necesarios para la intervención de los modos de falla.

S: Conjunto de servicios

S_s: Costo por servicio s. $s = 1..NS$

$SDet_{s,j}$: Efecto del servicio s sobre el modo de falla j. $\forall s \in S, \forall j \in MF$

$$SDet_{s,j} = \begin{cases} 1 & \text{Servicio s es necesario para intervenir el modo de falla j} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

Tabla 10. *Información general de los costos de mantenimiento de los modos de falla.*

Numero de modo de falla	**Estado del repuesto *r* durante el mantenimiento del modo de falla j**	**Estado del material *m* durante el mantenimiento del modo de falla j**	**Estado del servicio *s* durante el mantenimiento del modo de falla j**
$j = 1$	$RDet_{s,1}$	$MDet_{s,1}$	$SDet_{s,1}$

$j = 2$	$RDet_{s,2}$	$MDet_{s,2}$	$SDet_{s,2}$
…	…	…	…
$j = NMF$	$RDet_{s,NMF}$	$MDet_{s,NMF}$	$SDet_{s,NMF}$

(Fuente: Elaboración Propia)

7.2.3. Información de Entrada

Fase 2: Identificación de las expectativas y registro de los resultados de la realidad de la aplicación del plan de mantenimiento y sus políticas

Esta fase de la metodología requiere del conocimiento de todas las actividades de mantenimiento y las políticas que contienen el plan de mantenimiento. Esta fase es muy importante debido a que identifica las expectativas del plan de mantenimiento en término de las políticas de mantenimiento, los costos y tiempo de ejecución, además del registro de la realidad de aplicación de estas actividades de mantenimiento.

Información general de las actividades de mantenimiento:

NA: Número de actividades de mantenimiento.

A: Conjunto de las actividades de mantenimiento.

P: Conjunto de políticas del plan de mantenimiento.

P_p: Política de mantenimiento p. $p = CM, PM, CBM, PrM$

PA_i: Política de la actividad de mantenimiento $i = 1..NA$

$$PA_i = \begin{cases} CM & \text{Actividad i es un mantenimiento correctivo} \\ PM & \text{Actividad i es un mantenimiento preventivo} \\ CBM & \text{Actividad i es un mantenimiento segun condicion} \\ PrM & \text{Actividad i es un mantenimiento predictivo} \end{cases}$$

A^{CM} = Conjunto de actividades de mantenimiento correctivo. $\forall i: PA_i = CM$

A^{PM} = Conjunto de actividades de mantenimiento preventivo. $\forall i: PA_i = PM$

A^{CBM} = Conjunto de actividades de mantenimiento según condición. $\forall i: PA_i = CBM$

A^{PrM} = Conjunto de actividades de mantenimiento predictivo. $\forall i: PA_i = PrM$

$$A^{CM} \cup A^{PM} \cup A^{CBM} \cup A^{PrM} = A$$

Det_i: Efecto de la actividad i sobre el sistema. $\forall i \in A$

$$Det_i = \begin{cases} 1 & \text{Actividad i requiere detención del sistema.} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

Información de las políticas de mantenimiento:

La información obtenida de la aplicación de las políticas de mantenimiento va a ser dependiente de las políticas previamente identificadas en la descripción del plan de mantenimiento, por lo tanto, los siguientes inputs son los indicadores del Mantenimiento Correctivo (CM), Mantenimiento Preventivo (PM), Mantenimiento según Condición

(CBM) y Mantenimiento Predictivo (PrM) (E. Zio, 2013), los cuales son definidos según la expectativa del plan y la realidad de ejecución de este:

Información del mantenimiento correctivo (CM):

La información necesaria del mantenimiento correctivo para la identificación de la expectativa por política de mantenimiento son los siguientes:

Tcm_i^{ex}: Tiempo promedio de reacción a la falla esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$

$MTTRcm_i^{ex}$: Tiempo promedio de reemplazo a la falla esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$.

Fcm_i^{ex}: Frecuencia de atención a la falla esperada de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$. $\forall i \in A^{CM}$

La información necesaria del mantenimiento correctivo para el registro de la aplicación real del plan por política de mantenimiento son los siguientes:

Tcm_i^{re}: Tiempo promedio de reacción a la falla real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$

$MTTRcm_i^{re}$: Tiempo promedio de reemplazo a la falla real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$.

Fcm_i^{re}: Frecuencia de atención a la falla real de la actividad i $(fallas\ reales/año)$. $\forall i \in A^{CM}$

Tabla 11. *Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento correctivo.*

Indicadores básicos de la política correctiva [CM] esperados	**Información para la identificación de la expectativa del plan**	**Indicadores básicos de la política correctiva [CM] reales**	**Información del registro de aplicación real del plan**
Tcm_i^{ex}	Tiempo promedio de reacción a la falla esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$	Tcm_i^{re}	Tiempo promedio de reacción a la falla real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$
$MTTRcm_i^{ex}$	Tiempo promedio de reemplazo a la falla esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$.	$MTTRcm_i^{re}$	Tiempo promedio de reemplazo a la falla real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{CM}$.
Fcm_i^{ex}:	Frecuencia de atención a la falla esperada de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$. $\forall i \in A^{CM}$	Fcm_i^{re}:	Frecuencia de atención a la falla real de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$. $\forall i \in A^{CM}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Información del mantenimiento preventivo (PM):

La información necesaria del mantenimiento preventivo para la identificación de la expectativa por política de mantenimiento son los siguientes:

Tpm_i^{ex}: Fallas no controladas esperadas de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$ $\forall i \in A^{PM}$

$MTTRpm_i^{ex}$: Tiempo promedio de reparación por el PM esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{PM}$

Fpm_i^{ex}: Frecuencia de aplicación del PM esperada a la actividad i $(OT/año)$. $\forall i \in A^{PM}$

La información necesaria del mantenimiento preventivo para el registro de la aplicación real del plan por política de mantenimiento son los siguientes:

Tpm_i^{re}: Fallas no controladas reales de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$ $\forall i \in A^{PM}$

$MTTRpm_i^{re}$: Tiempo promedio de reparación por el PM real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{PM}$

Fpm_i^{re}: Frecuencia de aplicación del PM real a la actividad i $(OT/año)$. $\forall i \in A^{PM}$

Tabla 12. *Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento preventivo.*

Indicadores básicos de la política preventiva [PM] esperados	**Información para la identificación de la expectativa del plan**	**Indicadores básicos de la política preventiva [PM] reales**	**Información del registro de aplicación real del plan**
Tpm_i^{ex}:	Fallas no controladas esperadas de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$ $\forall i \in A^{PM}$	Tpm_i^{re}:	Fallas no controladas reales de la actividad i $(fallas\ esperadas/año)$ $\forall i \in A^{PM}$
$MTTRpm_i^{ex}$:	Tiempo promedio de reparación por el PM esperado de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{PM}$	$MTTRpm_i^{re}$	Tiempo promedio de reparación por el PM real de la actividad i $(minutos/OT)$. $\forall i \in A^{PM}$

Fpm_i^{ex}:	Frecuencia de aplicación del PM esperada a la actividad i (OT/año). $\forall i \in A^{PM}$	Fpm_i^{re}:	Frecuencia de aplicación del PM real a la actividad i (OT/año). $\forall i \in A^{PM}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Información del mantenimiento según condición (CBM):

La información necesaria del mantenimiento según condición para la identificación de la expectativa por política de mantenimiento son los siguientes:

$Tcbm_i^{ex}$: Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo esperado de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$

$MTTRcbm_i^{ex}$: Tiempo promedio de reparación por el CBM esperado de la actividad i (minutos/OT) $\forall i \in A^{CBM}$

$Fcbm_i^{ex}$: Frecuencia de aplicación del CBM esperada a la actividad i $\left(\frac{OT}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$

La información necesaria del mantenimiento según condición para el registro de la aplicación real del plan por política de mantenimiento son los siguientes:

$Tcbm_i^{re}$: Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo real de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$

$MTTRcbm_i^{re}$: Tiempo promedio de reparación por el CBM real de la actividad i (minutos/OT) $\forall i \in A^{CBM}$

$Fcbm_i^{re}$: Frecuencia de aplicación del CBM real a la actividad i $\left(\frac{OT}{año}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$

Tabla 13. Información de los indicadores básicos y reales del mantenimiento según condición.

Indicadores básicos de la política según condición [CBM] esperados	**Información para la identificación de la expectativa del plan**	**Indicadores básicos de la política según condición [CBM] reales**	**Información del registro de aplicación real del plan**
$Tcbm_i^{ex}$	Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo esperado de la actividad i $\left(\frac{avisos}{año}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$	$Tcbm_i^{re}$	Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo real de la actividad i $\left(\frac{avisos}{año}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$
$MTTRcbm_i^{ex}$	Tiempo promedio de reparación por el CBM esperado de la actividad i (minutos/OT) $\forall i \in A^{CBM}$	$MTTRcbm_i^{re}$	Tiempo promedio de reparación por el CBM real de la actividad i (minutos/OT) $\forall i \in A^{CBM}$
$Fcbm_i^{ex}$:	Frecuencia de aplicación del CBM esperada a la actividad i $\left(\frac{OT}{año}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$	$Fcbm_i^{re}$:	Frecuencia de aplicación del CBM real a la actividad i $\left(\frac{OT}{año}\right)$. $\forall i \in A^{CBM}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Información del mantenimiento predictivo (PrM):

La información necesaria del mantenimiento predictivo para la identificación de la expectativa por política de mantenimiento son los siguientes:

$Tprm_i^{ex}$: Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo esperado de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{PrM}$

$MTTRprm_i^{ex}$: Tiempo promedio de reparación por el CBM a la actividad i (minutos/OT) . $\forall i \in A^{PrM}$

$Fprm_i^{ex}$: Frecuencia de aplicación del PrM esperado a la actividad i $\left(\frac{\text{OT}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{PrM}$

La información necesaria del mantenimiento predictivo para el registro de la aplicación real del plan por política de mantenimiento son los siguientes:

$Tprm_i^{re}$: Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo real de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{PrM}$

$MTTRprm_i^{re}$: Tiempo promedio de reparación por el PrM real a la actividad i (minutos/OT) . $\forall i \in A^{PrM}$

$Fprm_i^{re}$: Frecuencia de aplicación del PrM real a la actividad i $\left(\frac{\text{OT}}{\text{año}}\right)$. $\forall i \in A^{PrM}$

Tabla 14. Información de los indicadores básicos esperados y reales del mantenimiento predictivo.

Indicadores básicos de la política predictiva [PrM]	**Información para la identificación de la expectativa del plan**	**Indicadores básicos de la política predictiva**	**Información del registro de aplicación real del plan**

esperados		**[PrM] reales**	
Tprm_i^{ex}	Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo esperado de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right). \forall i \in A^{PrM}$	Tprm_i^{re}	Frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo real de la actividad i $\left(\frac{\text{avisos}}{\text{año}}\right). \forall i \in A^{PrM}$
$\mathrm{MTTRprm}_i^{ex}$	Tiempo promedio de reparación por el PrM a la actividad i $(\text{minutos/OT})\ . \forall i \in A^{PrM}$	$\mathrm{MTTRprm}_i^{re}$	Tiempo promedio de reparación por el PrM real a la actividad i $(\text{minutos/OT})\ . \forall i \in A^{PrM}$
Fprm_i^{ex}:	Frecuencia de aplicación del PrM esperada la actividad i $\left(\frac{\text{OT}}{\text{año}}\right). \forall i \in A^{PrM}$	Fprm_i^{re}:	Frecuencia de aplicación del PrM real a la actividad i $\left(\frac{\text{OT}}{\text{año}}\right). \forall i \in A^{PrM}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Información del costo de mano de obra por actividad de mantenimiento:

La información requerida acerca del costo de mano de obra por actividad de mantenimiento es la siguiente:

NEsp: Número especialidades posibles de la mano de obra

Esp: Conjunto de especialidades posibles de la mano de obra

Esp^e: Especialidad $e = 1..\mathrm{NEsp}$

$HEsp_i^e$: Hora hombre necesarias de la especialidad e para el mantenimiento en la actividad i de mantenimiento. $\left(\frac{\text{horas}}{\text{especialidad}}\right). \forall ie \in \mathrm{Esp}, \forall i \in A$

$CEsp^e$: Costo de la hora hombre de la especialidad e $\left(\frac{\$}{\text{horas}}\right). \forall ie \in \mathrm{Esp}$

Tabla 15. *Ejemplo de la información de horas hombre según las especialidades de mano de obra.*

Especialidad Mano de Obra						
HH Téc. Eléctrico 01	HH Téc. Eléctrico 02	HH Téc. Automatización y control 01	HH Téc. Automatización y control 02	HH Téc. Mecánico 01	HH Téc. Mecánico 02	HH Operador de Control Centralizado
0,04		0,17	0,17			0,04
0,15				0,60	0,60	0,15
				0,17		
0,02				0,13		0,02
0,25						
0,05				0,40		0,05
				0,17		
		0,25				
0,05				0,20	0,20	0,00
0,90	0,90					0,20

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 16. *Ejemplo de la información de los costos según las especialidades de mano de obra.*

Costo Hora Hombre	HH Téc. Eléctrico 01	HH Téc. Eléctrico 02	HH Téc. Automatización y control 01	HH Téc. Automatización y control 02	HH Téc. Mecánico 01	HH Téc. Mecánico 02	HH Operador de Control Centralizado
[$/HH]	4500	4000	5000	4500	4000	3500	5000

(Fuente: Elaboración Propia)

Además, se requiere de la identificación del costo de ineficiencia en el que incurre indirectamente el plan de mantenimiento debido al costo de oportunidad que tiene el área a mantener en los tiempos de reparación y reemplazo según las actividades de mantenimiento y las políticas del plan, dado el tiempo en el que el sistema no está operativo:

Ci: Costo de ineficiencia que incurre el sistema al no estar operativo en los tiempos de mantenimiento de los equipos $\left(\frac{\$}{\text{horas}}\right)$

Información de la gestión de mantenimiento:

Esta información depende absolutamente de la gestión de mantenimiento a cargo del uso de la herramienta, debido a que los ponderadores de la eficacia dependen de la interpretación que se les dé a estos, por lo que los inputs necesarios para la obtención de los ponderadores son la evaluación que se les da a cada factor según la interpretación de la gestión de mantenimiento:

Valor de la Interpretación	Interpretación
1	No importante
3	Ligeramente importante
5	Importante
7	Fuertemente Importante
9	Absolutamente importante

Tabla 17. Ejemplo de la información y valor de la interpretación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Las evaluaciones necesarias para la obtención de los ponderadores son la evaluación de los factores del indicador de efectividad para cada política de mantenimiento, evaluación de las actividades según política, de los indicadores de actividades según política y de los modos de falla según actividades de mantenimiento:

Ponderadores de los factores del indicador de efectividad para cada política de mantenimiento

EP_{ECA}^{p}: Evaluación de la eficacia según valores de interpretación del factor de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

EP_{ECI}^{p}: Evaluación de la eficiencia según valores de interpretación del factor de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

EP_{INE}^{p}: Evaluación de la ineficiencia según valores de interpretación del factor de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

Ponderadores de las actividades según política de mantenimiento

$EP_{ECA_i}^{PA_i}$: Evaluación de la eficacia de la actividad i según la política de mantenimiento PA_i. $\forall i \in A\ ,\ \forall PA_i \in P$

Ponderadores de los indicadores de las actividades según política de mantenimiento

EP_{T}^{p}: Evaluación del indicador T de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

EP_{MTTR}^{p}: Evaluación del indicador MTTR de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

EP_{F}^{p}: Evaluación del indicador de frecuencia de la política de mantenimiento p. $\forall p \in P$.

Ponderadores de los modos de falla según actividad de mantenimiento

$EP_{i,j}$: Evaluación del modo de falla j según la actividad de mantenimiento i. $\forall i \in A\ , \forall j \in MF$

7.2.4. Cálculo de Indicadores

Fase 3: Indicadores de adherencia de las actividades del plan de mantenimiento y sus ponderaciones.

Esta fase está compuesta en primer lugar, por el cálculo de indicadores que serán la base para el cálculo de los indicadores finales de efectividad y desviación del mantenimiento por política, por lo que se calculan los primeros indicadores de control del plan, los cuales son parte del desempeño esperado y el desempeñado real. Además, se procede al cálculo de los indicadores de adherencia del plan, los cuales buscan reflejar la diferencia entre el desempeño esperado del plan de mantenimiento y el desempeño real, comparando esta información según la eficacia (políticas de mantenimiento), eficiencia (indicadores de control de costos) e ineficiencia (indicadores de control de tiempo) del plan. Los indicadores de adherencia pueden tener dos interpretaciones debido a que construyen tanto indicadores de efectividad como indicadores de desviación del plan de mantenimiento profundizando la diferencia entre el desempeño esperado y el real visto desde que tan cerca estuvo el rendimiento real del rendimiento esperado y cuales la diferencia entre los dos desempeños.

Indicadores de control:

Los indicadores de control están compuestos por relaciones fundamentales en términos de tiempo y costos que intentan medir tanto del desempeño esperado como del real las variaciones en el tiempo de ejecución y costos de mantenimiento de las actividades.

Indicadores de control del tiempo de ejecución

Estos indicadores de control de tiempo miden principalmente el tiempo en el cual se realizó el mantenimiento y el tiempo que por lo tanto deja el sistema fuera de servicio o no operativo según intervenciones y actividades de mantenimiento:

TFS_i^{ex}: Tiempo fuera de servicio esperado debido a las intervenciones de la actividad i (minutos/intervencion). ∀i ∈ A

TFS_i^{re}: Tiempo fuera de servicio real debido a las intervenciones de la actividad i (minutos/intervencion). ∀i ∈ A

$TFSt_i^{ex}$: Tiempo fuera de servicio total esperado de la actividad i (horas). ∀i ∈ A

$TFSt_i^{re}$: Tiempo fuera de servicio total esperado de la actividad i (horas). ∀i ∈ A

Indicadores de control del costo de ejecución

Los indicadores de control de los costos miden las variaciones en los costos de mantenimiento del sistema desagregándolo en costo directo y costo de ineficiencia del desempeño esperado y el desempeño real del plan del mantenimiento

CD_i^{ex}: Costo directo de mantenimiento esperado de la actividad i ∀i ∈ A

$$CD_i^{ex} = CMO_i^{ex} + CR_i^{ex} + CM_i^{ex} + CS_i^{ex}$$

El costo directo por actividad de mantenimiento viene dado por los costos de ejecución del mantenimiento

CMO_i^{ex}: Costo mano de obra por el mantenimiento de la actividad i ($) ∀i ∈ A,

$$\mathrm{CMO}_i^{ex}: \sum_e (\mathrm{HEsp}_i^e * \mathrm{CEsp}^e) * \mathrm{FPA}_i^{ex}$$

donde,

FPA_i^{ex}: Frecuencia promedio de intervenciones esperadas según la política de mantenimiento PA_i para la actividad i (O.T./año). $\forall i \in A, \forall \mathrm{PA}_i \in P$

CR_i^{ex}: Costo de repuestos esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$) \forall i \in A$,

$$\mathrm{CR}_i^{ex} = \mathrm{R}_i^{ex} * \mathrm{FPA}_i^{ex}$$

donde,

R_i^{ex}: Costo de repuestos esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$/\mathrm{O.T.}) \ \forall i \in A$

CM_i^{ex}: Costo de materiales esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$) \forall i \in A$,

$$\mathrm{CM}_i^{ex} = \mathrm{M}_i^{ex} * \mathrm{FPA}_i^{ex}$$

donde,

M_i^{ex}: Costo de repuestos esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$/\mathrm{O.T.}) \ \forall i \in A$

CS_i^{ex}: Costo de servicios esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$) \forall i \in A$,

$$\mathrm{CS}_i^{ex}: \mathrm{S}_i^{ex} * \mathrm{FPA}_i^{ex}$$

donde,

S_i^{ex}: Costo de repuestos esperados por el mantenimiento de la actividad i $(\$/O.T.)$ $\forall i \in A$

CI_i^{ex}: Costo de ineficiencia de mantenimiento esperado de la actividad i $\forall i \in A$

$$CI_i^{ex} = Det_i * Ci * FPA_i^{ex}$$

CT_i^{ex}: Costo total de mantenimiento esperado de la actividad i $\forall i \in A$

$$CT_i^{ex} = CD_i^{ex} * CI_i^{ex}$$

Los indicadores de control tanto del tiempo como de los costos están representados según el desempeño esperado, para el desempeño real se realizan los mismos cálculos, pero esta vez con la información de la aplicación real del plan de mantenimiento según actividad.

Indicadores de adherencia:

Los indicadores de adherencia del plan de mantenimiento hacen referencia a si el desempeño real de la aplicación del plan de mantenimiento es logrado según los tiempos y costos esperados o planeados. Estos indicadores de adherencia por lo tanto se dividen en tres grandes grupos; indicadores de adherencia según la eficacia del plan de mantenimiento, indicadores de adherencia según la eficiencia del plan de mantenimiento e indicadores de adherencia según la ineficiencia del plan de mantenimiento, los cuales se desagregan en los siguientes indicadores:

Tabla 18. *Indicadores de adherencia según la eficacia de las políticas de mantenimiento.*

Indicadores de Adherencia según la eficacia	**Política de Mtto.**	**Descripción**	**Formulación**
$E_{CM_i}^{T}$	CM	Indicador de adherencia del tiempo promedio de reacción a la falla de la actividad i. $\forall i \in A^{CM}$	$E_{CM_i}^{T} = \frac{\text{Min}\,(\text{Tcm}_i^{ex}, \text{Tcm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Tcm}_i^{ex}, \text{Tcm}_i^{re})}$
$E_{CM_i}^{MTTR}$	CM	Indicador de adherencia tiempo promedio de reemplazo a la falla de la actividad i. $\forall i \in A^{CM}$	$E_{CM_i}^{MTTR} = \frac{\text{Min}\,(\text{MTTRcm}_i^{ex}, \text{MTTRcm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{MTTRcm}_i^{ex}, \text{MTTRcm}_i^{re})}$
$E_{CM_i}^{F}$	CM	Indicador de adherencia de la frecuencia de atención a la falla de la actividad i. $\forall i \in A^{CM}$	$E_{CM_i}^{F} = \frac{\text{Min}\,(\text{Fcm}_i^{ex}, \text{Fcm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Fcm}_i^{ex}, \text{Fcm}_i^{re})}$
$E_{PM_i}^{T}$	PM	Indicador de adherencia de las fallas no controladas de la actividad i. $\forall i \in A^{PM}$	$E_{PM_i}^{T} = \frac{\text{Min}\,(\text{Tpm}_i^{ex}, \text{Tpm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Tpm}_i^{ex}, \text{Tpm}_i^{re})}$
$E_{PM_i}^{MTTR}$	PM	Indicador de adherencia del tiempo promedio de reparación por el PM de la actividad i. $\forall i \in A^{PM}$	$E_{PM_i}^{MTTR} = \frac{\text{Min}\,(\text{MTTRpm}_i^{ex}, \text{MTTRpm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{MTTRpm}_i^{ex}, \text{MTTRpm}_i^{re})}$
$E_{PM_i}^{F}$	PM	Indicador de adherencia de la frecuencia de aplicación del PM de la actividad i. $\forall i \in A^{PM}$	$E_{PM_i}^{F} = \frac{\text{Min}\,(\text{Fpm}_i^{ex}, \text{Fpm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Fpm}_i^{ex}, \text{Fpm}_i^{re})}$
$E_{CBM_i}^{T}$	CBM	Indicador de adherencia frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo de la actividad i. $\forall i \in A^{CBM}$	$E_{CBM_i}^{T} = \frac{\text{Min}\,(\text{Tcbm}_i^{ex}, \text{Tcbm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Tcbm}_i^{ex}, \text{Tcbm}_i^{re})}$
$E_{CBM_i}^{MTTR}$	CBM	Indicador de adherencia del tiempo promedio de	$E_{CBM_i}^{MTTR} = \frac{\text{Min}\,(\text{MTTRcbm}_i^{ex}, \text{MTTRcbm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{MTTRcbm}_i^{ex}, \text{MTTRcbm}_i^{re})}$

		reparación por el CBM de la actividad i. ∀i ∈ A^{CBM}	
$E^{F}_{CBM_i}$	CBM	Indicador de adherencia de la frecuencia aplicación del CBM de la actividad i. ∀i ∈ A^{CBM}	$E^{F}_{CBM_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{Fcbm}_i^{ex}, \text{Fcbm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Fcbm}_i^{ex}, \text{Fcbm}_i^{re})}$
$E^{T}_{PrM_i}$	PrM	Indicador de adherencia de aviso de mantenimiento efectivo de la actividad i. ∀i ∈ A^{PrM}	$E^{T}_{PrM_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{Tprm}_i^{ex}, \text{Tprm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Tprm}_i^{ex}, \text{Tprm}_i^{re})}$
$E^{MTTR}_{PrM_i}$	PrM	Indicador de adherencia del tiempo promedio de reparación por el PrM de la actividad i. ∀i ∈ A^{PrM}	$E^{MTTR}_{PrM_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{MTTRprm}_i^{ex}, \text{MTTRprm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{MTTRprm}_i^{ex}, \text{MTTRprm}_i^{re})}$
$E^{F}_{PrM_i}$	PrM	Indicador de adherencia de la frecuencia de aplicación del PrM de la actividad i. ∀i ∈ A^{PrM}	$E^{F}_{PrM_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{Fprm}_i^{ex}, \text{Fprm}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{Fprm}_i^{ex}, \text{Fprm}_i^{re})}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 19. *Indicadores de adherencia según la eficiencia de los costos directos del plan de mantenimiento.*

Indicadores de Adherencia según la eficiencia	**Descripción**	**Formulación**
$E^{CMO}_{PA_i}$	Indicador de adherencia del costo de mano de obra según la política de mantenimiento PA_i de la actividad i. ∀i ∈ A, ∀PA_I ∈ A	$E^{CMO}_{PA_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{CMO}_i^{ex}, \text{CMO}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{CMO}_i^{ex}, \text{CMO}_i^{re})}$
$E^{CR}_{PA_i}$	Indicador de adherencia del costo de repuestos según la política de mantenimiento PA_i de la actividad i. ∀i ∈ A, ∀PA_I ∈ A	$E^{CR}_{PA_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{CR}_i^{ex}, \text{CR}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{CR}_i^{ex}, \text{CR}_i^{re})}$
$E^{CM}_{PA_i}$	Indicador de adherencia del costo de materiales según la política de mantenimiento PA_i de la actividad i. ∀i ∈ A, ∀PA_I ∈ A	$E^{CM}_{PA_i} = \frac{\text{Min}\,(\text{CM}_i^{ex}, \text{CM}_i^{re})}{\text{Max}\,(\text{CM}_i^{ex}, \text{CM}_i^{re})}$

$E^{CS}_{PA_i}$	Indicador de adherencia del costo de servicios según la política de mantenimiento PA_i de la actividad i. $\forall i \in A, \forall PA_I \in A$	$E^{CS}_{PA_i} = \frac{\text{Min}\,(CS^{ex}_i, CS^{re}_i)}{\text{Max}\,(CS^{ex}_i, CS^{re}_i)}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 20. *Indicador de adherencia según la ineficiencia de los costos directos del plan de mantenimiento.*

Indicadores de Adherencia según la ineficiencia	**Descripción**	**Formulación**
$E^{INE}_{PA_i}$	Indicador de adherencia del costo de ineficiencia según la política de mantenimiento PA_i de la actividad i. $\forall i \in A, \forall PA_I \in A$	$E^{INE}_{PA_i} = \frac{\text{Min}\,(CI^{ex}_i, CI^{re}_i)}{\text{Max}\,(CI^{ex}_i, CI^{re}_i)}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Los indicadores de adherencia son parte importante de los indicadores finales de efectividad E y además, parte importante de los indicadores finales de la desviación de la efectividad D el cual hacen referencia a la desviación que posee el desempeño real de la aplicación del plan te mantenimiento respecto del desempeño esperado o planeado, por lo tanto, los indicadores de adherencia anteriormente mencionados son la base para los siguientes indicadores de desviación del plan de mantenimiento:

Tabla 21. *Indicadores de la desviación de la efectividad del plan de mantenimiento.*

Indicadores de desviación de la eficacia (%)	**Formulación**
$D^{T}_{CM_i}$	$D^{T}_{CM_i} = 1 - E^{T}_{CM_i}$
$D^{MTTR}_{CM_i}$	$D^{MTTR}_{CM_i} = 1 - E^{MTTR}_{CM_i}$

$D^{F}_{CM_i}$	$D^{F}_{CM_i} = 1 - E^{F}_{CM_i}$
$D^{T}_{PM_i}$	$D^{T}_{PM_i} = 1 - E^{T}_{PM_i}$
$D^{MTTR}_{PM_i}$	$D^{MTTR}_{PM_i} = 1 - E^{MTTR}_{PM_i}$
$D^{F}_{PM_i}$	$D^{F}_{PM_i} = 1 - E^{F}_{PM_i}$
$D^{T}_{CBM_i}$	$D^{T}_{CBM_i} = 1 - E^{T}_{CBM_i}$
$D^{MTTR}_{CBM_i}$	$D^{MTTR}_{CBM_i} = 1 - E^{MTTR}_{CBM_i}$
$D^{F}_{CBM_i}$	$D^{F}_{CBM_i} = 1 - E^{F}_{CBM_i}$
$D^{T}_{PrM_i}$	$D^{T}_{PrM_i} = 1 - E^{T}_{PrM_i}$
$D^{MTTR}_{PrM_i}$	$D^{MTTR}_{PrM_i} = 1 - E^{MTTR}_{PrM_i}$
$D^{F}_{PrM_i}$	$D^{F}_{PrM_i} = 1 - E^{F}_{PrM_i}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 22. *Indicadores de la desviación de la eficiencia e ineficiencia del plan de mantenimiento.*

Indicadores de desviación de la eficiencia e ineficiencia	**Formulación**
$\mathrm{D}^{\mathrm{CMO}}_{\mathrm{PA_i}}$	$\mathrm{D}^{\mathrm{CMO}}_{\mathrm{PA_i}} = 1 - \mathrm{E}^{\mathrm{CMO}}_{\mathrm{PA_i}}$
$\mathrm{D}^{\mathrm{CR}}_{\mathrm{PA_i}}$	$\mathrm{D}^{\mathrm{CR}}_{\mathrm{PA_i}} = 1 - \mathrm{E}^{\mathrm{CR}}_{\mathrm{PA_i}}$
$\mathrm{D}^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{PA_i}}$	$\mathrm{D}^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{PA_i}} = 1 - \mathrm{E}^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{PA_i}}$

$D_{PA_i}^{CS}$	$D_{PA_i}^{CS} = 1 - E_{PA_i}^{CS}$
$D_{PA_i}^{INE}$	$D_{PA_i}^{INE} = 1 - E_{PA_i}^{INE}$

(Fuente: Elaboración Propia)

Además, la herramienta incorpora colores por cada una de las variables lo cual ayuda a identificar si la diferencia porcentual que se produce entre el desempeño real y el desempeño esperado es debido a que:

$$\text{Desempeño real} = \text{Desempeño esperado} \rightarrow \text{celda amarilla}$$

$$\text{Desempeño real} < \textit{Desempeño esperado} \rightarrow \textit{celda verde}$$

$$\text{Desempeño real} > \textit{Desempeño esperado} \rightarrow \textit{celda roja}$$

Ponderadores:

Los ponderadores cumplen con la función de ser un factor que multiplica los distintos indicadores para de esta forma otorgarle mayor o menor relevancia en el indicador final de efectividad. Los ponderadores están a todo nivel dentro del árbol de valor de la efectividad y de la desviación de la efectividad, es decir, va desde el cálculo de ponderadores de los modos de falla que ataca cada actividad, como en el cálculo final del indicador de efectividad según eficacia, eficiencia e ineficiencia.

Los ponderadores se dividen en 2 grupos principalmente, los cuales se distinguen según la eficacia de las políticas de mantenimiento del plan y la eficiencia en costos del plan de mantenimiento, el primero obtiene los ponderadores según una evaluación del

usuario en donde se le otorga un valor de interpretación a cada indicador para finalmente sacar su porcentaje de relevancia en el indicador final, el segundo obtiene los ponderadores a través de matrices de comparación de pares la cual está en base a los costos esperados de la aplicación de las distintas políticas de mantenimiento dentro del plan.

Ponderadores de los factores del indicador de efectividad

Estos son los ponderadores de nivel más alto, debido a que son los tres factores principales del indicador de efectividad para cada de una de las políticas de mantenimiento.

P_{ECA}^{p}: Ponderador de la eficacia dentro de los factores del indicador de efectividad para la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$

$$P_{ECA}^{p} = \frac{EP_{ECA}^{p}}{(EP_{ECA}^{p} + EP_{ECI}^{p} + EP_{INE}^{p})}$$

P_{ECI}^{p}: Ponderador de la eficiencia dentro de los factores del indicador de efectividad para la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$

$$P_{ECI}^{p} = \frac{EP_{ECI}^{p}}{(EP_{ECA}^{p} + EP_{ECI}^{p} + EP_{INE}^{p})}$$

P_{ECA}^{p}: Ponderador de la ineficiencia dentro de los factores del indicador de efectividad para la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$

$$P_{INE}^{p} = \frac{EP_{INE}^{p}}{(EP_{ECA}^{p} + EP_{ECI}^{p} + EP_{INE}^{p})}$$

Tabla 23. Ejemplo de cálculo de ponderadores de los factores del indicador de efectividad.

		Evaluación	Ponderación
Factores del Indicador de Efectividad para cada Política de Mantenimiento	Eficacia	9	33,33%
	Eficiencia	9	33,33%
	Ineficiencia	9	33,33%
	Total	27	100,00%

(Fuente: Elaboración Propia)

Ponderadores según la eficacia del plan de mantenimiento

Los ponderadores de la eficacia se calculan de la misma forma que los ponderadores de los factores del indicador de efectividad y se desagregan en:

1. Ponderadores de las actividades según la política de mantenimiento.

$P_{ECA_i}^{PA_i}$: Ponderador de eficacia de la actividad i según la política de mantenimiento PA_i (%).

$\forall i \in A, \forall PA_i \in P$

2. Ponderadores de indicadores de las actividades según las políticas de mantenimiento.

P_T^p: Ponderador de eficacia del indicador T de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$.

P_{MTTR}^p: Ponderador de eficacia del indicador MTTR de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$.

P_F^p: Ponderador de eficacia del indicador de frecuencia de la política de mantenimiento p(%). $\forall p \in P$.

3. Ponderadores de los modos de falla según las actividades de mantenimiento.

$P_{i,j}$: Ponderador del modo de falla j según la actividad de mantenimiento i (%). $\forall i \in A, \forall j \in MF$

Ponderadores según la eficiencia del plan de mantenimiento

Los ponderadores de la eficiencia se calculan realizando matrices de comparación de pares entre las variables de decisión y se desagregan en:

1. Ponderadores de los costos directos según la eficiencia del plan de mantenimiento.

El procedimiento para calcular los ponderadores de la eficiencia se basa en los costos de cada una de las variables para la realización de la matriz de comparación de pares, un ejemplo de su cálculo en costos directos según la eficiencia es:

Tabla 24. *Ejemplo de la primera matriz de cálculo de los ponderadores de los costos directos según la eficiencia.*

	Costo Mano de Obra	Costo Repuestos	Costos Materiales	Costos Servicios
Costo Mano de Obra	1	0,060504531	0,756267317	0,11764739
Costo Repuestos	16,5276877	1	12,49935004	1,944439321
Costos Materiales	1,322283771	0,08000416	1	0,155563235
Costos Servicios	8,499976069	0,514287069	6,4282541	1
Suma	27,34994754	1,654795761	20,68387145	3,217649946

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 25. *Ejemplo de la segunda matriz de cálculo de ponderadores de los costos directos según la eficiencia.*

	Costo Mano de Obra	Costo Repuestos	Costos Materiales	Costos Servicios
Costo Mano de Obra	0,036563141	0,036563141	0,036563141	0,036563141
Costo Repuestos	0,604304183	0,604304183	0,604304183	0,604304183
Costos Materiales	0,048346849	0,048346849	0,048346849	0,048346849
Costos Servicios	0,310785827	0,310785827	0,310785827	0,310785827

(Fuente: Elaboración Propia)

De las matrices de comparación pareadas con previo análisis de consistencia de esta se desprenden los siguientes ponderadores:

P_{CMO}^{p}: Ponderador del costo de mano de obra de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$.

P_{CR}^{p}: Ponderador del costo de repuestos de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$.

P_{CMa}^{p}: Ponderador del costo de materiales de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$

P_{CS}^{p}: Ponderador del costo de servicios de la política de mantenimiento p (%). $\forall p \in P$

Tabla 26. Ejemplo de los ponderadores de los costos directos según la eficiencia.

Costos Directos	Ponderadores
Costo Mano de Obra	3,66%
Costo Repuestos	60,43%
Costos Materiales	4,83%
Costos Servicios	31,08%

(Fuente: Elaboración Propia)

2. Ponderadores de eficiencia de las actividades según políticas de mantenimiento.

Los ponderadores de las actividades según la política de mantenimiento se calcula de la misma forma que los ponderadores de los costos directos según la eficiencia.

$P_{ECI_i}^{PA_i}$: Ponderador de eficiencia de la actividad i según la política de mantenimiento PA_i.

$\forall i \in A, \forall PA_i \in P$

Fase 4: Indicadores de efectividad y desviación de la efectividad del plan de mantenimiento

Ya con los indicadores de adherencia calculados, se procede a la fase cuatro, la cual calcula por política de mantenimiento, los indicadores de efectividad básicos, los indicadores principales de efectividad y el indicador final de efectividad.

Indicador de efectividad del mantenimiento correctivo

Los indicadores básicos de efectividad, indicadores principales de efectividad y el indicador final de efectividad del mantenimiento correctivo se obtienen de la siguiente forma:

Tabla 27. *Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento correctivo.*

Indicador	Descripción	Formulación
E_{CM}^{T}	Indicador de eficacia del tiempo de reacción del reemplazo a la falla. (%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{T} * P_{ECA_i}^{CM} \right)$
E_{CM}^{MTTR}	Indicador de eficacia de la duración del reemplazo a la falla.(%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{MTTR} * P_{ECA_i}^{CM} \right)$
E_{CM}^{F}	Indicador de eficacia de la frecuencia de atención a la falla.(%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{F} * P_{ECA_i}^{CM} \right)$
E_{CM}^{CMO}	Indicador de eficiencia del costo de mano de obra del mantenimiento correctivo. (%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{CR} * P_{ECI_i}^{CM} \right)$

E_{CM}^{CR}	Indicador de eficiencia del costo de repuestos del mantenimiento correctivo. (%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{CM} \right)$
E_{CM}^{CMa}	Indicador de eficiencia del costo de materiales del mantenimiento correctivo. (%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{CMa} * P_{ECI_i}^{CM} \right)$
E_{CM}^{CS}	Indicador de eficiencia del costo de servicios del mantenimiento correctivo. (%)	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{CS} * P_{ECI_i}^{CM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 28. *Indicadores principales de efectividad del mantenimiento correctivo.*

Indicador	**Descripción**	**Formulación**
E_{CM}^{ECA}	Indicador de eficacia del mantenimiento correctivo	$E_{CM}^{T} * P_{T}^{CM} + E_{CM}^{MTTR} * P_{MTTR}^{CM} + E_{CM}^{F} * P_{F}^{CM}$
E_{CM}^{ECI}	Indicador de eficiencia del mantenimiento correctivo	$E_{CM}^{CMO} * P_{CMO}^{CM} + E_{CM}^{CR} * P_{CR}^{CM} + E_{CM}^{CMa} * P_{CMa}^{CM} + E_{CM}^{CS} * P_{CS}^{CM}$
E_{CM}^{INE}	Indicador de ineficiencia del mantenimiento correctivo	$\sum_{i \in A^{CM}} \left(E_{CM_i}^{INE} * P_{ECI_i}^{CM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 29. *Indicador de efectividad del mantenimiento correctivo.*

Indicador	**Descripción**	**Formulación**
E_{CM}	Indicador de efectividad del mantenimiento correctivo	$E_{CM}^{ECA} * P_{ECA}^{CM} + E_{CM}^{ECI} * P_{ECI}^{CM} + E_{CM}^{INE} * P_{INE}^{CM}$

(Fuente: Elaboración Propia).

Indicador de efectividad del mantenimiento preventivo:

Los indicadores básicos de efectividad, indicadores principales de efectividad y el indicador final de efectividad del mantenimiento preventivo se obtienen de la siguiente forma:

Tabla 30. *Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento preventivo.*

Indicador	**Descripción**	**Formulación**
E_{PM}^{T}	Indicador de eficacia de las fallas no controladas por el mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{T} * P_{ECA_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{MTTR}	Indicador de eficacia del tiempo promedio de reparación por el mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{MTTR} * P_{ECA_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{F}	Indicador de eficacia de la frecuencia de aplicación del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{F} * P_{ECA_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{CMO}	Indicador de eficiencia del costo de mano de obra del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{CR}	Indicador de eficiencia del costo de repuestos del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{CMa}	Indicador de eficiencia del costo de materiales del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{CMa} * P_{ECI_i}^{PM} \right)$
E_{PM}^{CS}	Indicador de eficiencia del costo de servicios del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{CS} * P_{ECI_i}^{PM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 31. *Indicadores principales de efectividad del mantenimiento preventivo*

Indicador	Descripción	Formulación
E_{PM}^{ECA}	Indicador de eficacia del mantenimiento preventivo	$E_{PM}^{T} * P_{T}^{PM} + E_{PM}^{MTTR} * P_{MTTR}^{PM} + E_{PM}^{F} * P_{F}^{PM}$
E_{PM}^{ECI}	Indicador de eficiencia del mantenimiento preventivo	$E_{PM}^{CMO} * P_{CMO}^{PM} + E_{PM}^{CR} * P_{CR}^{PM} + E_{PM}^{CMa} * P_{CMa}^{PM} + E_{PM}^{CS} * P_{CS}^{PM}$
E_{PM}^{INE}	Indicador de ineficiencia del mantenimiento preventivo	$\sum_{i \in A^{PM}} \left(E_{PM_i}^{INE} * P_{ECI_i}^{PM}\right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 32. *Indicador de efectividad del mantenimiento preventivo*

Indicador	Descripción	Formulación
E_{PM}	Indicador de efectividad del mantenimiento preventivo	$E_{PM}^{ECA} * P_{ECA}^{PM} + E_{PM}^{ECI} * P_{ECI}^{PM} + E_{PM}^{INE} * P_{INE}^{PM}$

(Fuente: Elaboración Propia).

Indicador de efectividad del mantenimiento según condición:

Los indicadores básicos de efectividad, indicadores principales de efectividad y el indicador final de efectividad del mantenimiento según condición se obtienen de la siguiente forma:

Tabla 33. Indicadores básicos de efectividad del mantenimiento según condición

Indicador	Descripción	Formulación
E_{CBM}^{T}	Indicador de eficacia de aviso de mantenimiento efectivo del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{T} * P_{ECA_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{MTTR}	Indicador de eficacia del tiempo promedio de reparación del mantenimiento predictivo.(%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{MTTR} * P_{ECA_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{F}	Indicador de eficacia de la frecuencia de aplicación del mantenimiento predictivo.(%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{F} * P_{ECA_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{CMO}	Indicador de eficiencia del costo de mano de obra del mantenimiento según condición. (%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{CR}	Indicador de eficiencia del costo de repuestos del mantenimiento según condición. (%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{CMa}	Indicador de eficiencia del costo de materiales del mantenimiento según condición. (%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{CMa} * P_{ECI_i}^{CBM} \right)$
E_{CBM}^{CS}	Indicador de eficiencia del costo de servicios del mantenimiento según condición. (%)	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{CS} * P_{ECI_i}^{CBM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 34. *Indicadores principales de efectividad del mantenimiento según condición.*

Indicador	Descripción	Formulación
E_{CBM}^{ECA}	Indicador de eficacia del mantenimiento según condición	$E_{CBM}^{T} * P_{T}^{CBM} + E_{CBM}^{MTTR} * P_{MTTR}^{CBM} + E_{CBM}^{F} * P_{F}^{CBM}$
E_{CBM}^{ECI}	Indicador de eficiencia del mantenimiento según	$E_{CBM}^{CMO} * P_{CMO}^{CBM} + E_{CBM}^{CR} * P_{CR}^{CBM} + E_{CBM}^{CMa} * P_{CMa}^{CBM} + E_{CBM}^{CS} * P_{CS}^{CBM}$

	condición	
E_{CBM}^{INE}	Indicador de ineficiencia del mantenimiento según condición	$\sum_{i \in A^{CBM}} \left(E_{CBM_i}^{INE} * P_{ECI_i}^{CBM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 35. Indicador de efectividad del mantenimiento según condición.

Indicador	Descripción	Formulación
E_{CBM}	Indicador de efectividad del mantenimiento según condición	$E_{CBM}^{ECA} * P_{ECA}^{CBM} + E_{CBM}^{ECI} * P_{ECI}^{CBM} + E_{CBM}^{INE} * P_{INE}^{CBM}$

(Fuente: Elaboración Propia).

Indicador de efectividad del mantenimiento predictivo:

Los indicadores básicos de efectividad, indicadores principales de efectividad y el indicador final de efectividad del mantenimiento según condición se obtienen de la siguiente forma:

Tabla 36. Indicadores básicos de efectividad del plan predictivo.

Indicador	Descripción	Formulación
E_{PrM}^{T}	Indicador de eficacia de aviso de mantenimiento efectivo del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{T} * P_{ECA_i}^{PrM} \right)$
E_{PrM}^{MTTR}	Indicador de eficacia del tiempo promedio de reparación por el mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{MTTR} * P_{ECA_i}^{PrM} \right)$

E_{PrM}^{F}	Indicador de eficacia de la frecuencia de aplicación del mantenimiento preventivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{F} * P_{ECA_i}^{PrM} \right)$
E_{PrM}^{CMO}	Indicador de eficiencia del costo de mano de obra del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{PrM} \right)$
E_{PrM}^{CR}	Indicador de eficiencia del costo de repuestos del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{CMO} * P_{ECI_i}^{PrM} \right)$
E_{PrM}^{CMa}	Indicador de eficiencia del costo de materiales del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{CMa} * P_{ECI_i}^{PrM} \right)$
E_{PrM}^{CS}	Indicador de eficiencia del costo de servicios del mantenimiento predictivo. (%)	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{CS} * P_{ECI_i}^{PrM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 37. *Indicadores principales de efectividad del mantenimiento predictivo.*

Indicador	**Descripción**	**Formulación**
E_{PrM}^{ECA}	Indicador de eficacia del mantenimiento preventivo	$E_{PrM}^{T} * P_{T}^{PrM} + E_{PrM}^{MTTR} * P_{MTTR}^{PrM} + E_{PrM}^{F} * P_{F}^{PrM}$
E_{PrM}^{ECI}	Indicador de eficiencia del mantenimiento preventivo	$E_{PrM}^{CMO} * P_{CMO}^{PrM} + E_{PrM}^{CR} * P_{CR}^{PrM} + E_{PrM}^{CMa} * P_{CMa}^{PrM} + E_{PrM}^{CS} * P_{CS}^{PrM}$
E_{PrM}^{INE}	Indicador de ineficiencia del mantenimiento preventivo	$\sum_{i \in A^{PrM}} \left(E_{PrM_i}^{INE} * P_{ECI_i}^{PrM} \right)$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 38. Indicador de efectividad del mantenimiento predictivo.

Indicador	Descripción	Formulación
E_{PrM}	Indicador de efectividad del mantenimiento predictivo	$E_{PrM}^{ECA} * P_{ECA}^{PrM} + E_{PrM}^{ECI} * P_{ECI}^{PrM} + E_{PrM}^{INE} * P_{INE}^{PrM}$

(Fuente: Elaboración Propia).

Indicador de desviación de la efectividad según política de mantenimiento:

La diferencia que existe entre la efectividad real y la efectividad esperada es representado en los indicadores de desviación de la efectividad según las políticas de mantenimiento:

Tablas 39. *Indicadores de la desviación de la efectividad del mantenimiento correctivo y preventivo.*

Indicadores de desviación CM (%)	Formulación
D_{CM}^{T}	$D_{CM_i}^{T} = 1 - E_{CM}^{T}$
D_{CM}^{MTTR}	$D_{CM}^{MTTR} = 1 - E_{CM}^{MTTR}$
D_{CM}^{F}	$D_{CM}^{F} = 1 - E_{CM}^{F}$
D_{CM}^{CMO}	$D_{CM}^{CMO} = 1 - E_{CM}^{CMO}$
D_{CM}^{CR}	$D_{CM}^{CR} = 1 - E_{CM}^{CR}$

Indicadores de desviación PM (%)	Formulación
D_{PM}^{T}	$D_{PM}^{T} = 1 - E_{PM}^{T}$
D_{PM}^{MTTR}	$D_{PM}^{MTTR} = 1 - E_{PM}^{MTTR}$
D_{PM}^{F}	$D_{PM}^{F} = 1 - E_{PM}^{F}$
D_{PM}^{CMO}	$D_{PM}^{CMO} = 1 - E_{PM}^{CMO}$
D_{PM}^{CR}	$D_{PM}^{CR} = 1 - E_{PM}^{CR}$

$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CMa}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CMa}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CMa}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CMa}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CMa}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CMa}}$
$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CS}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CS}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{CS}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CS}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CS}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{CS}}$
$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECA}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECA}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECA}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECA}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECA}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECA}}$
$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECI}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECI}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{ECI}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECI}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECI}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{ECI}}$
$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{INE}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{INE}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{INE}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{INE}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{INE}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{INE}}$
D_{CM}	$D_{\mathrm{CM}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CM}}$	D_{PM}	$\mathrm{D}_{\mathrm{PM}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PM}}$

(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 40. *Indicadores de la desviación de la efectividad del mantenimiento según condición y predictivo.*

Indicadores de desviación CBM (%)	**Formulación**	**Indicadores de desviación PrM (%)**	**Formulación**
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{T}}$	$D_{CBM_i}^{T} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{T}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{T}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{T}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{T}}$
$\mathrm{D}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{MTTR}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{MTTR}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{MTTR}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{MTTR}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{MTTR}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{MTTR}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{F}}$	$D_{CM_i}^{F} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{F}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{F}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{F}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{F}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMO}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMO}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMO}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMO}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMO}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMO}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CR}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CR}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CR}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CR}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CR}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CR}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMa}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMa}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CMa}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMa}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMa}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CMa}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CS}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CS}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{CS}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CS}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CS}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{CS}}$

$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECA}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECA}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECA}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECI}}$	$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECI}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{ECI}}$
$D_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{INE}}$	$D_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{INE}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}^{\mathrm{INE}}$
D_{CBM}	$D_{\mathrm{CBM}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{CBM}}$

$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECA}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECA}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECA}}$
$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECI}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECI}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{ECI}}$
$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{INE}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{INE}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}^{\mathrm{INE}}$
$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}}$	$\mathrm{D}_{\mathrm{PrM}} = 1 - \mathrm{E}_{\mathrm{PrM}}$

(Fuente: Elaboración Propia).

7.2.5. Herramientas Graficas y Plan de Control

Fase 5: Herramientas gráficas y control del plan de mantenimiento

En esta última fase de la metodología, se procede a la obtención de las herramientas gráficas de apoyo para un mejor análisis de los indicadores obtenidos a nivel de actividades y modos de falla. Éstas se componen de dos partes: la primera, son matrices de cobertura del plan según costos de mantenimiento y tiempo fuera de servicio a nivel de modos de falla. La segunda, se compone de gráficos de cobertura del plan de mantenimiento a nivel de modos de falla y gráficos acerca de los indicadores principales de la efectividad por actividad de mantenimiento e indicadores principales de la desviación de la efectividad por actividad de mantenimiento.

Además, esta fase elabora un control del plan que resume la información final obtenida de los indicadores de efectividad, separándolas en políticas de mantenimiento y en actividades de mantenimiento.

Cobertura del plan por modo de falla

Los modos de falla son atendidos por las actividades de mantenimiento para reducir el riesgo de que estos se activen, esta cobertura que se les otorga por parte del plan de mantenimiento es la que se detalla a continuación, dividiéndolos en cobertura por costo de mantenimiento y cobertura por tiempo fuera de servicio.

Cobertura por costo de mantenimiento del modo de falla

$\mathbf{CobC_{i,j}}$: Indicador de cobertura de los costos de mantenimiento de la actividad i en el modo de falla j (%).

$$\mathrm{CobC_{i,j}} = \frac{\mathrm{Min}(\mathrm{CobC_{i,j}^{ex}}, \mathrm{CobC_{i,j}^{re}})}{\mathrm{Max}(\mathrm{CobC_{i,j}^{ex}}, \mathrm{CobC_{i,j}^{re}})}$$

Donde,

$\mathrm{CobC_{i,j}^{ex}}$: Cobertura esperada de los costos de mantenimiento de la actividad i en el modo de falla j ($/años).

$$\mathrm{CobC_{i,j}^{ex}} = \mathrm{CT_{i}^{ex}} * \mathrm{P_{i,j}}$$

$\mathrm{CobC_{i,j}^{re}}$: Cobertura real de los costos de mantenimiento de la actividad i en el modo de falla j ($/años).

$$\mathrm{CobC_{i,j}^{re}} = \mathrm{CT_{i}^{re}} * \mathrm{P_{i,j}}$$

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1	98%														
Actividad 2															
Actividad 3			95%	95%											
Actividad 4					35%	35%									
Actividad 5							80%								
Actividad 6															
Actividad 7									70%						
Actividad 8										100%	100%				
Actividad 9												89%	89%	89%	
Actividad 10															

Figura 6. Ejemplo de matriz de cobertura preventiva. Indicador de cobertura del costo de mantenimiento a cargo de la actividad i para el modo de falla j según una política preventiva. (Fuente: Elaboración propia)

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1															
Actividad 2		46%													
Actividad 3															
Actividad 4															
Actividad 5															
Actividad 6								44%							
Actividad 7															
Actividad 8															
Actividad 9															
Actividad 10															46%

Figura 7. Ejemplo de matriz de cobertura a la falla. Indicador de cobertura del costo de mantenimiento a cargo de la actividad i para el modo de falla j según la política a la falla. (Fuente: Elaboración propia)

Cobertura por tiempo fuera de servicio del modo de falla

$CobT_{i,j}$: Indicador de cobertura del tiempo fuera de servicio total de la actividad *i* en el modo de falla j (%).

$$\mathrm{CobT}_{i,j} = \frac{\mathrm{Min}(\mathrm{CobT}_{i,j}^{ex}, \mathrm{CobT}_{i,j}^{re})}{\mathrm{Max}(\mathrm{CobT}_{i,j}^{ex}, \mathrm{CobT}_{i,j}^{re})}$$

Donde,

$\mathrm{CobT}_{i,j}^{ex}$: Cobertura esperada del tiempo fuera de servicio total de la actividad i en el modo de falla j ($/años).

$$\mathrm{CobT}_{i,j}^{ex} = TFSt_i^{ex} * P_{i,j}$$

$\mathrm{CobT}_{i,j}^{re}$: Cobertura real del tiempo fuera de servicio total de la actividad i en el modo de falla j ($/años).

$$\mathrm{CobC}_{i,j}^{re} = CT_i^{re} * P_{i,j}$$

Gráficos y reglas de interpretación

Los gráficos de apoyo a la herramienta de cuantificación de la efectividad del plan de mantenimiento se dividen en cuatro grupos; el primer grupo se compone del desempeño esperado del plan por modo de falla y del desempeño real del plan por modo de falla, el segundo grupo se compone de la eficacia del plan de mantenimiento por actividad, la eficiencia del plan de mantenimiento por actividad, la ineficiencia del plan de mantenimiento y la efectividad del plan de mantenimiento, el tercer grupo se compone de la desviación de la eficacia del plan por actividad, la desviación de la eficiencia del plan por actividad, la desviación de la ineficiencia del plan por actividad y la desviación de la efectividad del plan por actividad, por último el cuarto grupo se compone de los indicadores principales del mantenimiento correctivo por actividad, los indicadores principales del mantenimiento preventivo por actividad, los indicadores principales del

mantenimiento según condición por actividad y los indicadores principales del mantenimiento predictivo por actividad.

El primer grupo de gráficos es representado por las siguientes herramientas gráficas del desempeño del plan de mantenimiento por modo de falla:

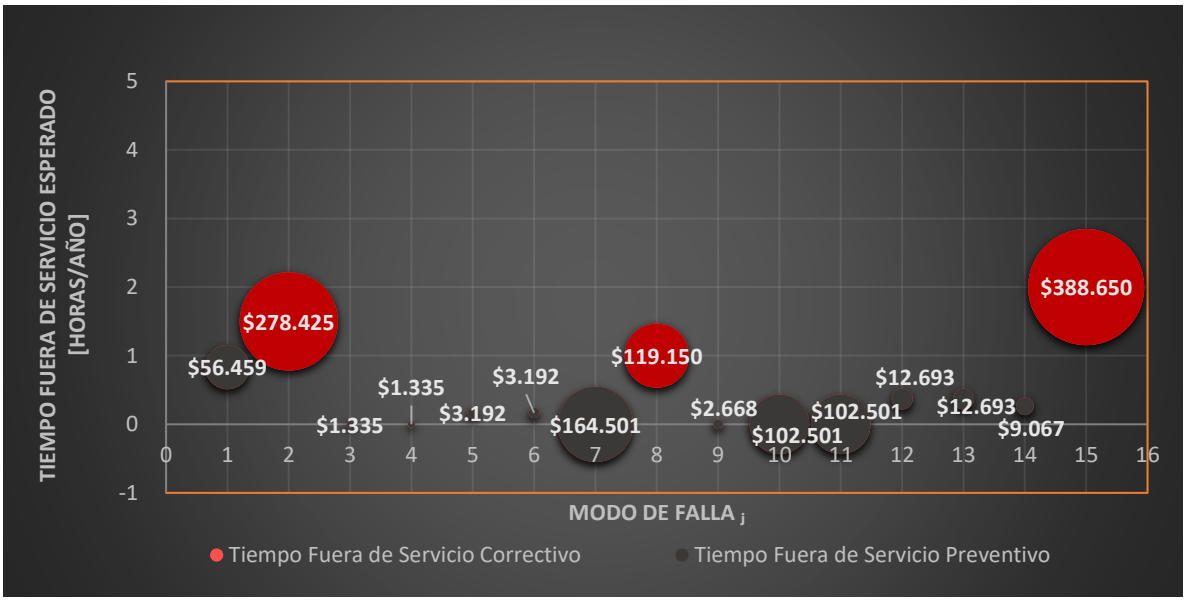


Figura 8. Gráfico de la herramienta. Desempeño esperado del palan de mantenimiento por modo de falla j. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 8:

- El **color** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Color negro para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y color rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el costo total esperado de mantenimiento del modo de falla j

El gráfico 1 permite ver el costo total de mantenimiento esperado del modo de falla j y el tiempo fuera de servicio esperado según el tipo de mantenimiento y el modo de falla que se atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución de los costos totales esperados por modo de falla y el eje *y* indica el tiempo fuera de servicio esperado.

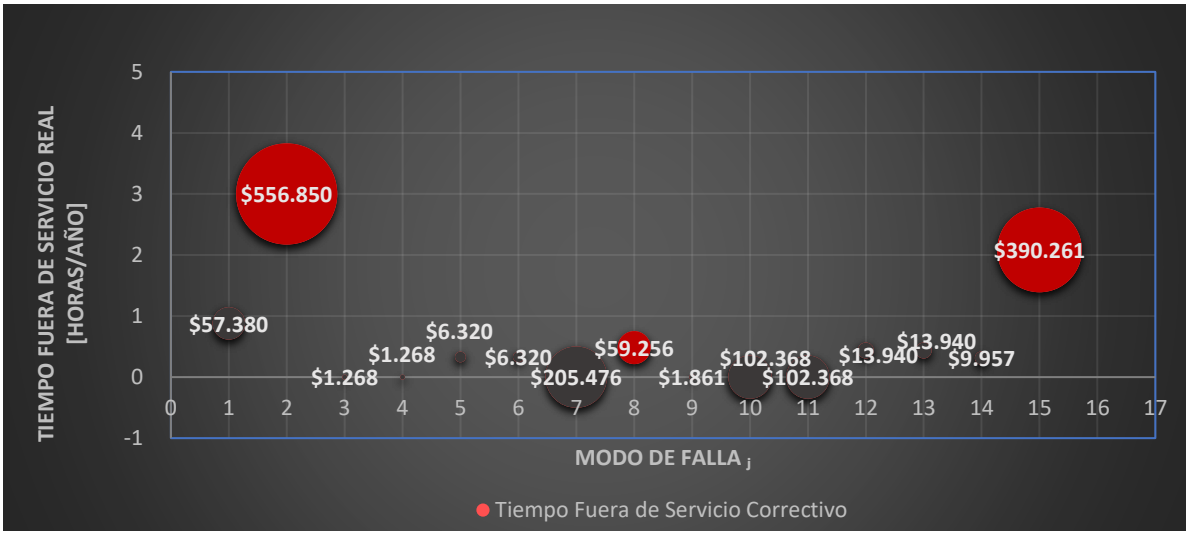


Figura 9. Gráfico 2 de la herramienta. Desempeño real del plan de mantenimiento por modo de falla j. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el gráfico de la figura 9:

- El **color** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Color negro para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y color rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el costo total real de mantenimiento del modo de falla j

El gráfico 2 permite ver el costo total de mantenimiento real del modo de falla j y el tiempo fuera de servicio real según el tipo de mantenimiento y el modo de falla que se atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución de los costos totales reales por modo de falla y el eje *y* indica el tiempo fuera de servicio real.

El segundo grupo de gráficos es representado por las siguientes herramientas gráficas de los indicadores principales de efectividad del plan de mantenimiento por actividad:

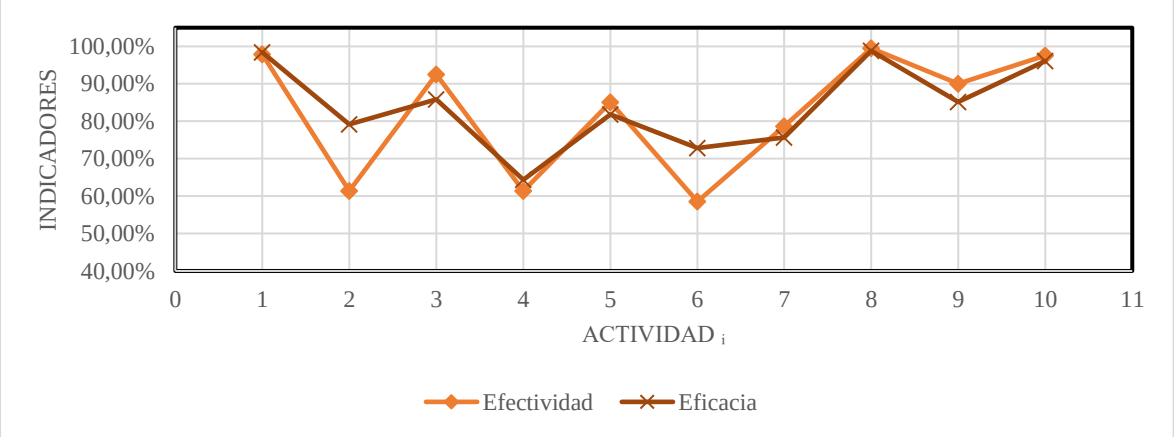


Figura 10. Gráfico 3 de la herramienta. Eficacia del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia).

Se deben tener las siguientes consideraciones para el gráfico de la figura 10:

- Los **rombos naranjos** muestran el indicador de efectividad de la actividad de mantenimiento *i*.
- Las **equis rojas** muestran el indicador de eficacia de la actividad de mantenimiento *i*.

El gráfico 3 permite relacionar y ver por actividad la influencia de los indicadores de eficacia de las políticas de mantenimiento en los indicadores de efectividad del plan de mantenimiento.

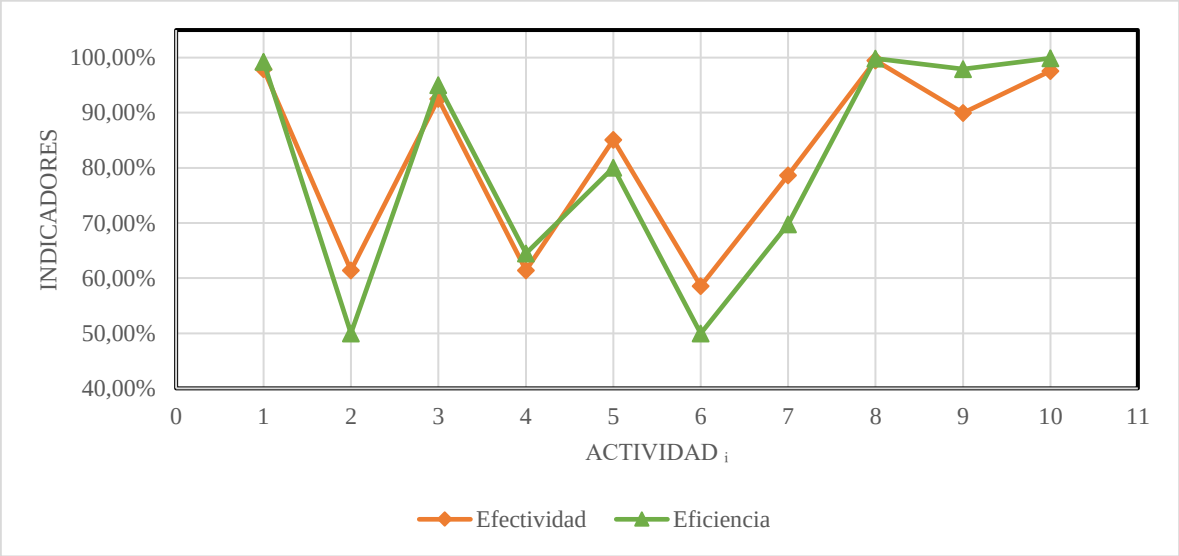


Figura 11. Gráfico 4 de la herramienta: Eficiencia del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 11:

- Los **rombos naranjos** muestran el indicador de efectividad de la actividad de mantenimiento i.
- **Los triángulos verdes** muestran el indicador de eficiencia de la actividad de mantenimiento i.

El gráfico 4 permite relacionar y ver por actividad la influencia de los indicadores de eficiencia de los recursos de mantenimiento en los indicadores de efectividad del plan de mantenimiento.

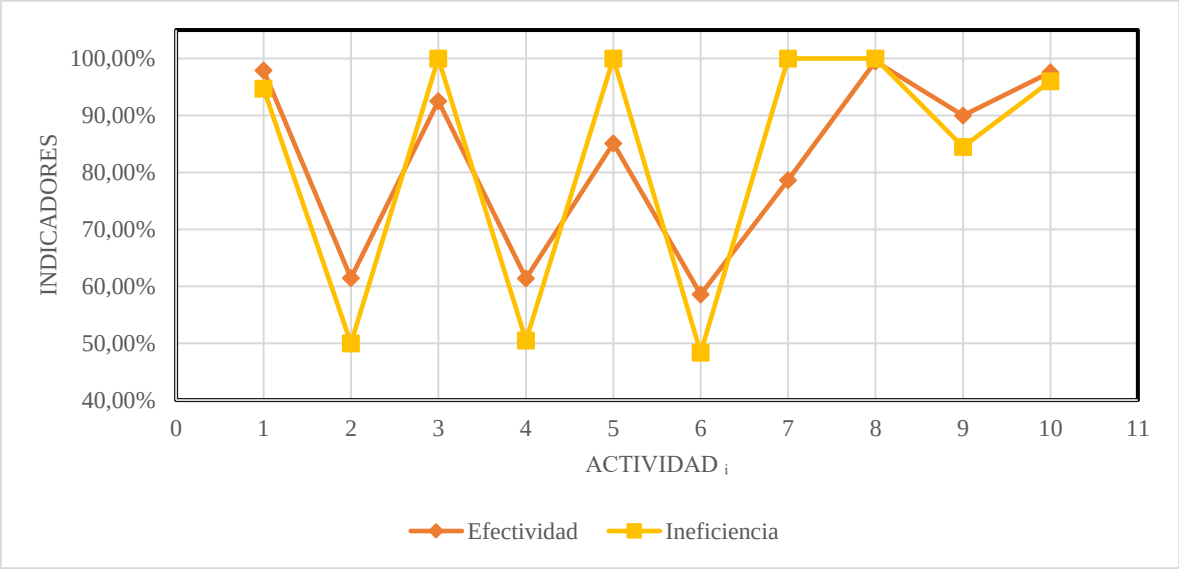


Figura 12. Gráfico 5 de la herramienta. Ineficiencia del plan de mantenimiento según la actividad. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 12:

- Los **rombos naranjos** muestran el indicador de efectividad de la actividad de mantenimiento i.
- Los **cuadrados amarillos** muestran el indicador de ineficiencia de la actividad de mantenimiento i.

El gráfico 5 permite relacionar y ver por actividad la influencia de los indicadores de ineficiencia de los recursos de mantenimiento en los indicadores de efectividad del plan de mantenimiento.

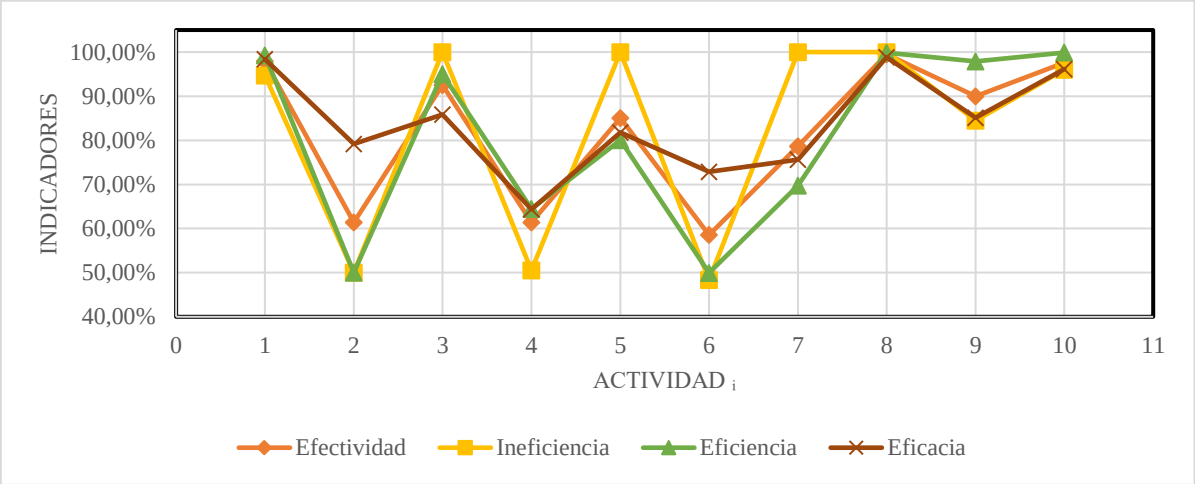


Figura 13. Gráfico 6 de la herramienta. Efectividad del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 6:

- Los **rombos naranjos** muestran el indicador de efectividad de la actividad de mantenimiento *i*.
- Las **equis rojas** muestran el indicador de eficacia de la actividad de mantenimiento *i*.
- Los **triángulos verdes** muestran el indicador de eficiencia de la actividad de mantenimiento *i*.
- Los **cuadrados amarillos** muestran el indicador de ineficiencia de la actividad de mantenimiento *i*.

El gráfico 6 permite tener una visión general de los indicadores principales de efectividad, relacionar y ver por actividad la influencia de los indicadores de eficacia de las políticas de mantenimiento, influencia de los indicadores de eficiencia de los recursos de mantenimiento, de los indicadores de ineficiencia de los recursos de mantenimiento en los indicadores de efectividad del plan de mantenimiento.

El tercer grupo de gráficos es representado por las siguientes herramientas gráficas de los indicadores principales de desviación de la efectividad del plan de mantenimiento por actividad:

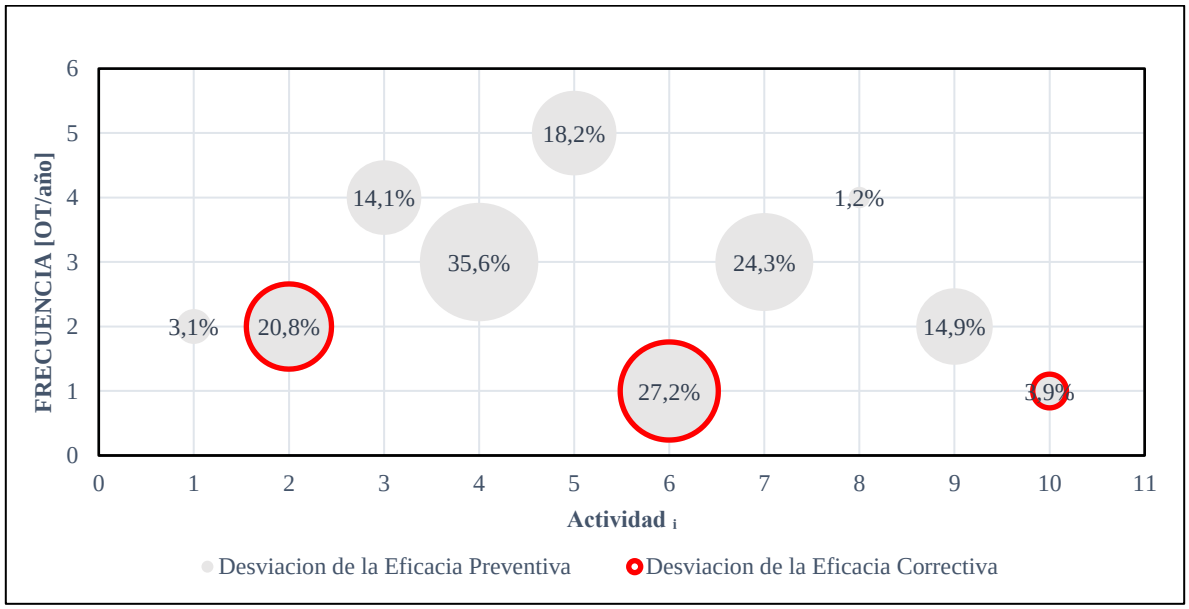


Figura 14. Gráfico 7 de la herramienta. Desviación de la eficacia del plan de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 14:

- El **contorno** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Sin contorno para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y contorno rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el indicador de desviación de la eficacia del plan de mantenimiento.

El gráfico 7, permite ver el indicador de desviación de la eficacia de la actividad i y la frecuencia real de aplicación de la política de mantenimiento según el tipo de mantenimiento y la actividad que atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución del indicador de desviación de la eficacia del plan por actividad de mantenimiento y el eje y indica la frecuencia de órdenes de trabajo.

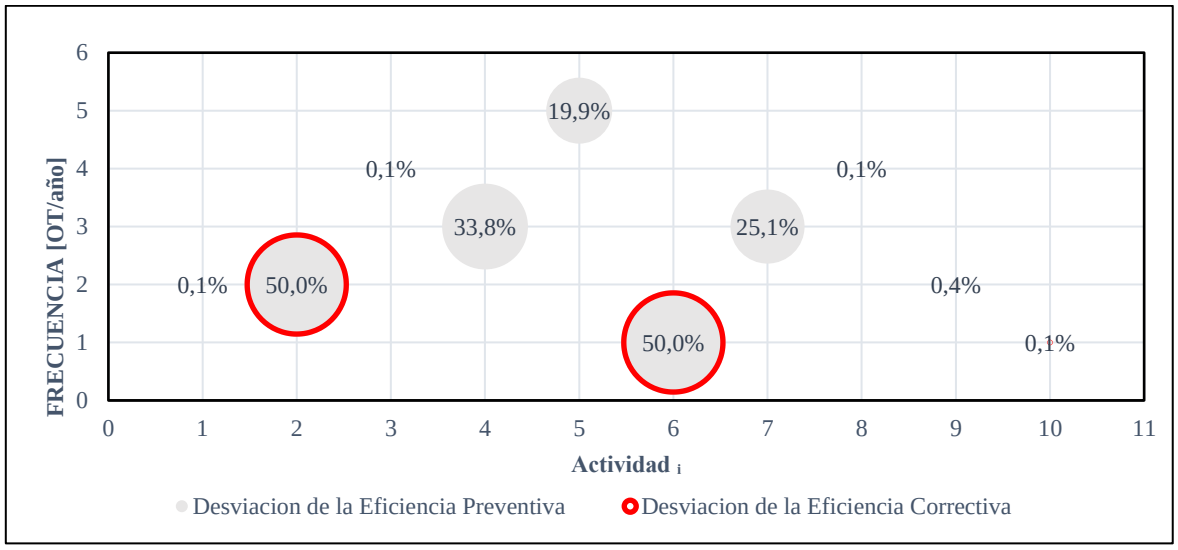


Figura 15. Gráfico 8 de la herramienta. Desviación de la eficiencia del plan de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 15:

- El **contorno** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Sin contorno para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y contorno rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el indicador de desviación de la eficiencia del plan de mantenimiento.

El gráfico 8 permite ver el indicador de desviación de la eficacia de la actividad i y la frecuencia real de aplicación de la política de mantenimiento según el tipo de mantenimiento y la actividad que atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución del indicador de desviación de la eficiencia del plan por actividad de mantenimiento y el eje y indica la frecuencia de órdenes de trabajo.

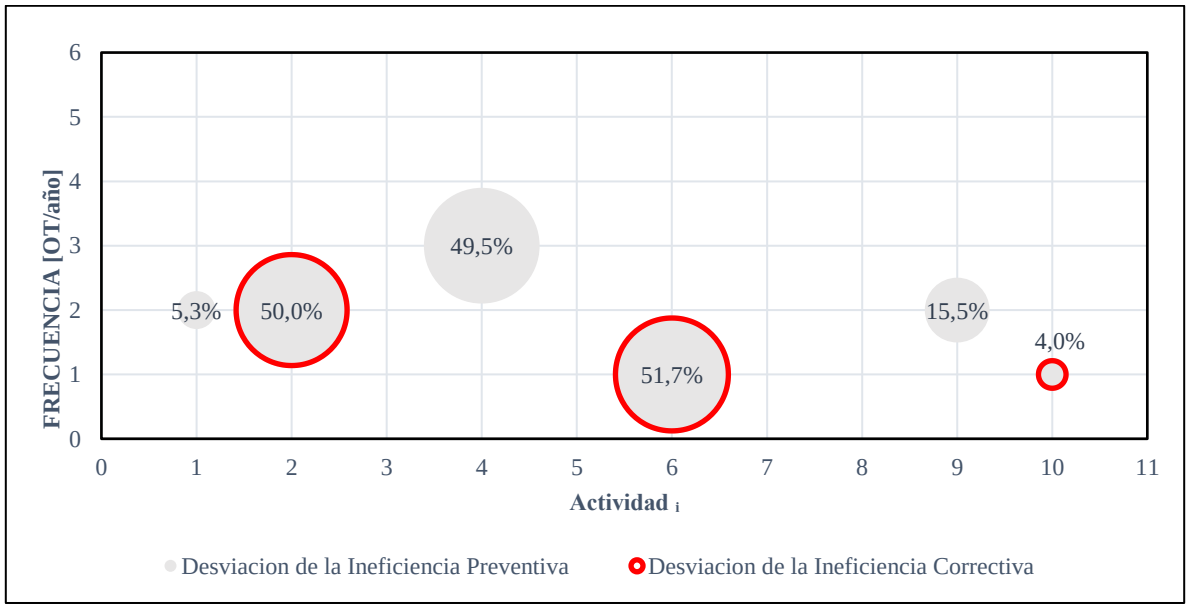


Figura 16. Gráfico 9 de la herramienta. Desviación de la ineficiencia del plan. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura 16:

- El **contorno** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Sin contorno para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y contorno rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el indicador de desviación de la ineficiencia del plan de mantenimiento.

El gráfico 9, permite ver el indicador de desviación de la ineficacia de la actividad i y la frecuencia real de aplicación de la política de mantenimiento según el tipo de mantenimiento y la actividad que atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución del indicador de desviación de la ineficiencia del plan por actividad de mantenimiento y el eje y indica la frecuencia de órdenes de trabajo. Las actividades no graficadas son aquellas que tienen un valor de desviación de la ineficiencia igual a 0%.

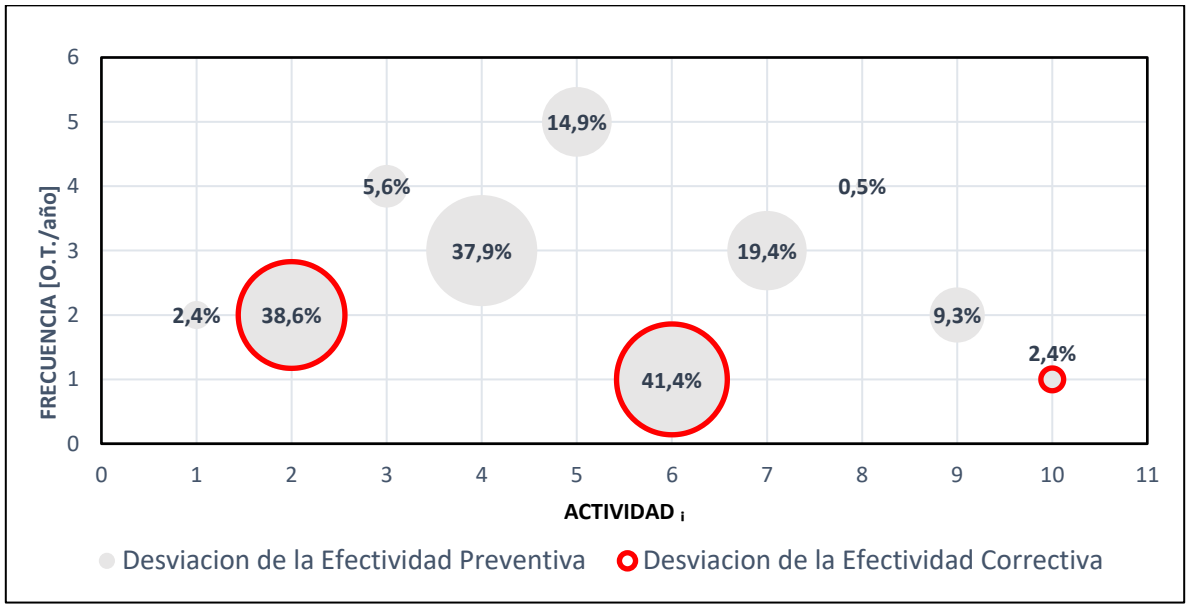


Figura 17. Gráfico 10 de la herramienta. Desviación de la efectividad del plan de mantenimiento por actividad. (Fuente: Elaboración propia)

Se deben tener las siguientes consideraciones para el grafico de la figura X:

- El **contorno** de la burbuja representa el tipo de mantenimiento que se le da al modo de falla j. Sin contorno para el mantenimiento preventivo (PM, CBM y PrM) y contorno rojo para el mantenimiento correctivo (CM).
- El **tamaño del diámetro** representa el indicador de desviación de la efectividad del plan de mantenimiento

El gráfico 10, permite ver el indicador de desviación de la efectividad de la actividad i y la frecuencia real de aplicación de la política de mantenimiento según el tipo de mantenimiento y la actividad que atiende, la evolución del diámetro indica el aumento/disminución del indicador de desviación de la efectividad del plan por actividad de mantenimiento y el eje y indica la frecuencia de órdenes de trabajo.

Control del plan

El control del plan otorga información acerca de los indicadores más importantes de la herramienta. Es por lo anterior, que en primer lugar se interpretan esto indicadores según la elaboración de un nivel de cumplimiento.

Tabla 41. Ejemplo de la interpretación del cumplimiento de expectativa según nivel de cumplimientos.

Nivel de cumplimiento	Cumplimiento de Expectativa [%]
Muy Bueno	90-100
Bueno	65-80
Medianamente Bueno	40-65
Malo	20-40
Muy Malo	0 a 20

(Fuente: Elaboración propia)

El control del plan se compone de dos partes, las cuales permiten identificar el nivel de cumplimiento del indicador de efectividad por política de mantenimiento y por actividad de mantenimiento.

Tabla 42. Control del plan a través de los indicadores de efectividad a nivel de las políticas de mantenimiento.

Política de Mantenimiento	Nivel de cumplimiento	% de cumplimiento de expectativa
PA_i	Muy bueno/bueno medianamente bueno/malo/muy malo	E_{PA_i}
…	..	…

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 43. *Control del plan a través de los indicadores de efectividad a nivel de las actividades.*

Actividades	Política de Mantenimiento	Nivel de cumplimiento	% de cumplimiento de expectativa
Actividad i	PA_i	Muy bueno/bueno medianamente bueno/malo/muy malo	$E_i^{PA_i}$
…	…	..	…

(Fuente: Elaboración propia)

Además, al control del plan debe incorporar información acerca de la descripción del cumplimiento, las causas de este cumplimiento según el análisis y propuesta de mejoras del plan de mantenimiento por política y actividad de mantenimiento.

7.2.6. Preguntas de Interés

A continuación, se presentan preguntas relevantes a las que la herramienta de control da una respuesta total o parcial:

Desde una perspectiva a nivel de política de mantenimiento:

¿Cuál es el porcentaje de efectividad de las políticas del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de eficacia en la aplicación de las políticas del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de eficiencia de los recursos de mantenimiento de las políticas del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de ineficiencia de los recursos de mantenimiento de las políticas del plan de mantenimiento?

Desde una perspectiva a nivel actividades de mantenimiento:

¿Cuál es el porcentaje de efectividad de las actividades del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de eficacia en la aplicación de las actividades del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de eficiencia de las actividades del plan de mantenimiento?

¿Cuál es el porcentaje de ineficiencia de las actividades del plan de mantenimiento?

Desde una perspectiva a nivel modos de falla:

¿Cuál es el porcentaje de cobertura en costos que asumen las actividades según los modos de falla?

¿Cuál es el porcentaje de cobertura en tiempo que asumen las actividades según los modos de falla?

8. ANÁLISIS Y RESULTADOS (Aplicado a datos de ejemplo)

Para el análisis y resultados, se le aplica un caso real a la herramienta y se deja que esta muestre los resultados obtenidos a través de los árboles de valor y las herramientas gráficas de apoyo. Tanto los arboles de valor como las herramientas gráficas, necesitan de un análisis posterior para evaluar el desarrollo de plan de mantenimiento a través de las políticas, actividades y modos de falla.

8.1. Análisis de los indicadores de efectividad del plan por política de mantenimiento

Para un correcto análisis se separa esta sección entre los arboles de valor que constituyen cada una de las políticas de mantenimiento otorgándole un indicador de efectividad y de desviación de la efectividad. A continuación, se muestran los resultados del análisis desde el punto de vista de los indicadores de efectividad (eficacia, eficiencia e ineficiencia) y la degradación de estos a su mínimo nivel:

8.1.1. Mantenimiento Correctivo (CM)

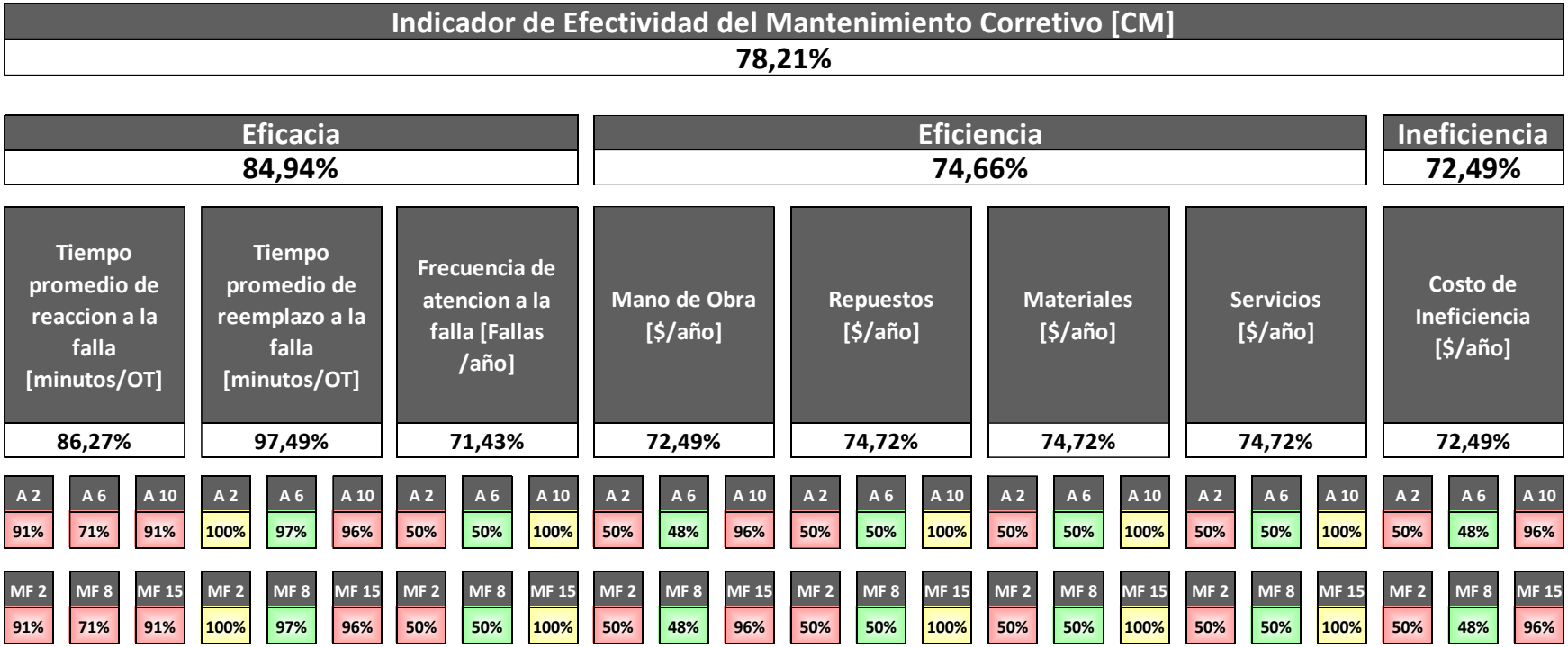


Figura 18. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento correctivo (CM). (Fuente: Elaboración propia)

Indicador de Efectividad

El indicador de efectividad para el mantenimiento correctivo es el más bajo de las políticas de mantenimiento, cumple en un 78,21% el logro de los resultados programados en el tiempo y los costos planificados para las actividades de mantenimiento que son mantenidas a la falla. Este número se justifica principalmente por un déficit en los costos debido a que la eficiencia y la ineficiencia hacen disminuir el indicador de efectividad a diferencia de la eficacia de aplicación de las políticas que favorece la efectividad del plan.

Indicador de Eficacia

El indicador de eficacia de la aplicación de las políticas de mantenimiento es el más alto de los tres indicadores de efectividad con un 84,94%, el cual es explicado principalmente por una muy alta eficacia del tiempo promedio de reemplazo a la falla sobre todo en la actividad 2 y una no muy buena frecuencia de atención a la falla justificada por el bajo rendimiento de la actividad 2 y 6 en este punto, ya que para este mantenimiento la frecuencia de las órdenes de trabajo se ajustan según la necesidad o falla del sistema.

Indicador de Eficiencia

El indicador de eficiencia de los recursos de mantenimiento es bajo con un 74,66% el cual es explicado principalmente por el alto valor de los repuestos para el mantenimiento correctivo y la dificultad que existe de predecir la cantidad de fallas que pueda llegar a tener los modos de falla atendidos por la actividad 2 y 6.

Indicador de Ineficiencia

El indicador de ineficiencia de los recursos de mantenimiento es el más bajo de los indicadores de efectividad debido a un mayor valor en la realidad del tiempo fuera de servicio que lo esperado en la actividad 2 y a el menor valor en la realidad del tiempo fuera de servicio que lo esperado en la actividad 6.

8.1.2. Mantenimiento Preventivo (PM)

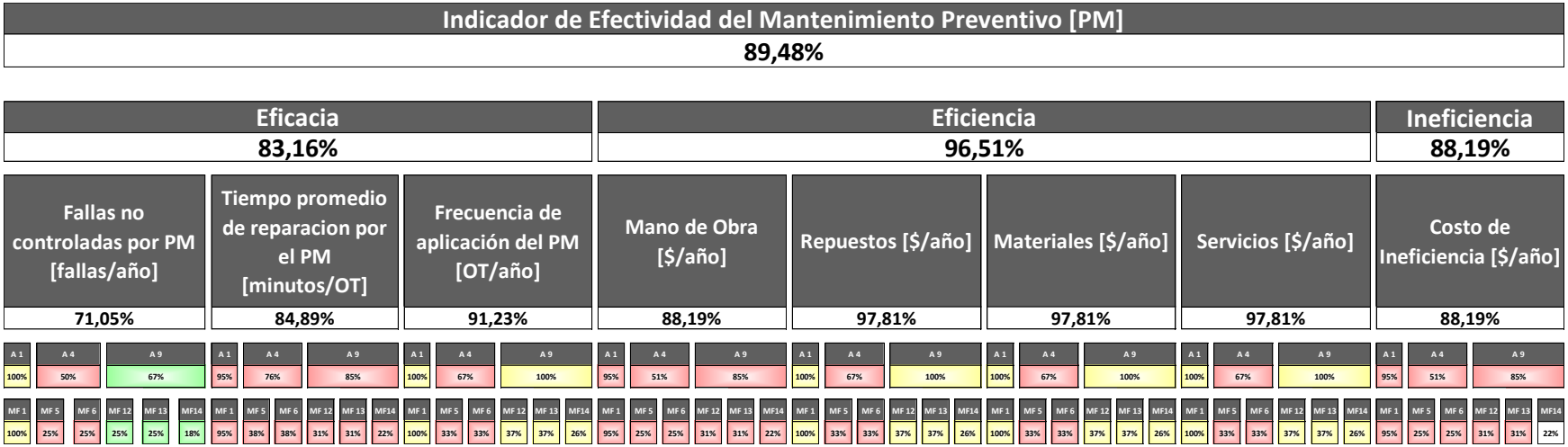


Figura 19. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento preventiva (PM). (Fuente: Elaboración propia)

Indicador de Efectividad

El indicador de efectividad del mantenimiento preventivo es el segundo más alto dentro de los indicadores de efectividad con un 89,48% por lo que el cumplimiento de objetivos y necesidades de la empresa es alto debido principalmente a una muy alta eficiencia de los recursos de mantenimiento, por lo que en términos de costos la política preventiva está bien utilizada para este grupo de actividades.

La desviación de la efectividad del mantenimiento preventivo muestra que el desempeño real de la política preventiva se diferencia con el desempeño esperado de la política en un 10,52% explicada por la baja eficacia que posee.

Indicador de Eficacia:

El indicador de eficacia de la política preventiva es el más bajo de los tres indicadores principales con un 83,16%, debido principalmente a una baja adherencia de las fallas no controladas por PM con respecto a lo esperado de un 71,16%, explicadas con el 50% y 67% de eficacia de las actividades 4 y 9 respectivamente las que se pueden interpretar como la no conformidad de la compañía con la capacidad y condición de los activos o la reducción del costo total.

Indicador de Eficiencia:

El indicador de eficiencia de la política preventiva es el más alto de los indicadores de efectividad con un 96,51% por lo que podemos decir que las diferentes actividades de

mantenimiento que componen esta política están siendo desarrolladas de buena forma permitiendo minimizar los costos directos. Este valor se explica mayormente por la alta sincronización entre el desempeño real de los materiales de mantenimiento con el desempeño planificado de las actividades preventivas.

Indicador de Ineficiencia:

El indicador de ineficiencia del mantenimiento preventivo de un 88,6% se explica por el alto costo de oportunidad real de la aplicación de la política con respecto a el costo de oportunidad planificado de la actividad 4 que se contrapone con la actividad 1 que posee una ineficiencia del 95% evidenciando una mayor sincronía entre el tiempo fuera de servicio real de aplicación de la política con el tiempo fuera de servicio planificado.

8.1.3. Mantenimiento según Condición (CBM)

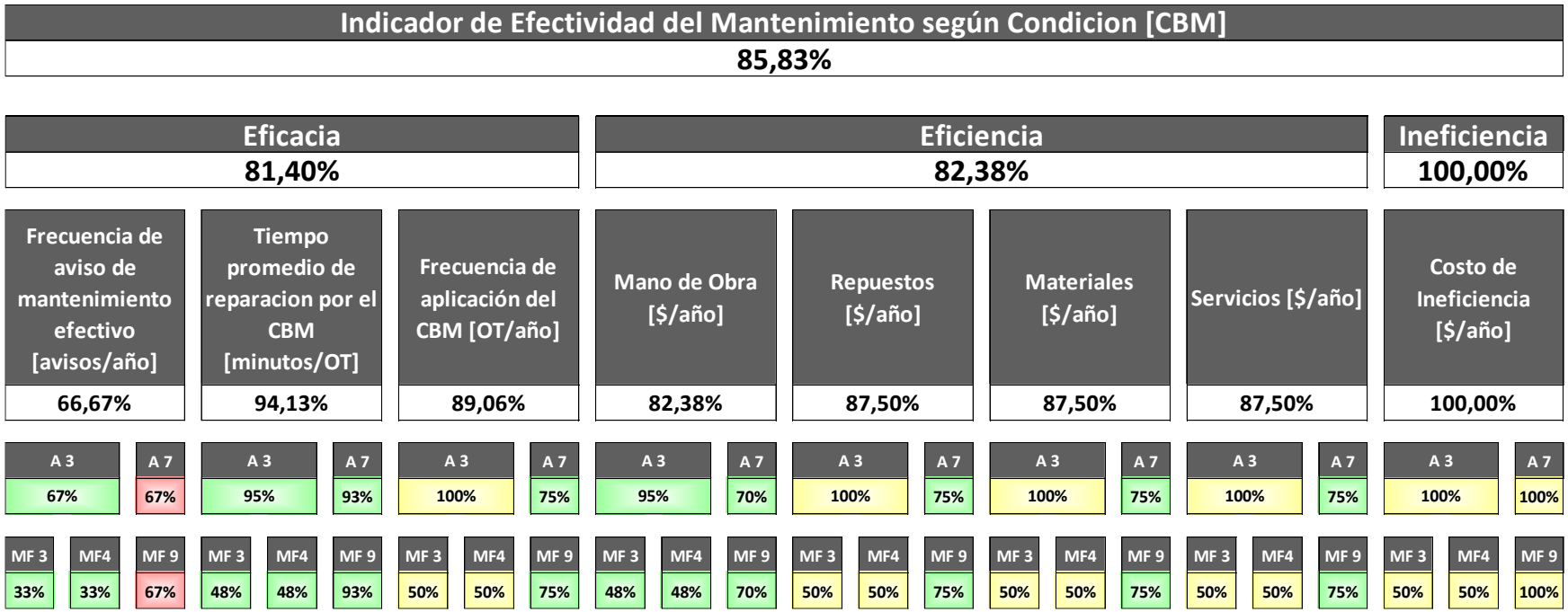


Figura 20. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento según condición (CBM). (Fuente: Elaboración propia)

Indicador de Efectividad

El indicador de efectividad del mantenimiento según condición, puede explicar el 85,83% debido a la ineficiencia perfecta que tiene de un 100,00% que, si bien asume un ponderador bajo, es el indicador que más ayuda a un mayor indicador de efectividad. La desviación de la efectividad de esta política es de un 14,17% lo cual refleja el porcentaje de diferencia entre el desempeño real y el desempeño esperado que es medianamente baja. La eficacia y la eficiencia del mantenimiento según condición representan los valores que equilibran el indicador de efectividad.

Indicador de Eficacia:

La eficacia de la política según condición es de un 81,40% que es el más bajo de los principales indicadores de efectividad explicado mayormente por la baja cercanía de la frecuencia de aviso de mantenimiento efectivos que en la actividad 3 es de un 67% positivo y en la actividad 7 de un 67% negativo.

Indicador de Eficiencia:

La eficiencia de la política según condición es de un 82,83% la cual se explica principalmente por el costo de mano de obra y su eficiencia de un 82,83% ya que para esta política solo se incurre en costos de mano de obra para realizar las inspecciones. Si bien no es el mejor porcentaje tiene una muy buena interpretación debido a que las actividades que

lo constituyen, 3 y 7 presentan una eficiencia del 95% y 70% positiva, esto quiere decir que el desempeño real de la eficiencia de esta política es mejor que su desempeño esperado.

Indicador de Ineficiencia:

El indicador de ineficiencia del mantenimiento según condición es perfecto, esto quiere decir que tiene una adherencia del 100% explicado por el nulo tiempo fuera de servicio que tiene esta política debido a que las intervenciones realizadas por las actividades 3 y 7 no requieren de la detención del sistema.

8.1.4. Mantenimiento Predictivo (PrM)

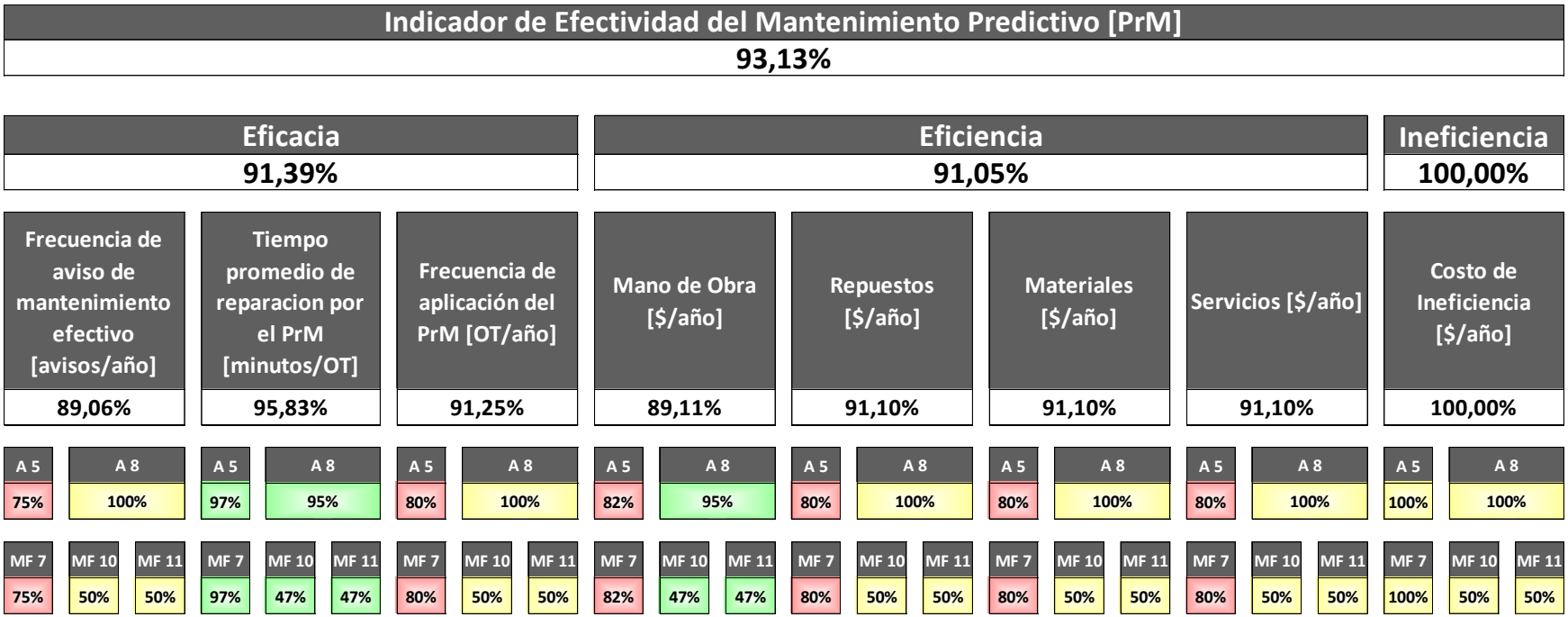


Figura 21. Árbol de valor de la efectividad de la política de mantenimiento predictivo (PrM). (Fuente: Elaboración propia)

Indicador de Efectividad

El indicador de efectividad del mantenimiento predictivo es el más alto de las políticas de mantenimiento con un 93,13%, el cual se explica principalmente por los altos indicadores de eficacia y eficiencia y el perfecto indicador de ineficiencia que tiene. El valor de desviación de la efectividad para esta política es de un 7,87% que representa una gran cercanía entre el desempeño real y el desempeño esperado siendo este mantenimiento el más cerca de la adherencia perfecta. Este mantenimiento consta de mediciones en cada actividad lo que puede facilitar una mayor anticipación a la falla y por lo tanto una mayor efectividad dentro del plan 7,87%

Indicador de Eficacia:

El indicador de eficacia del mantenimiento predictivo muestra que, dada la expectativa de resultados de las políticas de mantenimiento, esta política cumple en un 91,13% lo planificado. Este alto porcentaje se puede explicar por el 95,83% de adherencia del indicador de tiempo promedio de reparación por PrM que es apoyado por buenos indicadores de frecuencia de aviso de mantenimiento efectivo y frecuencia de aplicación.

Indicador de Eficiencia:

El indicador de eficiencia del mantenimiento predictivo es de un 91,05% el cual es explicado principalmente por el costo de servicios al que incurre esta política el cual posee una eficiencia del 91,10% que se basa en el 100% de adherencia que otorga el indicador

de la actividad 8 por lo tanto esta actividad está funcionando perfectamente de acuerdo con lo planificado por la gestión de mantenimiento.

Indicador de Ineficiencia:

El indicador de ineficiencia del mantenimiento predictivo al igual que el mantenimiento según condición es perfecto (100%) debido a que en este mantenimiento no es necesario que se detenga el sistema para la aplicación de la política por lo que el tiempo fuera de servicio no es tomado en cuenta para el cálculo del costo de oportunidad.

8.2 Análisis de las herramientas gráficas de apoyo

8.2.1. Matrices de Cobertura

Matrices de cobertura en costo

A continuacion se presentan los resultados de las matrices de cobertura en costos:

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1	98%														
Actividad 2															
Actividad 3			95%	95%											
Actividad 4					51%	51%									
Actividad 5							80%								
Actividad 6															
Actividad 7									70%						
Actividad 8										100%	100%				
Actividad 9												91%	91%	91%	
Actividad 10															

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1															
Actividad 2		50%													
Actividad 3															
Actividad 4															
Actividad 5															
Actividad 6								50%							
Actividad 7															
Actividad 8															
Actividad 9															
Actividad 10															100%

Figura 22. Matrices de cobertura en costo de mantenimiento para los modos de falla atendidos preventivamente y a la falla. (Fuente: Elaboración propia)

La matriz de cobertura, muestra la diferencia porcentual entre la cobertura esperada y la cobertura real por modo de falla. Estos resultados evidencian el nivel de adherencia de la cobertura en costos que le da cada actividad a los modos de falla, pudiendo de esta forma encontrar el modo de falla que necesita un mejor mantenimiento (MF2, MF5, MF6 y MF8).

Matrices de cobertura en tiempo

A continuacion se presentan los resultados de las matrices de cobertura en tiempo:

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1	95%														
Actividad 2															
Actividad 3			0%	0%											
Actividad 4					51%	51%									
Actividad 5							0%								
Actividad 6															
Actividad 7									0%						
Actividad 8										0%	0%				
Actividad 9												85%	85%	85%	
Actividad 10															

	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11	MF12	MF13	MF14	MF15
Actividad 1															
Actividad 2		50%													
Actividad 3															
Actividad 4															
Actividad 5															
Actividad 6								48%							
Actividad 7															
Actividad 8															
Actividad 9															
Actividad 10															96%

Figura 23. Matrices de cobertura en tiempo fuera de servicio por el mantenimiento para los modos de falla atendidos preventivamente y a la falla. (Fuente: Elaboración propia)

La matriz de cobertura muestra la diferencia porcentual entre la cobertura esperada y la cobertura real en terminos del tiempo fuera de servicio en que incurre la actividad por cada modo de falla que atiende. Estos resultados evidencian el nivel de adherencia de la cobertura en tiempo fuera de servicio que le da cada actividad a los modos de falla, pudiendo de esta forma encontrar el modo de falla que necesita un mejor mantenimiento o siendo mas especifico una mejora en el indicador del tiempo de duracion del

reemplazo/reparacion (MF2, MF5, MF6 y MF8). Las coberturas de un 0% se refieren princuipalmente a modods de falla atendidos por CBM o PrM.

8.2.2. Patrones Gráficos

Desempeño del plan por modo de falla

Gráfico 1 de la herramienta: Desempeño esperado del plan de mantenimiento por modo de falla (ver figura 8)

Mediante este gráfico de burbujas es posible ver la cobertura esperada que se le otorga a cada modo de falla, el objetivo de éste es de identificar el tiempo fuera de servicio esperado y el costo directo esperado de mantenimiento por modo de falla. El modo de falla 2 y el modo de falla 15 destacan por sobre el resto debido a que se espera lideren tanto en los costos como en el tiempo fuera de servicio, esto principalmente por el mantenimiento correctivo al que están sometidos, el cual tiene grandes tiempos de reemplazo aumentando el tiempo fuera de servicio y grandes costos de repuestos aumentando los costos de mantenimiento. De los modos de falla atendidos preventivamente el modo de falla 1 es el que se espera cuente con un mayor tiempo fuera de servicio debido a que es atendido por una actividad directamente y posee uno de los tiempos de reparación más grandes, además se espera que el mayor costo directo de los modos de falla atendidos preventivamente sea del modo de falla 7 que es el con mayor costo por servicio.

Gráfico 2 de la herramienta: Desempeño real del plan de mantenimiento por modo de falla (ver figura 9).

Mediante este gráfico de burbujas es posible ver la cobertura real que se le otorga a cada modo de falla, el objetivo de este grafico es de identificar el tiempo fuera de servicio real y el costo directo real de mantenimiento por modo de falla. El modo de falla 2 y el modo de falla 15 también destacan en la aplicación real del mantenimiento, pero esta vez cambiando el orden pasando a ser el modo de falla 2 el que tenga el mayor tiempo fuera de servicio y el mayor costo directo de mantenimiento. El modo de falla 1 sigue siento el modo de falla atendido preventivamente con mayor tiempo fuera de servicio y el modo de falla 7 también sigue siendo el que tenga el mayor costo directo de mantenimiento, pero esta vez aumentando en cerca de un 25% el costo debido a una mayor cantidad de fallas.

Desviación de la efectividad por actividad de mantenimiento

Gráfico 7 de la herramienta: Indicadores de desviación de la eficacia del plan de mantenimiento por actividades (ver figura 14)

Este gráfico de burbujas busca diferenciar a través de política de mantenimiento preventiva y a la falla el valor de la desviación del indicador de eficacia según la frecuencia de aplicación de la política y la actividad de mantenimiento. La desviación más grande que se produce en la eficacia de las actividades se encuentra en la actividad preventiva 4 con un 35,6% ya que es la actividad que posee peores indicadores del mantenimiento preventivo y por lo tanto más lejanía entre la eficacia esperada de la actividad y la eficacia real de la

actividad. La desviación más pequeña se produce en la actividad preventiva 8 que es la que mayor sincronía tiene entre la eficacia esperada y la eficacia real.

Gráfico 8 de la herramienta: Indicadores de desviación de la eficiencia del plan de mantenimiento por actividades (ver figura 15)

Este gráfico de burbujas busca diferenciar a través de política de mantenimiento preventiva y a la falla el valor de la desviación del indicador de eficiencia según la frecuencia de aplicación de la política y la actividad de mantenimiento. La desviación más grande que se produce en la eficiencia es en las actividades correctivas 2 y 6, siendo esta última una de las actividades con menor frecuencia de aplicación de la política. Esto se debe principalmente al alto costo de repuestos que tiene que incurrir la política correctiva, lo que hace que se amplifique la variación de intervenciones entre lo esperado a ejecutar y lo finalmente ejecutado

Gráfico 9 de la herramienta: Indicadores de desviación de la ineficiencia del plan de mantenimiento por actividades (ver figura 16).

Este gráfico de burbujas busca diferenciar a través de política de mantenimiento preventiva y a la falla el valor de la desviación del indicador de ineficiencia según la frecuencia de aplicación de la política y la actividad de mantenimiento. La desviación más grande que se produce en la ineficiencia es en las actividades correctivas 2 y 6, esto comprueba la deficiencia en los recursos planificados versus los recursos realmente necesarios, a estas dos actividades los sigue muy de cerca la actividad preventiva 4 el cual se destaca dentro de las actividades preventivas por la diferencia que tiene entre el tiempo

fuera de servicio real y planificado. Por otro lado, la actividad con menor desviación y más cercana a lo planificado es la 10 con un 4% debido a su mínima variación en el tiempo fuera de servicio. Cabe destacar que la política de mantenimiento según condición y predictiva no presentan indicadores de ineficiencia debido a que sus actividades no requieren de detención del sistema por lo que su aplicación no conlleva tiempo no operacional.

Gráfico 10 de la herramienta: Indicadores de desviación de la efectividad del plan de mantenimiento por actividades (ver figura 17).

Este gráfico de burbujas busca diferenciar a través de política de mantenimiento preventiva y a la falla el valor de la desviación del indicador de efectividad según la frecuencia de aplicación de la política y la actividad de mantenimiento. La desviación más grande que se produce en la efectividad tiene directa relación con los análisis previos debido a que la actividad correctiva 6 es el mayor valor con un 41,4%. La menor desviación ocurre en la actividad preventiva 8 con un 0,5% de lejanía con lo planificado por lo que es el que más cerca de lo óptimo estuvo.

Filtro para los indicadores principales de efectividad del plan según política de mantenimiento

Para realiza un análisis más específico del plan de mantenimiento se filtran los gráficos de dispersión de los indicadores principales según las políticas de mantenimiento, de esta forma junto con los árboles de valor por se puede establecer un panel de control de la efectividad por cada una de las políticas de mantenimiento. A continuación, se muestran

los gráficos de dispersión de los indicadores principales de efectividad filtrados según mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento según condición y mantenimiento predictivo:

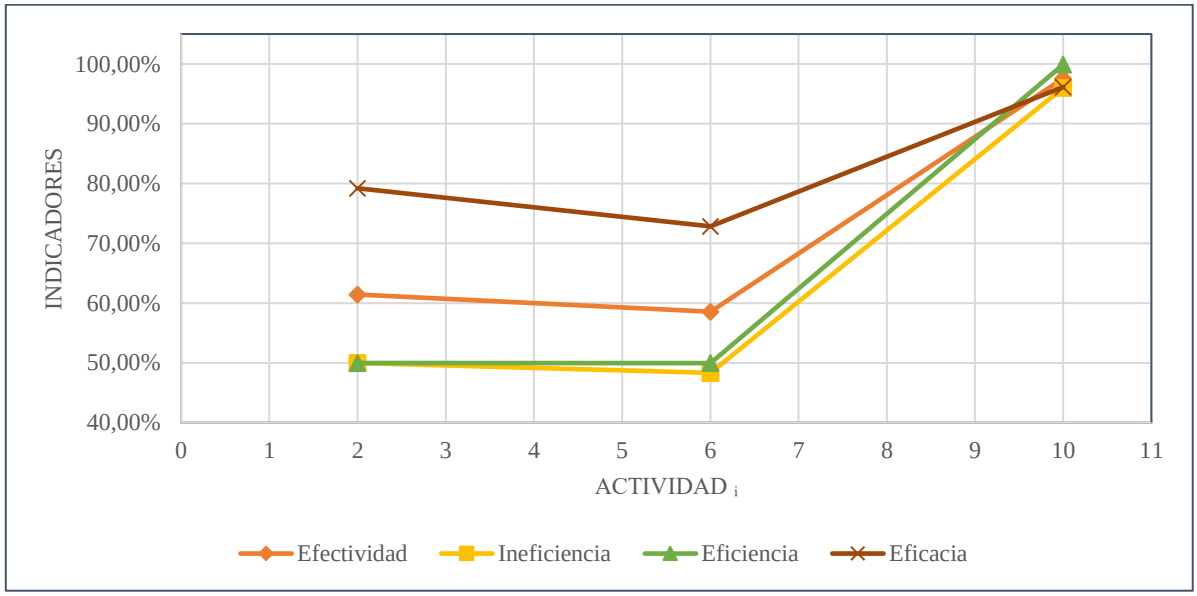


Figura 24. Gráfico 11 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento correctivo. (Fuente: Elaboración propia)

Esta política de mantenimiento está compuesta por las actividades 2, 6 y 10 las cuales son atendidas a la falla, es por esto que se puede evidenciar en el gráfico que los indicadores más bajos con los que cuenta son la eficiencia y la ineficiencia debido a que estos miden principalmente los recursos económicos necesarios de mantenimiento y el costo de oportunidad que tiene el sistema al estar no operativo debido al reemplazo correctivo, y estos se ven directamente afectados directa e indirectamente por la falla del sistema. El mejor indicador observable es la eficacia por lo que la adherencia con la aplicación de las políticas de mantenimiento es sobresaliente respecto de los demás indicadores. Además, queda destacar a la actividad 10 la cual, a pesar de ser un

mantenimiento correctivo, los indicadores y herramientas gráficas demuestran que una actividad tendrá buenos indicadores independiente de la política que utilice, lo importante es que la ejecución del plan de mantenimiento sea acorde a lo planificado.

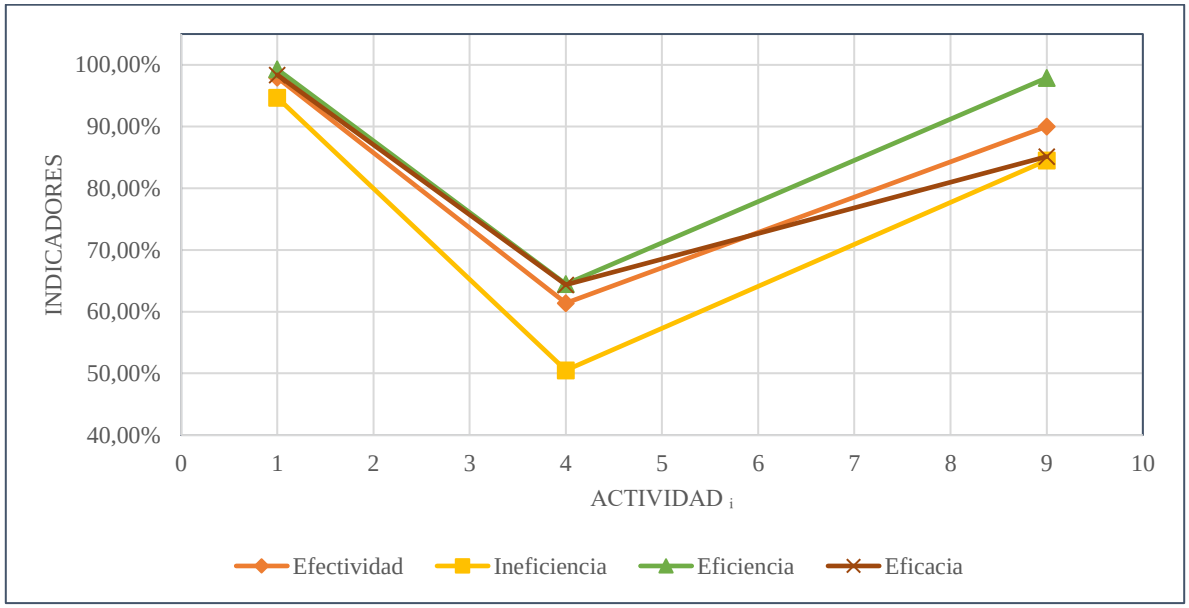


Figura 25. Gráfico 12 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento preventivo. (Fuente: Elaboración propia)

La política de mantenimiento preventiva está compuesta de las actividades 1, 4 y 9 las cuales son atendidas preventivamente a través de intervenciones cíclicas. Con el gráfico se pueden evidenciar buenos indicadores de efectividad en la actividad 1 y 9, los cuales confirman que el porcentaje de adherencia con la planificación de esta política es superior al 80% y muestran que la eficiencia de los recursos es uno de los mejores indicadores con los que cuenta esta política en estas dos actividades concluyendo que la efectividad de los recursos económicos es alta en comparación con la expectativa creada. La actividad presenta indicadores muy bajos, que se pueden desagregar en la baja adherencia de la

frecuencia de aplicación de PM (66,67%) y la baja adherencia de las fallas no controladas por el mantenimiento que se traduce en un indicador de ineficiencia del 50% y un indicador de eficiencia 64,47% provocando que sea una de las actividades menos efectivas del plan con un 61,42%.

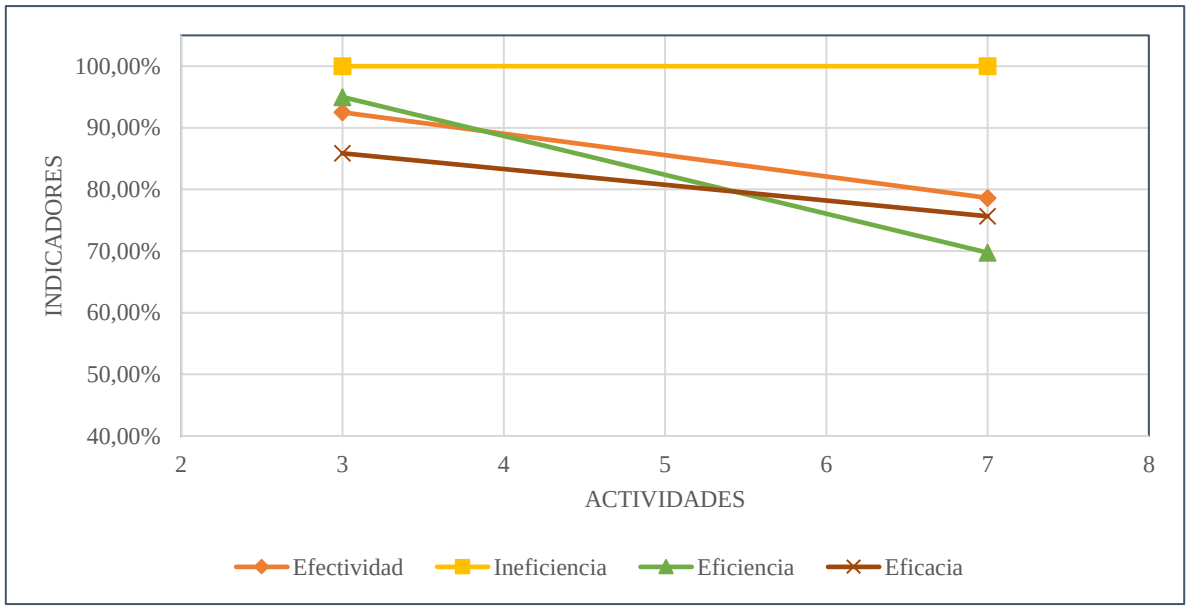


Figura 26. Gráfico 13 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento según condición. (Fuente: Elaboración propia)

El mantenimiento según condición este compuesto por las actividades 3 y 7, las cuales son atendidas preventivamente a través de la inspección de su condición. Debido a que en este caso el mantenimiento según condición no genera ninguna detección del sistema durante su aplicación es que el costo de ineficiencia es 0 otorgando un indicador de adherencia de la ineficiencia del 100%. La actividad 3 tiene mejor indicador de efectividad debido a que posee tanto mejores indicadores de eficacia como de eficiencia, debido al alto valor del indicador de adherencia de la frecuencia de aplicación de la política y por lo tanto

una alta relación entre el desempeño en costos esperados con el real aplicado. La actividad 7 posee menores indicadores, primero la eficacia es afectada por la baja adherencia del indicador de frecuencia de aviso de mantenimiento y la eficiencia afectada directamente por la baja adherencia de los costos de mano de obra sin embargo esta baja adherencia es producida por una disminución en los costos y no un aumento de la realidad especto a lo esperado.

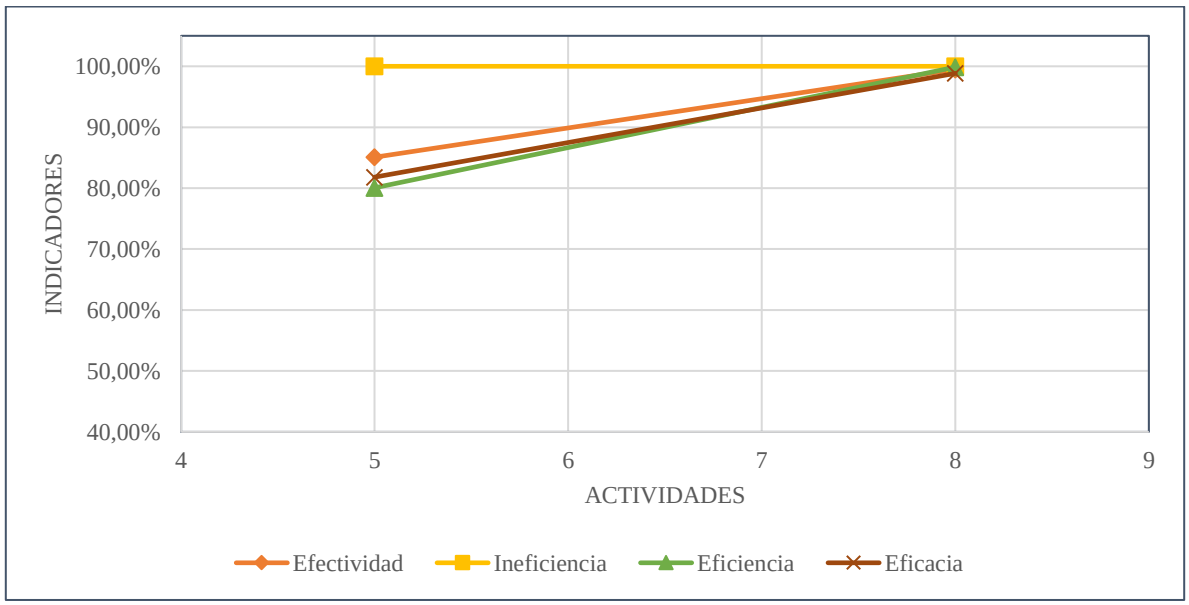


Figura 27. Gráfico 14 de la herramienta. Principales indicadores de efectividad filtrados según el mantenimiento predictivo. (Fuente: Elaboración propia)

El mantenimiento predictivo este compuesto de las actividades 5 y 8 las cuales son mantenidas preventivamente a través de la predicción de falla según mediciones y estimaciones del comportamiento de los modos de falla que ataca. Para el mantenimiento predictivo ocurre lo mismo que en el mantenimiento según condición, debido a que su aplicación en este caso no requiere de detención del sistema por lo que tiene un muy buen indicador de ineficiencia para ambas actividades de un 100%. La actividad 8 tiene los

mejores indicadores de todo el plan de mantenimiento, esto debido a su adherencia perfecta en dos de los tres indicadores del mantenimiento que definen la eficacia y altos niveles de adherencia en los costos de servicio y mano de obra. La actividad 5 tiene menores indicadores, en términos de la eficacia debido a su baja frecuencia de aviso de mantenimiento y baja frecuencia de aplicación de la política, y en términos de su eficiencia bajos niveles de adherencia tanto en la mano de obra como en los servicios usados de mantenimiento.

8.2.3. Resultados del control del plan

Los resultados del control del plan se muestran como resumen de los indicadores de efectividad obtenidos tanto por política de mantenimiento como por actividad

Tabla 44. *Análisis de resultados obtenidos en el control del plan por política de mantenimiento.*

Política de Mtto.	Nivel de cumplimiento	% de cumplimiento de expectativa	Descripción del cumplimiento
CM	Bueno	78,21%	Se ejecuta la política según necesidad, pequeño accidente en el rodete, con un buen tiempo de ejecución y menores costos en actividad 6 pero más en actividad 2
PM	Bueno	89,48%	Se ejecuta la política según programa, sin accidentes, con un buen tiempo de ejecución y costos según expectativa
CBM	Bueno	85,83%	Se ejecuta la política según programa, sin accidentes, con un buen tiempo de ejecución y costos mejores que expectativa.
PrM	Muy Bueno	93,13%	Se ejecuta la política según programa, sin accidentes, con un buen tiempo de ejecución y costos según expectativa.

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 45. Análisis de resultados obtenidos en el control del plan por actividad de mantenimiento.

Actividades	Política de Mtto.	Nivel de cumplimiento	% de cumplimiento de expectativa	Descripción del cumplimiento
Actividad 1	PM	Muy Bueno	97,93%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con un buen tiempo de ejecución y con costos según expectativa
Actividad 2	CM	Medianamente Bueno	61,42%	Se ejecuta actividad según necesidad, pequeño accidente en el rodete, con buen tiempo de ejecución, pero mayores costos.
Actividad 3	CBM	Muy Bueno	92,52%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y menores costos.
Actividad 4	PM	Medianamente Bueno	61,39%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con un regular tiempo de ejecución y con mayores costos.
Actividad 5	PrM	Bueno	85,08%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y costos cerca de la expectativa
Actividad 6	CM	Medianamente Bueno	58,55%	Se ejecuta actividad según necesidad, sin accidentes, con mejor tiempo de ejecución y menores costos.
Actividad 7	CBM	Bueno	78,64%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y mejores costos.
Actividad 8	PrM	Muy Bueno	99,49%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y costos según expectativa.
Actividad 9	PM	Bueno	89,99%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y con costos según expectativa.
Actividad 10	CM	Muy Bueno	97,58%	Se ejecuta actividad según programa, sin accidentes, con buen tiempo de ejecución y costos según expectativa.

(Fuente: Elaboración propia)

Cabe señalar que este análisis se puede extender a la explicación del cumplimiento según análisis propio y a propuestas de mejora acerca de las falencias del plan a cualquier nivel,

9. CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo consistió en elaborar una herramienta que permita cuantificar la efectividad real de la aplicación de un plan de mantenimiento de activos físicos en términos de la ejecución del plan y los resultados según la expectativa de este. El objetivo se llevó a cabo a través del desarrollo de esta herramienta.

Para lograrlo, fue necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- *Establecer un indicador de efectividad de la ejecución real del plan de mantenimiento para cada política definida según el nivel de expectativa creada, en tiempo y costo.*
- *Establecer un indicador de desviación de la ejecución real del plan de mantenimiento para cada política definida según el nivel de expectativa creada, en tiempo y costo.*
- *Incorporar a los indicadores herramientas graficas a nivel de actividad de mantenimiento y modos de falla, y una perspectiva de desagregación de los indicadores para su análisis hasta el mínimo nivel.*

El primero objetivo específico es el centro del trabajo, debido a que se logra a cabalidad la cuantificación de la efectividad del plan de mantenimiento tomando como base los costos y tiempos de su aplicación. Esta cuantificación depende fundamentalmente de la identificación de expectativas acerca del plan y el registro de su aplicación, lo cual permite obtener análisis de la evolución de los distintos parámetros que determina la efectividad como lo son la eficacia, eficiencia e ineficiencia. El indicador además reconoce la

diferencia de expectativas que se produce por las diferentes características de las políticas de mantenimiento, es por esto que, a partir de una planificación según el comportamiento de la política en particular, otorga indicadores de efectividad que permiten evaluar la política de la actividad de mantenimiento de forma más precisa.

El segundo objetivo específico se logra siendo un complemento del primero, debido a que otorga otra mirada a los indicadores de efectividad obtenidos. La desviación del plan se interpreta como el porcentaje de lejanía que tiene la ejecución real del plan con la planificación que se tenía de este en términos de tiempo y costos. La obtención de la desviación esta desagregada en todas las ramas del árbol de valor para de esta forma poder identificar cuáles son las causas de una desviación muy grande.

El tercer objetivo en específico se logra apoyando el entendimiento global de los indicadores de efectividad y desviación dentro del plan a través de la elaboración de herramientas graficas que miden el comportamiento de los indicadores principales en las distintas actividades de mantenimiento que componen el plan. Además, se logra la desagregación completa de cada uno de los indicadores hasta el mínimo nivel (modos de falla) los cuales permiten visualizar donde están las posibles fallas en la ejecución del plan llegando hasta el origen que produce esta falla.

Tanto los indicadores de efectividad y desviación como las herramientas gráficas permiten un análisis completo del plan de mantenimiento por política, por actividad y por modo de falla acorde a los requerimientos del usuario y por lo tanto es adaptable a cada caso de hoy en día en el área de mantenimiento de activos físicos. Esta adaptación es posible gracias a que se deja al usuario a cargo de que le otorgue la importancia que la

gestión de mantenimiento estime conveniente a cada uno de los factores que miden la efectividad de la política a través de las ponderaciones que tiene cada uno de los factores.

La herramienta de cuantificación está hecha para que el usuario pueda evidenciar en que aspecto está fallando según lo planificado, en qué porcentaje se diferencia y como identificar en que medición en específico el plan esta débil y podría ser mejorado. Es por esto que es muy útil para el mantenimiento de activos físicos altamente valiosos como lo es por ejemplo el área de minería ya que les permitiría realizar un mantenimiento ajustado a lo necesario para el continuo funcionamiento del equipo y una evaluación correcta de su desempeño.

Si bien la herramienta por medio de la eficacia, eficiencia e ineficiencia intenta tomar en cuenta la mayor cantidad de aspectos que influyen en una buena realización del plan de mantenimiento, cabe señalar que la herramienta creada puede ser complementada con una mayor cantidad de indicadores que abarque temas como la calidad del mantenimiento, periodicidad de mediciones del plan, entre otros factores para de esta forma obtener cada vez un indicador más preciso y que se ajuste a los requerimientos más específicos del usuario. Sin perjuicio de lo anterior la herramienta permite una cuantificación de la efectividad clara y muy completa en relación con los factores importantes que influyen en ella.

REFERENCIAS

Aguilar-Otero J.; Torres-Arcique R.; Magaña-Jiménez, D. (2010). Análisis de modo de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 15-26.

Ahmad R. y Kamaruddin S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 135-149.

Crespo, A., (2007). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems.* Inglaterra: Londres.

Fernández A., (2005*). Optimización del mantenimiento. Implementación de la metodología RCM en máximo*. España: Madrid.

Hernández, E. y Navarrete, E., (2001). Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento. *Revista Club de mantenimiento No 6*. Año 1. Brasil.

ISO 14224 (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.* United Kingdom.

Lindberg C. (2015). Key performance indicators improve industrial performance. *Energy Procedia*, 1785-1790

Mejia C., (2013). *Indicadores de efectividad y eficacia*. Colombia: Medellín.

Mishra R. (2006). Development of a framework for world-class maintenance systems. *Journal of Advanced Manufacturing*, 141-165.

Moubray, J., (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centered Maintenance*. Argentina: Buenos Aires. España: Madrid.

Nowlan, F. y Heap H., (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. United Airlines. EEUU: San Francisco.

Parra C., (2008). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centered Maintenance*. Inge Con. España: Sevilla.

Rausand M., (1998). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 121-132.

SAE-JA1012, N. O. R. M. A. S. (2002). SAE-JA1012. *Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. EE. UU.

Viveros, P.; Stegmaier, R.; Kristjanpoller, F.; Barberá, L.; Crespo, A., (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 125-138.

Zio E. (2013). Evaluating maintenance policies by quantitative modelling and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 53-65.