



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROPUESTA DE UN MODELO PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS
TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON EL PLAN DE
MANTENIMIENTO DEL MIXER 3 DEL ÁREA COMÚN DE
CONTINENTAL TIRE ANDINA S.A.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Mecánica

AUTORA: ALEGRIA ISABEL LLAGUARIMA PILLACELA

TUTOR: RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA

Cuenca – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alegria Isabel Llaguarima Pillacela con documento de identificación N° 0106934995 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 12 de febrero del 2026

Atentamente,



Alegria Isabel Llaguarima Pillacela
0106934995

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Alegria Isabel Llaguarima Pillacela con documento de identificación N° 0106934995, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Propuesta de un modelo para la integración de las técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento del Mixer 3 del Área Común de Continental Tire Andina S.A.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Mecánica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de febrero del 2026

Atentamente,



Alegria Isabel Llaguarima Pillacela

0106934995

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, René Vinicio Sánchez Loja con documento de identificación N° 0103409587, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PROPUESTA DE UN MODELO PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON EL PLAN DE MANTENIMIENTO DEL MIXER 3 DEL ÁREA COMÚN DE CONTINENTAL TIRE ANDINA S.A., realizado por Alegria Isabel Llaguarima Pillacela con documento de identificación N° 0106934995, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de febrero del 2026

Atentamente,



René Vinicio Sánchez Loja
0103409587

Dedicatoria

Me dedico este trabajo de titulación a mí misma porque aquí se ve reflejado todo mi esfuerzo y dedicación que puse a lo largo de estos cuatro años de universidad en la carrera de mecánica.

A mi docente tutor, Rene Vinicio Sánchez, por guiarme con todo su entusiasmo y tiempo para cumplir con este trabajo.

A esos profesores que estuvieron siempre pendientes de mi formación académica y de mi salud.

También dedico a mis compañeros de la carrera, con los que he compartido estos años de estudio, sobre todo a Freddy y Galo, quienes con su experiencia y compañerismo me guiaron y me dieron sus más sinceros consejos para continuar con esta etapa de mi vida y a seguir cumpliendo mis metas.

También quiero dedicar a mi familia, que me ha brindado su apoyo incondicional, su cariño, paciencia, comprensión y amor en todo este proceso de mi formación académica.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme salud, vida, fe, por acompañarme siempre en este proceso y en esta etapa de mi vida, por hacerme sentir la suficiente sabiduría para no rendirme y seguir de pie por eso me agradezco a mí misma por mantenerme siempre firme y constante, en mi desarrollo académico, a pesar de todos los obstáculos e inconvenientes que se tuvo en su momento, pero gracias a mi paciencia, voluntad y a mis ganas de salir adelante hoy estoy cumpliendo uno de todos los sueños y metas que tengo en mi vida.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi padre Manuel Llaguarrima, porque desde que inicié mi carrera universitaria me apoyó sin pensarlo, económica y emocionalmente, brindándome su cariño y amor para avanzar con esta nueva etapa de mi vida. También a mi madre Ana Pillacela, que con su amor de madre me ayudó a que todo este proceso sea más llevadero y sencillo. A mis queridas hermanas Tania, Ana y Lesly, que con sus sonrisas sinceras me motivaban a seguir luchando por mis sueños, y a mi hermano Byron, que con su honestidad y sinceridad siempre me mantuvo fuerte y decidida.

Agradezco al ingeniero Christian Cobos, quien fue con el que tuve mi primer contacto y también quien me ayudó a matricularme y ser parte de esta hermosa comunidad universitaria en la carrera de Mecánica una semana antes de que inicien clases, y de no haber sido por la ayuda del ingeniero, no me hubieran aceptado en la carrera. Agradezco a mi docente tutor, el ingeniero Rene Vinicio Sánchez, por haberme dado la apertura al grupo de investigación GIDTEC, por enseñarme muchas cosas y sobre todo por aceptar guiarme con mi trabajo de titulación, con toda su paciencia, serenidad y cautela.

Agradezco a mis compañeros Willson, Santiago y Pedro, que con sus bromas me motivaban más a seguir adelante, y agradezco en especial a Galo y Freddy, quienes me acompañaron y con quienes compartí la mayor parte de mi formación académica y con los que he tenido una amistad sincera y divertida. A todos ellos les agradezco por haberme acompañado en este proceso, con cada palabra, broma y con cada experiencia vivida. Gracias.

Agradezco profundamente al ingeniero Fernando Heredia, quien siempre me estuvo guiando y apoyando; también al ingeniero Anderson Espinoza, que me ayudó a revisar la redacción del documento, y agradezco al docente que nos guio a todos para redactar y presentar un excelente trabajo de titulación, al ingeniero Luis López, quien con su perseverancia, dedicación

y experiencia nos motivó a presentar un trabajo digno de una ingeniera mecánica.

En la elaboración de este trabajo se utilizaron herramientas de inteligencia artificial (ChatGPT) exclusivamente como apoyo para la generación de las figuras de los resúmenes gráficos de las secciones del marco teórico, marco metodológico, resumen y conclusiones. Todo el contenido intelectual, análisis, interpretación de datos y conclusiones son producto del trabajo de la autora.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XVIII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Importancia y alcances	3
2.3. Delimitación	3
2.3.1. Espacial o geográfica	3
2.3.2. Temporal	3
2.3.3. Sectorial o institucional	3
2.4. Problema General	4
2.5. Problemas Específicos	4
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. Marco Teórico	5
4.1. Mantenimiento predictivo: Fundamentos y aplicación	5
4.1.1. Principios del mantenimiento predictivo	5
4.1.2. Curva P-F: Oportunidad para intervención	6

4.1.3.	Técnicas predictivas aplicables al mezclador industrial	7
4.1.3.1.	Análisis de vibraciones	8
4.1.3.2.	Termografía infrarroja	8
4.1.3.3.	Análisis tribológico de aceite	8
4.2.	Planes de mantenimiento: Estructura y gestión	11
4.2.1.	Componentes de un plan de mantenimiento efectivo	11
4.2.2.	Metodologías para desarrollo de planes de mantenimiento	13
4.2.2.1.	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	13
4.2.2.2.	Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA)	14
4.3.	Modelos de integración en sistemas de mantenimiento	14
4.3.1.	Conceptos fundamentales de integración de sistemas	14
4.3.2.	Marco conceptual de modelado en mantenimiento	15
4.3.3.	Modelos de integración	16
4.3.4.	Factores críticos de éxito y barreras comunes	17
4.4.	Equipos de mezclado en la industria de neumáticos	19
4.4.1.	Mixer tipo Banbury: Funcionamiento y componentes	19
4.4.2.	Componentes críticos y mecanismos de degradación	21
4.5.	Flujo de información y toma de decisiones	22
4.5.1.	Gestión de información en mantenimiento industrial	22
4.5.2.	Flujos de datos: Detección hasta acción	23
4.5.3.	Documentación de intervenciones y trazabilidad	25
4.6.	Metodologías de diagnóstico organizacional	27
4.6.1.	Auditoría de sistemas de mantenimiento	27
4.6.2.	Normativas ISO 14224 e ISO 13374-2	29
4.7.	Desarrollo de procedimientos operativos	30
4.7.1.	Principios de diseño de procedimientos técnicos	31
4.7.2.	Criterio de intervención y herramientas de bajo costo	32
4.8.	Metodologías de evaluación y validación	33
4.8.1.	Matrices de evaluación multicriterio	33
4.8.2.	Evaluación por panel de expertos técnicos	35
4.8.3.	Comparación con estándares internacionales	37

5. Marco metodológico

5.1.	Diagnosticar el estado actual del plan de mantenimiento y el nivel de integración de las técnicas predictivas implementadas en el mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos, mediante evaluación documental basada en normas ISO y validación operativa.	40
5.1.1.	Estructura organizacional del departamento de mantenimiento	42
5.1.2.	Taxonomía del equipo	43
5.1.3.	Diagrama de procesos de mantenimiento	46
5.1.4.	Revisión documental	48
5.1.4.1.	Identificación de documentos	48
5.1.4.2.	Desarrollo de métricas de evaluación documental	49
5.1.4.2.1.	Selección de normas	49
5.1.4.2.2.	Desarrollo de métricas	50
5.1.4.3.	Evaluación documental	53
5.1.4.3.1.	Evaluación del plan de mantenimiento y las programaciones preventivas	53
5.1.4.3.2.	Evaluación del informe de análisis de vibraciones	55
5.1.4.3.3.	Evaluación del informe de termografía	57
5.1.4.3.4.	Evaluación del informe de análisis de aceite	59
5.1.4.3.5.	Evaluación del histórico de daños	62
5.1.4.3.6.	Síntesis consolidada de la evaluación documental	63
5.1.5.	Análisis de brechas	64
5.1.5.1.	Identificación de brechas	65
5.1.5.2.	Validación de brechas	67
5.1.5.2.1.	Diseño del instrumento de validación	67
5.1.5.2.2.	Selección de participantes	68
5.1.5.2.3.	Criterios de validación	68
5.1.5.2.4.	Resultados de validación	69
5.1.6.	Conclusiones del diagnóstico	70
5.2.	Diseñar un modelo de integración que establezca claramente las relaciones entre los resultados de las técnicas predictivas y los ajustes necesarios al plan de mantenimiento del mezclador industrial.	72
5.2.1.	Selección del modelo de integración	73
5.2.1.1.	Contexto y restricciones	73
5.2.1.2.	Evaluación y justificación de los modelos de integración	74
5.2.1.3.	Modelo seleccionado	74

5.2.2.	Establecimiento de criterios técnicos de decisión	77
5.2.2.1.	Criterios de análisis de vibraciones según ISO 10816-3	77
5.2.2.2.	Criterios termográficos según ISO 18434-1	81
5.2.2.3.	Criterios tribológicos según análisis de aceite lubricante	83
5.2.2.4.	Síntesis de criterios técnicos normativos	87
5.2.3.	Diseño del Protocolo Normativo de Integración	89
5.2.3.1.	Flujo de información predictivo-preventivo	89
5.2.3.2.	Procedimiento de análisis de hallazgos	92
5.2.3.3.	Criterios de ajuste de frecuencia de inspección	93
5.2.3.4.	Protocolo de retroalimentación	94
5.2.4.	Diseño de la Matriz Prescriptiva de Decisión	95
5.2.4.1.	Clasificación de niveles de severidad	95
5.2.4.2.	Definición de acciones prescriptivas por nivel	97
5.2.4.3.	Especificación de plazos y prioridades	98
5.2.5.	Diseño de la evaluación retrospectiva del modelo	99
5.2.5.1.	Selección de eventos históricos	100
5.2.5.2.	Procedimiento de aplicación retrospectiva	101
5.2.5.3.	Indicadores de efectividad del modelo	102
5.2.5.4.	Representación gráfica comparativa	103
5.2.6.	Validación del modelo mediante entrevistas semiestructuradas	104
5.2.6.1.	Diseño del protocolo de validación	104
5.2.6.2.	Selección de participantes	104
5.2.6.3.	Ejecución de entrevistas	105
5.2.6.4.	Análisis de resultados de validación	106
5.2.6.5.	Refinamiento del modelo	108
5.2.6.5.1.	Criterios técnicos normativos	108
5.2.6.5.2.	Protocolo normativo de integración	109
5.2.6.5.3.	Matriz prescriptiva de decisión	110
5.2.6.5.4.	Evaluación retrospectiva	111
5.2.6.5.5.	Carácter propositivo y adaptabilidad del modelo	111
5.3.	Elaborar procedimientos específicos y herramientas prácticas que faciliten la implementación del modelo de integración propuesto.	113
5.3.1.	Procedimientos operativos	114
5.3.1.1.	Procedimiento para gestión de hallazgos vibratorios	115
5.3.1.2.	Procedimiento para gestión de hallazgos termográficos	123

5.3.1.3.	Procedimiento para gestión de hallazgos de análisis tribológico	130
5.3.1.4.	Procedimiento para el ajuste de frecuencia	138
5.3.1.5.	Procedimiento para la verificación de efectividad	144
5.3.2.	Formatos y plantillas	151
5.3.2.1.	Instructivos de llenado	151
5.3.2.2.	Ejemplos aplicados	156
5.3.2.2.1.	Ejemplo 1: Hallazgo vibratorio motor reductor extru- sora de descarga	156
5.3.2.2.2.	Ejemplo 2: Hallazgo termográfico portafusibles ab- sorbedor de gases	158
5.3.2.2.3.	Ejemplo 3: Análisis tribológico Unidad Hidráulica Principal	161
5.3.3.	Validación preliminar de usabilidad	163
5.3.3.1.	Diseño de validación	164
5.3.3.1.1.	Metodología de validación	164
5.3.3.1.2.	Criterios de evaluación de usabilidad	164
5.3.3.1.3.	Estructura de sesiones de validación	165
5.3.3.2.	Selección de participantes	166
5.3.3.3.	Ejecución de validación	167
5.3.3.4.	Análisis de resultados	168
5.4.	Demostrar efectividad del modelo de integración mediante evaluación retros- pectiva de eventos históricos y validación por panel de expertos internos y externos.	172
5.4.1.	Evaluación retrospectiva	173
5.4.1.1.	Selección de eventos históricos	174
5.4.1.2.	Aplicación del modelo a casos históricos	175
5.4.1.3.	Cálculo de indicadores	177
5.4.1.4.	Representación gráfica comparativa	179
5.4.2.	Validación por panel de expertos	182
5.4.2.1.	Selección de expertos	182
5.4.2.2.	Instrumento de validación	183
5.4.2.3.	Ejecución de validación	184
5.4.2.4.	Resultados	185
5.4.3.	Análisis comparativo con estándares ISO	187
5.4.3.1.	Conformidad de criterios técnicos	187

5.4.3.2.	Conformidad del protocolo de integración	188
5.4.3.3.	Conformidad de la matriz prescriptiva	189
5.4.3.4.	Conformidad de documentación y trazabilidad	190
5.4.3.5.	Síntesis de conformidad normativa	191
5.4.4.	Consolidación de validaciones	192
5.4.4.1.	Síntesis de validaciones ejecutadas	193
5.4.4.2.	Análisis de convergencia	194
5.4.4.3.	Limitaciones identificadas	194
5.4.4.4.	Conclusión de validación	195
5.4.5.	Síntesis de validación	196
6.	Resultados	197
6.1.	Resultados del objetivo 1	198
6.2.	Resultados del objetivo 2	199
6.3.	Resultados del objetivo 3	200
6.4.	Resultados del objetivo 4	201
7.	Conclusiones	202
8.	Recomendaciones	204
	Referencias	210
	ANEXOS	211
	Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica	211
	Anexo B: Operacionalización de Variables	213
	Anexo C: Versiones del cuestionario	215
	Anexo D: Formatos de retroalimentación	220
	Anexo E: Instrumento de validación	223
	Anexo F: Formatos de retroalimentación normalizados	230
	Anexo G: Instrumento de validación por panel de expertos	233

Lista de Tablas

1.	Tabla comparativa entre técnicas predictivas	9
2.	Factores críticos de éxito y barreras en la integración de sistemas de mantenimiento	18
3.	Estructura de matriz de evaluación multicriterio	34
4.	Taxonomía del equipo	45
5.	Identificación de documentos técnicos	49
6.	Métricas de evaluación documental desarrolladas	51
7.	Criterios operacionales para aplicar las métricas de evaluación documental .	52
8.	Evaluación del plan de mantenimiento según métricas normativas	55
9.	Evaluación del informe de análisis de vibraciones según métricas normativas	57
10.	Evaluación del informe de termografía según métricas normativas	59
11.	Evaluación del informe de análisis de aceite según métricas normativas . . .	61
12.	Evaluación del histórico de daños según métricas normativas	63
13.	Síntesis consolidada del análisis documental según normativas ISO	64
14.	Identificación de brechas en la integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento	66
15.	Selección de participantes para la validación de brechas	68
16.	Resultados de validación operativa de brechas	69
17.	Validación operativa de brechas en la integración de técnicas predictivas del mezclador industrial	70
18.	Rangos de velocidad RMS según zonas de severidad ISO 10816-3	78
19.	Criterios de severidad por aceleración según velocidad rotacional	79
20.	Criterios de severidad por envolvente espectral	80
21.	Clasificación operacional de prioridades de mantenimiento	81
22.	Criterios de severidad termográfica para componentes de baja tensión	82
23.	Criterios de severidad termográfica para componentes de alta tensión	82
24.	Criterios de viscosidad cinemática	84
25.	Criterios de degradación química	84
26.	Criterios de contaminación para aceites de engranajes (ISO 460/220)	85
27.	Criterios de contaminación para aceites hidráulicos (ISO 46)	85
28.	Criterios de desgaste metálico para aceites de engranajes (ISO 460/220) . . .	86
29.	Criterios de desgaste metálico para aceites hidráulicos (ISO 46)	86
30.	Criterios operacionales para aplicar las métricas de evaluación documental .	87
31.	Procedimiento de análisis por técnica predictiva	92

32.	Criterios para ajuste de frecuencias de inspección	93
33.	Clasificación unificada de niveles de severidad	96
34.	Acciones prescriptivas por nivel de severidad	97
35.	Plazos de ejecución y prioridades por nivel de severidad	98
36.	Indicadores para evaluación de efectividad del modelo	102
37.	Participantes para validación del modelo	105
38.	Resultados consolidados de validación del modelo mediante entrevistas a expertos	106
39.	Categorización de comentarios cualitativos según tipo	107
40.	Plazos operacionales refinados según validación	110
41.	Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos vibratorios	116
42.	Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos vibratorios . .	122
43.	Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos termo- gráficos	125
44.	Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos termográficos	130
45.	Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos tribológicos	132
46.	Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos tribológicos .	137
47.	Responsabilidades por cargo en procedimiento de ajuste de frecuencias . . .	139
48.	Registros generados por procedimiento de ajuste de frecuencias	144
49.	Responsabilidades por cargo en procedimiento de verificación de efectividad .	146
50.	Registros generados por procedimiento de verificación de efectividad	150
51.	Instructivo de llenado Formato D1 - Retroalimentación análisis de vibraciones	152
52.	Instructivo de llenado Formato D2 - Retroalimentación termografía infrarroja	153
53.	Instructivo de llenado Formato D3 - Retroalimentación análisis tribológico .	155
54.	Formato D1 completado: Hallazgo vibratorio motor extrusora	157
55.	Formato D2 completado: Hallazgo termográfico portafusibles absorbedor . .	159
56.	Formato D3 completado: Análisis tribológico Unidad Hidráulica	162
57.	Criterios de evaluación de usabilidad	164
58.	Protocolo de sesiones de validación preliminar	165
59.	Perfil del planificador para validación preliminar	166
60.	Protocolo de validación por procedimiento operativo	167
61.	Protocolo de validación por procedimiento operativo	168
62.	Resultados de validación preliminar por formato evaluado	169
63.	Verificación de aspectos operativos por formato	170
64.	Eventos históricos seleccionados para evaluación retrospectiva	175
65.	Aplicación retrospectiva del modelo a eventos seleccionados	177

66.	Indicadores de efectividad del modelo	179
67.	Comparación de escenarios para eventos con clasificación CRÍTICO	180
68.	Configuración del panel de expertos para validación	183
69.	Resultados consolidados de validación por panel de expertos	185
70.	Síntesis de observaciones cualitativas por categoría	186
71.	Conformidad de criterios técnicos con estándares internacionales	188
72.	Conformidad del protocolo de integración con arquitectura ISO 13374-2	189
73.	Conformidad de acciones prescriptivas con ISO 17359:2018	190
74.	Conformidad de formatos con requisitos ISO 14224:2016	191
75.	Síntesis de conformidad normativa del modelo	192
76.	Síntesis de validaciones ejecutadas por fase	193
77.	Evaluación consolidada por criterio de validación	195

Lista de Figuras

1.	Resumen gráfico del trabajo de titulación	2
2.	Resumen gráfico del marco teórico	5
3.	Curva P-F	7
4.	Diagrama de flujo de integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento	10
5.	Estructura jerárquica de un plan de mantenimiento integral	12
6.	Esquema simplificado de un mixer industrial tipo Banbury	20
7.	Flujo completo de información en mantenimiento	24
8.	Sistema integrado de trazabilidad	26
9.	Marco de auditoría de sistemas de mantenimiento	28
10.	Proceso de comparación con estándares internacionales	38
11.	Resumen gráfico del marco metodológico	40
12.	Resumen gráfico de la Fase 1: Diagnóstico de la situación actual	42
13.	Organigrama del departamento de mantenimiento	43
14.	Diagrama jerárquico ISO 14224 con los 4 niveles aplicados al mezclador industrial	44
15.	Diagrama actual del proceso de planificación del departamento de mantenimiento	47
16.	Resumen gráfico de la Fase 2: Diseño del modelo de integración	73
17.	Arquitectura del modelo Normativo-Prescriptivo de integración	75
18.	Zonas de severidad vibratoria según ISO 10816-3	78
19.	Diagrama de flujo de información predictivo-preventivo	91
20.	Resumen gráfico de la Fase 3: Procedimientos operativos	114
21.	Resumen gráfico de la Fase 4: Validación teórica	173
22.	Comparación de escenarios para eventos con clasificación CRÍTICO	181
23.	Resumen gráfico de los resultados	197
24.	Resumen gráfico de las conclusiones	203

Resumen

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo proponer un modelo para la integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento de un mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos. Se trata de una investigación aplicada con enfoque descriptivo-propositivo, desarrollada en cuatro fases: diagnóstico del estado actual, diseño del modelo, elaboración de procedimientos operativos y validación teórica. El estudio se aplicó al mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos, analizando seis eventos correctivos históricos con detección predictiva previa documentada. Los instrumentos empleados fueron revisión documental de planes de mantenimiento e informes predictivos, entrevistas semiestructuradas con escala Likert aplicadas a expertos internos y externos, y análisis retrospectivo de eventos. Los resultados evidencian que el modelo propuesto habría reducido el tiempo de respuesta en un 94.3% para eventos de severidad crítica, recuperando 133 días acumulados mediante intervención oportuna. La validación del modelo conceptual alcanzó 4.17/5.0 y la validación por panel de seis expertos obtuvo 4.56/5.0, confirmando aceptación desde múltiples perspectivas organizacionales. El análisis de conformidad verificó alineación en cuatro de cinco componentes evaluados contra estándares ISO 10816-3, ISO 18434-1 e ISO 13374-2.

Palabras clave: Mantenimiento predictivo, Mantenimiento preventivo, Integración Normativo-Prescriptiva, Análisis de vibraciones, Termografía infrarroja.

Abstract

This thesis aimed to propose a model for integrating predictive techniques with the maintenance plan of an industrial mixer at a tire manufacturing company. It is an applied research project with a descriptive-propositive approach, developed in four phases: diagnosis of the current state, model design, development of operating procedures, and theoretical validation. The study was applied to the industrial mixer of the tire manufacturing company, analyzing six historical corrective events with documented predictive detection. The instruments used were a review of maintenance plans and predictive reports, semi-structured interviews with Likert scales conducted with internal and external experts, and retrospective event analysis. The results show that the proposed model reduced response time by 94.3% for critical severity events, recovering 133 accumulated days through timely intervention. The conceptual model validation achieved a score of 4.17/5.0, and the validation by a panel of six experts obtained a score of 4.56/5.0, confirming acceptance from multiple organizational perspectives. The conformance analysis verified alignment in four of the five components evaluated against ISO 10816-3, ISO 18434-1, and ISO 13374-2 standards.

Keywords: Predictive maintenance, Preventive maintenance, Regulatory-prescriptive integration, Vibration analysis, Infrared thermography.

1. Introducción

El mantenimiento predictivo se apoya en un conjunto de técnicas especializadas que permiten detectar con anticipación el deterioro de componentes, facilitando intervenciones oportunas antes de que ocurra la falla funcional Cansino y Lucero (2015). Esta capacidad de anticipación resulta particularmente relevante en equipos críticos cuya disponibilidad impacta directamente la continuidad operativa de las plantas industriales.

El mezclador industrial constituye un equipo de esta naturaleza en el que la empresa ha implementado técnicas de mantenimiento predictivo en este activo, incluyendo análisis de vibraciones, termografía infrarroja y análisis de aceite. Estas técnicas generan información valiosa sobre el estado de los componentes; no obstante, existe una desconexión entre los resultados obtenidos y el plan de mantenimiento formal del equipo. Cuando se detectan anomalías, se coordinan intervenciones puntuales, pero no existen mecanismos formales para integrar estos hallazgos al plan preventivo. Esta situación ocasiona que el plan de mantenimiento no evolucione basado en la información predictiva, que no se ajusten las frecuencias de las tareas preventivas según los hallazgos y que se repitan problemas similares por falta de documentación de intervenciones menores.

Ante esta problemática, el presente trabajo propone un modelo para la integración de las técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento del mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos. El modelo establece relaciones formales entre los hallazgos predictivos y los ajustes necesarios al plan preventivo, mediante criterios técnicos basados en normativas ISO y una matriz prescriptiva que vincula niveles de severidad con acciones específicas. El alcance se limita a la propuesta del modelo y su validación teórica, sin incluir implementación efectiva, aspecto que correspondería a una fase posterior dependiente de decisiones administrativas de la empresa.

La Figura 1 sintetiza la estructura del presente trabajo, mostrando la relación entre el problema identificado, las fases metodológicas desarrolladas y los resultados obtenidos.

Figura 1

Resumen gráfico del trabajo de titulación.



Nota: La Figura 1 se realizó con el uso de la Inteligencia artificial.

2. Problema

2.1. Antecedentes

El mantenimiento predictivo ha demostrado su efectividad en múltiples industrias. Según estudios realizados por EPRI (1975) Electric Power Research Institute (EPRI), la implementación adecuada de técnicas predictivas puede reducir los costos de mantenimiento entre un 8% y 12% en comparación con estrategias puramente preventivas. Investigaciones previas han abordado la integración de diferentes estrategias de mantenimiento en entornos industriales. Moubray (1997) estableció las bases del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), metodología que propone un enfoque estructurado para determinar las estrategias más adecuadas para cada modo de falla. Por su parte, Jardine, Lin, y Banjevic (2006) desarrollaron modelos matemáticos para optimizar las decisiones de mantenimiento basadas en la condición de los equipos. En la industria de neumáticos específicamente, Gopalakrishnan, Bokrantz,

Ylipää, y Skoogh (2015), documentaron cómo la implementación de técnicas predictivas en mezcladores industriales permitió reducir las paradas no programadas en un 37% en una planta de fabricación de neumáticos en Asia. De manera similar, Sánchez, Rodríguez, González, Ramos, y García (2018) reportaron mejoras significativas en la disponibilidad de equipos críticos tras la integración formal de análisis vibracional con los planes de mantenimiento preventivo en una empresa similar en México.

2.2. Importancia y alcances

El diseño de un modelo para la integración de técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento existente beneficiará al personal técnico, que dispondrá de herramientas metodológicas más efectivas para la planificación, ejecución y control de las actividades de mantenimiento. La documentación sistemática de intervenciones y la trazabilidad mejorada facilitarán los procesos de diagnóstico y toma de decisiones.

El alcance del trabajo de titulación se limita a la propuesta del modelo de integración y su validación teórica, sin incluir la implementación efectiva o el seguimiento de resultados reales, aspectos que corresponderían a una fase posterior dependiente de decisiones administrativas de la empresa.

2.3. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.3.1. Espacial o geográfica

Para el desarrollo del trabajo de titulación, la información se tomó de la empresa ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

2.3.2. Temporal

El trabajo de titulación se desarrollará en el periodo académico 66 y 67, comprendido entre los meses de marzo-agosto del 2025 y octubre-febrero del 2026.

2.3.3. Sectorial o institucional

La empresa se encuentra dentro del sector manufacturero.

2.4. Problema General

- ¿Qué modelo permitiría integrar efectivamente las técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento del mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos?

2.5. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el estado actual del plan de mantenimiento y de la implementación de técnicas predictivas en el mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos?
- ¿Qué estructura debería tener un modelo de integración para incorporar efectivamente los resultados de las técnicas predictivas al plan de mantenimiento del mezclador industrial?
- ¿Qué procedimientos y herramientas de bajo costo se requieren para implementar el modelo de integración propuesto?
- ¿Cómo validar teóricamente la efectividad del modelo de integración propuesto para el mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Proponer un modelo para la integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento del mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos.

3.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado actual del plan de mantenimiento y de la implementación de técnicas predictivas en el mezclador industrial, mediante la auditoría de la documentación técnica existente y entrevistas al 80% del personal técnico involucrado.
- Diseñar un modelo de integración que establezca claramente las relaciones entre los resultados de las técnicas predictivas y los ajustes necesarios al plan de mantenimiento del mezclador industrial.
- Elaborar procedimientos específicos y herramientas prácticas de bajo costo que faciliten la implementación del modelo de integración propuesto.

- Validar teóricamente el modelo de integración propuesto mediante evaluación de al menos 3 expertos de la empresa, y comparación con estándares internacionales.

4. Marco Teórico

Los objetivos planteados requieren fundamentación teórica que respalde el desarrollo metodológico del proyecto. El objetivo general establece proponer un modelo de integración para el mezclador industrial, mientras que los objetivos específicos definen las fases de diagnóstico, diseño, elaboración de procedimientos y validación. El presente marco teórico desarrolla los conceptos fundamentales que sustentan cada componente del modelo propuesto: técnicas de mantenimiento predictivo, estructura de planes de mantenimiento, modelos de integración, características del equipo, flujos de información, metodologías de diagnóstico, desarrollo de procedimientos y metodologías de validación. Estos fundamentos proporcionan la base conceptual y normativa para diseñar, implementar y validar el modelo de integración, estableciendo criterios técnicos que permiten contrastar las hipótesis formuladas con evidencia documental y operativa. La Figura 2 sintetiza estos fundamentos y sus relaciones conceptuales.

Figura 2

Resumen gráfico del marco teórico.



Nota: La Figura 2 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

4.1. Mantenimiento predictivo: Fundamentos y aplicación

4.1.1. Principios del mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una técnica que se utiliza para pronosticar el punto futuro de falla del componente de un equipo; permite reemplazar con base en un plan justo antes

de que falle. Esta anticipación disminuye el tiempo muerto del equipo y prolonga la vida útil del componente (Pérez, 2021). El objetivo principal radica en mejorar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos sin elevar el costo de mantenimiento. Su implementación genera tres beneficios fundamentales: primero, evita paros ocasionados por averías; segundo, alarga los intervalos entre los periodos destinados a mantenimiento; y tercero, minimiza los tiempos de reparación, aumentando la fiabilidad de la planta (Medrano, Gonzáles, y Díaz, 2017).

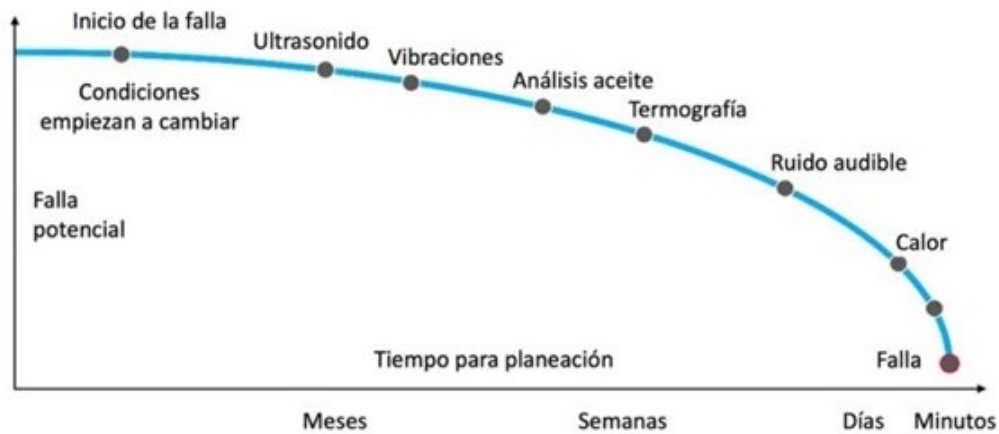
La norma EN13306 (2017) define el mantenimiento predictivo como “mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo una predicción obtenida del análisis repetitivo o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de degradación del elemento”. Esta definición normativa establece dos requisitos esenciales: el análisis continuo de parámetros técnicos y la evaluación de degradación para identificar patrones antes de la falla funcional.

4.1.2. Curva P-F: Oportunidad para intervención

La curva P-F representa un modelo gráfico para visualizar la condición de un activo respecto al tiempo, siendo útil para explicar el concepto del mantenimiento basado en la condición (Torres, 2020). Esta representación ilustra el periodo entre dos puntos críticos: el punto P, donde se detecta la falla potencial, y el punto F, donde ocurre la falla funcional. El objetivo consiste en identificar la falla potencial lo más temprano posible dentro de este intervalo P-F, permitiendo una intervención oportuna para prevenir la falla funcional y optimizar las actividades de mantenimiento (Rosale, 2023). La Figura 3 presenta este modelo gráfico con la progresión del fallo y las ventanas de detección correspondientes a cada técnica predictiva.

Figura 3

Curva P-F.



Nota: En la Figura 3 muestra la progresión del fallo y las ventanas de detección para diferentes técnicas predictivas (Freybel, 2023).

Esta curva establece tres conceptos fundamentales. Primero, existe un intervalo de tiempo mensurable entre el punto P (donde el fallo potencial es detectable) y el punto F (donde ocurre la falla funcional). Segundo, durante este intervalo resulta posible implementar acciones correctivas planificadas. Tercero, cada equipo o activo tiene una curva P-F asociada con características específicas según sus mecanismos de degradación (Rosale, 2023).

Al identificar las fallas potenciales antes de que se conviertan en fallas funcionales, resulta posible prevenir tres aspectos críticos: inactividades no planificadas, costos asociados con reparaciones de emergencia y reemplazo prematuro del equipo. Este enfoque conduce a una mayor vida útil del equipo y a un mejor rendimiento operacional. El uso de la curva P-F ayuda a identificar las tendencias de fallas y mejora la toma de decisiones sobre el mantenimiento y la gestión de los equipos de trabajo (Rosale, 2023).

4.1.3. Técnicas predictivas aplicables al mezclador industrial

La aplicación del mantenimiento predictivo requiere dos elementos esenciales: primero, equipo de medición y colección de datos especializado; segundo, personal calificado para su ejecución e interpretación. Las técnicas aplicadas indican el momento en el que la pieza o componente está próximo a fallar, proporcionan información relevante que permite planear el

mejor momento para la intervención e incluso coordinar con el departamento de producción para minimizar el impacto en la operación (Medrano y cols., 2017).

4.1.3.1. Análisis de vibraciones

Es una de las técnicas más efectivas para detectar problemas mecánicos en la maquinaria rotativa. Se basa en el principio fundamental de que toda máquina vibra al estar en operación. Cuando esta vibración se mantiene en un nivel aceptable, no provoca daño en el equipo, pero si aumenta, significa que ha ocurrido un desperfecto de tipo mecánico. Resulta posible identificar el tipo específico de falla porque cada uno ocasiona un patrón de vibración único y característico (Medrano y cols., 2017).

Las vibraciones son las causas principales de las averías de las máquinas, provocando mayor carga, sobre todo en los rodamientos, lo que acorta su vida útil. La aplicación de esta técnica permite el diagnóstico preciso de múltiples fallas: desequilibrio, desalineación, holguras mecánicas, roces, ejes doblados, excentricidad en poleas y engranajes, problemas en rodamientos y desperfectos de origen eléctrico (Medrano y cols., 2017).

4.1.3.2. Termografía infrarroja

Es una técnica de mantenimiento predictivo en la que una imagen captada con infrarrojos se transforma en una imagen radiométrica que nos permite leer los valores de temperatura. Su aplicación en el mantenimiento industrial determina dos aspectos críticos: dónde se necesita mantenimiento y cuándo debe realizarse. El aumento de temperatura indica generalmente un problema o condición anormal en el equipo, proporcionando alertas tempranas de degradación (Medrano y cols., 2017).

4.1.3.3. Análisis tribológico de aceite

Representa la técnica predictiva que proporciona información sobre dos aspectos fundamentales: sobre el estado del lubricante y el estado del equipo lubricado. Esta técnica emplea cuatro tipos de análisis: primero, análisis fisicoquímicos que evalúan las propiedades del lubricante; segundo, análisis de desgaste metálico que identifican las partículas generadas por los componentes; tercero, análisis de contaminación que detecta ingreso de contaminantes externos; y cuarto, análisis de aditivos que verifica la degradación de los componentes químicos protectores. Esta combinación detecta degradación del lubricante, la contaminación externa y

la generación de partículas metálicas de desgaste antes de que provoquen fallas funcionales (Medrano y cols., 2017).

En la Tabla 1 se muestra la comparativa detallada de las técnicas predictivas que se aplican al mezclador industrial, incluyendo sus principios físicos fundamentales, las aplicaciones típicas más apropiadas y las capacidades específicas de detección temprana para diferentes tipos de equipos industriales.

Tabla 1

Tabla comparativa entre técnicas predictivas.

Técnica predictiva	Principio físico	Aplicación principal	Tipo de falla detectada	Tiempo de detección anticipada	Ventajas	Limitaciones
Análisis de vibraciones	Medición de oscilaciones mecánicas mediante acelerómetros.	Motores eléctricos, bombas, ventiladores, compresores, reductores.	Desbalance, desalineación, holguras, problemas en rodamientos.	2-12 semanas	Alta sensibilidad, diagnóstico específico, no invasivo.	Requiere experiencia, condiciones ambientales estables.
Termografía infrarroja	Detección de radiación térmica emitida por objetos.	Tableros eléctricos, rodamientos, motores, transformadores, conexiones.	Sobrecargas eléctricas, fricción excesiva, fallas de aislamiento.	1-4 semanas	Inspección remota, resultados inmediatos, amplia aplicabilidad.	Condiciones ambientales críticas, emisividad variable.
Análisis de aceites	Análisis físico-químico de lubricantes y partículas de desgaste.	Bombas, reductores, sistemas hidráulicos, motores lubricados.	Desgaste interno, contaminación, degradación de lubricante.	4-16 semanas	Información interna, análisis cuantitativo, historial de tendencias.	Tiempo de laboratorio, frecuencia limitada.

Nota: La Tabla 1 muestra que los tiempos de detección anticipada varían según el tipo específico de fallo, condiciones operacionales y severidad de la degradación (Medrano y cols., 2017).

La comparación entre las técnicas predictivas evidencia su complementariedad: el análisis de vibraciones detecta problemas mecánicos con 2-12 semanas de anticipación, la termografía identifica anomalías térmicas con 1-4 semanas, y el análisis tribológico proporciona información sobre desgaste interno con 4-16 semanas de anticipación. Esta diversidad de ventanas temporales fundamenta la necesidad de integrar múltiples técnicas para maximizar la capacidad de detección anticipada.

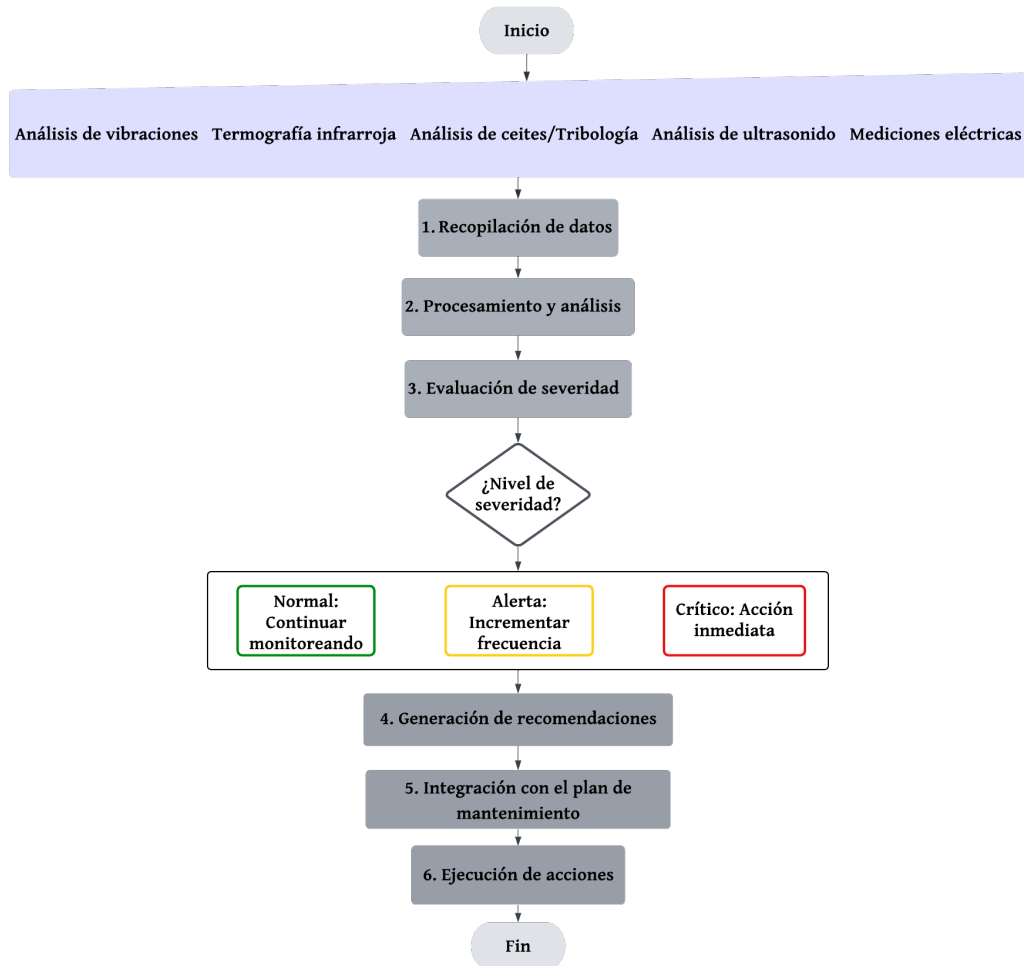
Según Mora (2021) la integración efectiva de las técnicas predictivas con los planes de mantenimiento, ocurre cuando se cumplen tres condiciones: primero, las técnicas proporcionan el marco metodológico científico; segundo, las herramientas facilitan la implementación práctica;

y tercero, ambas permiten la toma de decisiones informada. Esta diferencia es fundamental porque el mantenimiento predictivo utiliza datos para identificar anomalías y defectos en los equipos antes de que se produzca el fallo; requiere solidez metodológica de las técnicas y precisión instrumental de las herramientas (Mora, 2021).

Esta integración requiere consideraciones metodológicas específicas que trascienden la mera aplicación de las técnicas individuales. La Figura 4 presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso completo desde la detección de anomalías mediante técnicas predictivas hasta la actualización del plan de mantenimiento.

Figura 4

Diagrama de flujo de integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento.



Nota: En la Figura 4, se observa el flujo del plan de mantenimiento (Mora, 2021).

La Figura 4 evidencia que las técnicas predictivas requieren un plan de mantenimiento formal como receptor de la información generada. Sin un plan estructurado que defina tareas, frecuencias y responsabilidades, los hallazgos predictivos carecen de mecanismos para traducirse en acciones preventivas documentadas. Por consiguiente, resulta fundamental comprender la estructura y gestión del plan de mantenimiento.

4.2. Planes de mantenimiento: Estructura y gestión

El plan de mantenimiento es un documento que contiene el conjunto de tareas de mantenimiento programado que una organización debe realizar para asegurar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y seguridad establecidos (Crespo, 2007). Representa un sistema dinámico que experimenta continuas modificaciones como resultado de dos procesos fundamentales: el análisis de las incidencias operacionales y la evaluación de diversos indicadores de gestión de mantenimiento (García, 2012). Esta naturaleza dinámica establece que un plan de mantenimiento efectivo no es un documento estático, sino un instrumento vivo que evoluciona con la experiencia operacional.

4.2.1. Componentes de un plan de mantenimiento efectivo

Los planes de mantenimiento representan el elemento central de cualquier estrategia avanzada de gestión de activos; es la estructura que organiza, programa y controla todas las actividades de mantenimiento requeridas para preservar la funcionalidad y confiabilidad de los equipos industriales (García, 2012). Un plan de mantenimiento bien estructurado, aunque no elimina completamente las averías, sí reduce de forma efectiva la frecuencia e impacto operacional. La estructura de un plan de mantenimiento efectivo debe incorporar múltiples componentes interrelacionados que garanticen una cobertura integral de las necesidades de mantenimiento. La Figura 5 presenta la estructura jerárquica que organiza estos componentes desde la clasificación de equipos hasta los indicadores de desempeño.

Figura 5

Estructura jerárquica de un plan de mantenimiento integral.



Nota: En la Figura 5, se muestra el diagrama con los componentes principales del plan de mantenimiento.

García (2012) identifica seis componentes fundamentales organizados jerárquicamente:

1. **Clasificación e identificación de equipos:** Establece la taxonomía y codificación de activos según estándares como ISO 14224.
2. **Recopilación de información técnica:** Incluye especificaciones del fabricante, historiales de falla y análisis de criticidad.
3. **Selección de política de mantenimiento:** Determina la estrategia apropiada (preventivo, predictivo, correctivo) para cada equipo según su criticidad y características operacionales.
4. **Programación de mantenimiento preventivo:** Define tareas específicas, frecuencias óptimas y recursos requeridos, incluyendo personal, herramientas, materiales y repuestos.
5. **Guía de mantenimiento correctivo:** Establece procedimientos para intervenciones no planificadas, priorización y gestión de emergencias.
6. **Indicadores de desempeño:** Define métricas para evaluar la efectividad del plan, permitiendo su mejora continua.

Estos seis componentes conforman una arquitectura integral donde cada elemento alimenta al siguiente, estableciendo un ciclo de mejora continua que evoluciona con la experiencia operacional. Esta estructura proporciona el marco receptor necesario para integrar hallazgos de técnicas predictivas con decisiones de mantenimiento planificado.

La elaboración del plan de mantenimiento atraviesa una serie de fases interconectadas. Primero, se realiza la descomposición jerárquica de la planta en áreas funcionales. Segundo, se elaboran inventarios completos de los equipos. Tercero, se descompone cada activo en sistemas y elementos consecutivos. Cuarto, se implementan sistemas de codificación estandarizados. Finalmente, se asigna el modelo de mantenimiento más apropiado, considerando las características del equipo y su función crítica en el sistema productivo (García, 2012).

4.2.2. Metodologías para desarrollo de planes de mantenimiento

Las metodologías para el desarrollo de planes de mantenimiento han evolucionado significativamente en la última década, incorporando enfoques avanzados tanto en efectividad técnica como en eficiencia económica, en particular en el contexto de la Industria 4.0 (Zonta y cols., 2020). Esta evolución responde a la necesidad de gestionar equipos cada vez más complejos y críticos para la continuidad operacional.

4.2.2.1. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés) representa una metodología estructurada que establece las tareas de mantenimiento óptimas mediante el análisis de los modos y efectos de fallo. El RCM prioriza la conservación de la función del sistema sobre la preservación del equipo individual, determinando tareas necesarias para asegurar que un activo físico continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional específico (Rausand y Haugen, 2020).

Esta metodología incorpora un proceso de toma de decisiones estructurado que selecciona el tipo de mantenimiento más apropiado (predictivo, preventivo, correctivo o rediseño) para cada modo de fallo potencial, considerando cuatro aspectos críticos: primero, las consecuencias en términos de seguridad; segundo, el impacto ambiental; tercero, las implicaciones operacionales; y cuarto, los costos asociados (Moubray, 1997).

4.2.2.2. Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA)

El Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA por sus siglas en inglés) estandarizado por la norma SAE J1739, realiza una categorización de efectos de fallas mediante la determinación de números de prioridad de riesgo (NPR). El FMEA utiliza índices numéricos para evaluar tres dimensiones: la severidad del efecto del fallo, la frecuencia de ocurrencia del fallo y la detectabilidad de cada modo de fallo. Estos tres valores se multiplican para generar un número de prioridad de riesgo (RPN) que orienta la asignación de recursos de mantenimiento hacia los problemas más críticos. Además de RCM y FMEA, existen metodologías complementarias que enriquecen el desarrollo de planes de mantenimiento efectivos. Estas incluyen análisis de criticidad de equipos, optimización de frecuencias mediante modelos estadísticos, implementación de estrategias TPM (Total Productive Maintenance) y aplicación de técnicas de análisis de causa raíz para fallas recurrentes (Stamatis, 2018).

4.3. Modelos de integración en sistemas de mantenimiento

4.3.1. Conceptos fundamentales de integración de sistemas

La integración en sistemas de mantenimiento representa un paradigma metodológico que busca unificar múltiples estrategias, técnicas y herramientas de mantenimiento dentro de un marco coherente y sinérgico. Este enfoque trasciende la simple coexistencia de técnicas individuales, requiriendo arquitecturas que faciliten la interoperabilidad efectiva entre métodos predictivos, preventivos y correctivos (S. García, 2009).

El concepto reconoce una premisa fundamental: ninguna estrategia aislada puede abordar completamente la complejidad operacional de los entornos industriales modernos. Los principios fundamentales de integración se sustentan en la teoría de sistemas, considerando las interacciones complejas entre tres tipos de componentes: componentes técnicos que incluyen equipos de monitoreo y sistemas de información; componentes humanos que abarcan competencias del personal y procesos de toma de decisiones; y componentes organizacionales que comprenden estructuras de responsabilidad y flujos de comunicación (S. García, 2009). La arquitectura de integración debe contemplar cuatro dimensiones fundamentales (Rivera, 2011):

1. **Compatibilidad entre sistemas de monitoreo:** Asegura que diferentes equipos de medición puedan comunicarse efectivamente.

2. **Estandarización de protocolos de comunicación:** Define formatos comunes para intercambio de datos entre sistemas predictivos y preventivos.
3. **Armonización de criterios de decisión:** Establece umbrales y reglas consistentes para la interpretación de resultados predictivos.
4. **Coordinación de responsabilidades organizacionales:** Aclara roles y líneas de comunicación entre personal técnico.

Esta estructura requiere marcos conceptuales que definan interfaces claras entre componentes del sistema integrado, especificando cómo la información de cada técnica contribuye al conocimiento global del estado de activos (Rivera, 2011). La integración horizontal conecta diferentes técnicas de mantenimiento aplicadas al mismo nivel organizacional, que permite que el análisis de vibraciones, termografía y tribología alimenten en orden las decisiones operacionales. Paralelamente, la integración vertical vincula niveles jerárquicos, desde la detección de anomalías en campo hasta la planificación estratégica de activos a nivel gerencial (González, 2020).

La complejidad de integrar múltiples técnicas predictivas con planes de mantenimiento requiere herramientas conceptuales que estructuren la información, definan relaciones causa-efecto y establezcan protocolos de decisión. El modelado proporciona estas herramientas mediante representaciones estructuradas del proceso de integración (González, 2020).

4.3.2. Marco conceptual de modelado en mantenimiento

Un modelo es una representación simplificada que captura elementos esenciales de un sistema, omitiendo detalles irrelevantes para el propósito específico de análisis. En mantenimiento industrial, el modelado permite estructurar la complejidad operativa en componentes manejables, facilitar la comunicación entre equipos multidisciplinarios y establecer criterios objetivos para la toma de decisiones basada en información predictiva. Es fundamental distinguir entre modelos de mantenimiento (RCM, TPM, CBM), que son estrategias completas aplicables exclusivamente a la gestión de mantenimiento, y modelos genéricos o conceptuales como lo son las matrices de decisión, diagramas de flujo, árboles de decisión, etc., que son herramientas de representación transferibles a cualquier sistema y aplicables como complemento a estrategias existentes (Crespo, 2007).

Para proyectos de integración que complementan estrategias de mantenimiento ya existentes, los modelos genéricos resultan apropiados. Estos modelos pueden representar flujos de

información, establecer criterios de decisión y prescribir acciones sin modificar la estrategia fundamental de mantenimiento de la organización (Morales, s.f.).

4.3.3. Modelos de integración

Existen diversas alternativas de modelado aplicables a problemas de integración de sistemas de mantenimiento, cada una con características metodológicas específicas.

1. **Modelo de Dinámica de Sistemas:** Desarrollado por Forrester en el MIT, representa relaciones de retroalimentación mediante diagramas causales y ecuaciones diferenciales que permiten simular el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. Esta aproximación captura relaciones no lineales entre variables y efectos de retraso temporal en la propagación de información. La metodología emplea software especializado de simulación para ejecutar escenarios y analizar la sensibilidad del sistema ante cambios en parámetros (Yıldız y Soylu, 2023).
2. **Modelo de machine learning:** Utiliza algoritmos de aprendizaje automático que identifiquen patrones complejos en datos históricos para predecir eventos futuros. Los algoritmos procesan grandes volúmenes de datos de sensores, historiales de mantenimiento y condiciones operacionales para generar modelos predictivos. Las técnicas incluyen redes neuronales, árboles de decisión y métodos de ensamble que aprenden relaciones entre variables sin requerir especificación explícita de ecuaciones (Carvalho y cols., 2019).
3. **Modelo BPMN (Business Process Model and Notation):** Constituye un estándar ISO 19510 para representar flujos de actividades mediante notación gráfica estandarizada. Emplea elementos como actividades, eventos, compuertas de decisión y flujos de secuencia para documentar procesos de negocio. La notación es comprensible para personal técnico y gerencial sin requerir conocimientos de programación, facilitando la comunicación interdisciplinaria sobre procesos organizacionales (Díaz, 2022).
4. **Modelo Normativo-Prescriptivo con Validación Retrospectiva:** Combina dos componentes complementarios: un protocolo normativo que establece cómo debe fluir la información y procesarse las decisiones, y una matriz prescriptiva que especifica acciones concretas según el estado detectado del sistema. Este enfoque integra umbrales técnicos basados en normativas (ISO, estándares industriales) con reglas de decisión que prescriben intervenciones específicas. La validación puede realizarse retrospectivamente mediante aplicación del modelo a casos históricos documentados .

Independientemente de la alternativa de modelado seleccionada, la implementación exitosa de cualquier modelo de integración depende de factores organizacionales, técnicos y económicos que trascienden la corrección metodológica del modelo. La literatura identifica elementos comunes que determinan el éxito o fracaso de proyectos de integración de sistemas de mantenimiento.

4.3.4. Factores críticos de éxito y barreras comunes

Como lo manifiestan, Villegas (1997) los factores críticos de éxito incluyen múltiples dimensiones que deben gestionarse simultáneamente para lograr resultados exitosos en la integración de sistemas de mantenimiento.

El liderazgo y compromiso organizacional constituyen prerequisites fundamentales, ya que la integración efectiva requiere tres tipos de inversiones significativas: inversión en tiempo para desarrollo e implementación; inversión en recursos tecnológicos y humanos; e inversión en cambios organizacionales sostenibles únicamente con apoyo directivo consistente (González, 2020). La gestión del cambio debe abordar resistencias naturales, proporcionando capacitación apropiada y comunicación clara de beneficios esperados.

La gestión de información debe asegurar que sistemas de recopilación, procesamiento y distribución de datos cumplan tres requisitos esenciales: primero, robustez técnica para operar confiablemente en condiciones industriales; segundo, confiabilidad de datos mediante validación y limpieza; y tercero, accesibilidad para usuarios que requieren la información para toma de decisiones. Esto incluye establecimiento de estándares de calidad de datos, protocolos de validación y mecanismos de retroalimentación que permitan mejora continua (Rivera, 2011).

En la Tabla 2 se muestran los factores críticos de éxito y las barreras en la integración de sistemas de mantenimiento.

Tabla 2*Factores críticos de éxito y barreras en la integración de sistemas de mantenimiento.*

Categoría	Tipo	Factor/Barrera	Manifestación típica	Impacto en proyecto	Estrategia de gestión	Indicadores de seguimiento
FACTORES TÉCNICOS	Éxito	Compatibilidad de sistemas.	Interoperabilidad entre sistemas de información.	Alto positivo	Estandarización de protocolos, APIs unificadas.	% de sistemas integrados
	Barrera	Incompatibilidad tecnológica.	Sistemas aislados, formatos de datos diferentes.	Alto negativo.	Desarrollo de interfaces, migración gradual.	Tiempo de integración.
	Éxito	Calidad de datos.	Información precisa y oportuna.	Medio positivo.	Validación automática, capacitación en captura.	% de datos con errores.
	Barrera	Datos incompletos/erróneos.	Decisiones basadas en información deficiente.	Alto negativo.	Limpieza de datos, controles de calidad.	Índice de completitud.
FACTORES ORGANIZACIONALES	Éxito	Liderazgo comprometido.	Apoyo visible y recursos asignados.	Alto positivo.	Comunicación constante, participación activa.	Asignación presupuestal.
	Barrera	Resistencia al cambio.	Personal reacio a nuevos procedimientos.	Alto negativo.	Gestión del cambio, comunicación de beneficios.	Nivel de adopción.
	Éxito	Competencias del personal.	Personal calificado y motivado.	Medio positivo.	Capacitación continua, desarrollo de carrera.	Evaluaciones de competencia.
	Barrera	Falta de capacitación.	Personal no preparado para nuevas herramientas.	Medio negativo.	Programas de formación estructurados.	Horas de capacitación.
FACTORES ECONÓMICOS	Éxito	ROI demostrable.	Beneficios cuantificables y comunicables.	Alto positivo.	Métricas claras, casos de éxito documentado.	ROI calculado.
	Barrera	Costos iniciales elevados.	Inversión significativa sin beneficios inmediatos.	Alto negativo.	Implementación gradual, financiamiento por fases.	Payback period.
	Éxito	Presupuesto adecuado.	Recursos suficientes para lo completa.	Medio positivo.	Planificación financiera detallada.	% de presupuesto utilizado.
	Barrera	Restricciones presupuestales.	Limitaciones financieras que comprometen alcance.	Medio negativo.	Priorización de componentes críticos.	Costo por beneficio.

Nota: La Tabla 2 muestra que la gestión exitosa requiere atención simultánea a todas las categorías, con estrategias adaptadas al contexto organizacional específico (Montilla, 2019) y (González, 2020).

Las barreras técnicas incluyen tres aspectos principales: primero, incompatibilidades entre sistemas de información heredados; segundo, limitaciones en capacidades analíticas del personal; y tercero, deficiencias en infraestructura tecnológica. Las estrategias de superación comprenden cuatro enfoques complementarios: primero, estandarización gradual de sistemas mediante adopción de protocolos comunes; segundo, inversiones selectivas en capacidades críticas priorizadas por análisis costo-beneficio; tercero, desarrollo de interfaces de software que permitan interoperabilidad entre sistemas heterogéneos; y cuarto, capacitación progresiva del personal técnico (F. García, 2004).

Los modelos y factores de integración analizados adquieren relevancia práctica cuando se aplican a equipos industriales específicos. En el contexto del presente estudio, resulta fundamental comprender las características técnicas de los equipos de mezclado utilizados en la industria de neumáticos.

4.4. Equipos de mezclado en la industria de neumáticos

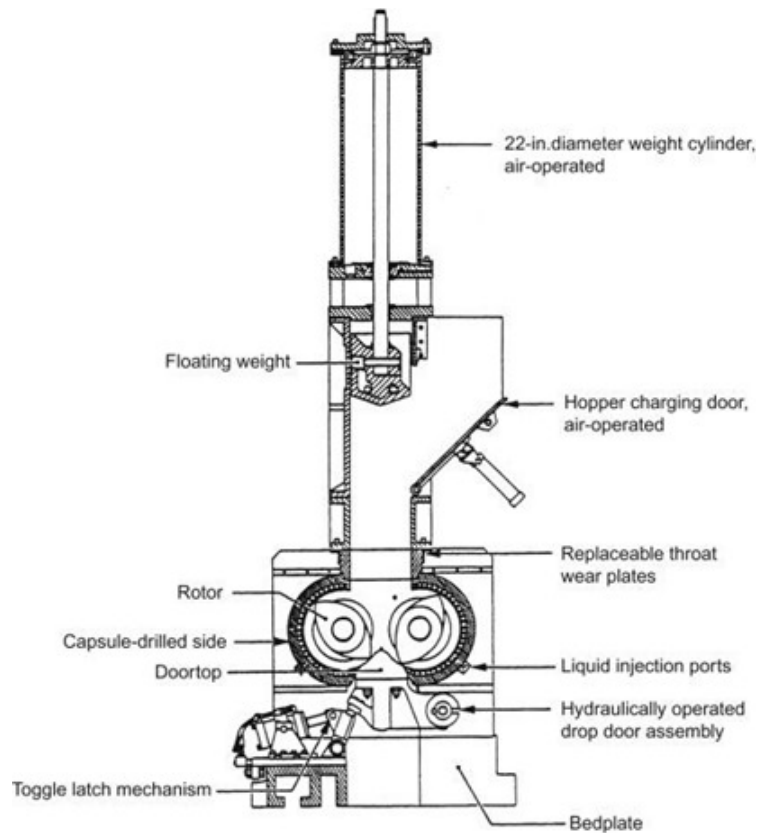
4.4.1. Mixer tipo Banbury: Funcionamiento y componentes

Los mezcladores industriales, comúnmente denominados mixers en la industria del neumático, representan equipos críticos en el proceso productivo, responsables de la homogeneización de los compuestos de caucho utilizados en la fabricación de componentes neumáticos. Funcionalmente, estos equipos operan mediante tres principios mecánicos fundamentales: primero, cizallamiento para romper aglomerados; segundo, compresión para densificar la mezcla; y tercero, estiramiento para lograr la dispersión uniforme de ingredientes y aditivos en la matriz polimérica. Estas acciones mecánicas combinadas determinan las propiedades finales del producto, como resistencia, elasticidad, durabilidad y comportamiento térmico (García, 2012).

La integración efectiva de materias primas requiere procesos de mezclado altamente controlados para garantizar propiedades uniformes y consistentes en el compuesto final. Las materias primas incluyen cinco categorías principales: primero, elastómero base (caucho sintético y caucho natural); segundo, cargas reforzantes (negro de humo, sílice); tercero, aceites plastificantes; cuarto, pigmentos y colorantes; y quinto, aditivos químicos especializados (agentes vulcanizantes, antioxidantes, aceleradores) (Bravo, García, Hernández, y Ruiz, 2013). La Figura 6 presenta el esquema simplificado de un mixer industrial tipo Banbury con sus componentes principales.

Figura 6

Esquema simplificado de un mixer industrial tipo Banbury.



Nota: En la 6, se muestra el esquema simplificado de un mixer industrial tipo Banbury con sus componentes principales (Drobny, 2016).

El esquema ilustrado evidencia la disposición de los componentes fundamentales: la cámara de mezclado hermética, los rotores contrarrotantes, el pistón superior y la compuerta inferior. Esta configuración determina las capacidades operacionales del equipo y los puntos críticos que requieren monitoreo predictivo.

La configuración típica de un mixer industrial incluye dos elementos principales: una cámara de mezclado herméticamente sellada y dos rotores contrarrotantes operando a velocidades diferenciadas. El diseño de los rotores, generalmente del tipo Banbury tangencial, está optimizado para generar las fuerzas de cizalla necesarias (superiores a 10 MPa) para la incorporación efectiva de cargas reforzantes como negro de humo o sílice, agentes vulcanizantes, antioxidantes, plastificantes y aditivos químicos especializados (Cheremisinoff, 2017).

Los sistemas auxiliares críticos comprenden seis subsistemas principales: primero, componentes hidráulicos para la compuerta inferior y pistón superior que mantienen presión durante el mezclado; segundo, sistemas de refrigeración que controlan la temperatura mediante circulación de agua o aceite térmico; tercero, unidades de lubricación para rodamientos y reductores; cuarto, sistemas de control y monitoreo que supervisan temperatura, presión, velocidad y tiempo de mezclado; quinto, equipos especializados de manipulación de materiales (básculas, transportadores, dosificadores); y sexto, sistemas de extracción de polvo y gases según las especificaciones técnicas requeridas (García, 2012).

4.4.2. Componentes críticos y mecanismos de degradación

Desde la perspectiva del mantenimiento industrial, los mixers presentan desafíos operacionales significativos debido a condiciones severas de operación. Estas condiciones se caracterizan por tres aspectos fundamentales: primero, temperaturas superiores a 170 °C generadas por fricción interna durante el mezclado; segundo, presiones elevadas (hasta 10 bar) aplicadas por el pistón superior; y tercero, exposición continua a compuestos químicamente agresivos contenidos en las formulaciones de caucho (Zhang y Mousavi, 2024).

Estas condiciones, combinadas con dos factores adicionales (ciclos constantes de carga-descarga cada 3-8 minutos y cambios térmicos procesados entre 40 °C y 180 °C), generan mecanismos de degradación acelerada que afectan múltiples componentes (Zhang y Mousavi, 2024). Los componentes críticos de un mixer incluyen cinco sistemas principales:

1. **Rotores:** Sujetos a cuatro mecanismos de degradación: desgaste abrasivo por partículas de negro de humo, fatiga mecánica por cargas cíclicas, deformación térmica por gradientes de temperatura y desbalance dinámico por desgaste no uniforme.
2. **Rodamientos:** Expuestos a cuatro condiciones críticas: cargas extremas superiores a 100 kN por rodamiento, contaminación por partículas de caucho y polvo, degradación acelerada de lubricantes por alta temperatura y fatiga por ciclos térmicos repetitivos.
3. **Sistemas hidráulicos:** Experimentan cuatro tipos de problemas: degradación de fluidos por temperatura y contaminación, desgaste de sellos por presión y temperatura, contaminación particulada del aceite hidráulico, y cavitación en bombas por aireación del fluido.

4. **Reductores de velocidad:** Afectados por cuatro mecanismos: desgaste de engranajes por cargas variables, fatiga de contacto en superficies dentadas, desalineación por dilatación térmica de la estructura y deterioro de lubricantes por alta temperatura de operación.
5. **Sistemas de sellado:** Sufren cuatro tipos de degradación: primero, la degradación térmica de elastómeros por temperatura superior a 150 °C; segundo, el desgaste abrasivo por partículas; tercero, pérdida de elasticidad por envejecimiento químico; y contaminación cruzada entre aceite lubricante y compuesto de caucho.

Comprender estos mecanismos de degradación resulta fundamental para diseñar estrategias de mantenimiento predictivo efectivas. La siguiente sección analiza cómo la información sobre el estado de estos componentes debe fluir desde la detección hasta la toma de decisiones de intervención.

4.5. Flujo de información y toma de decisiones

4.5.1. Gestión de información en mantenimiento industrial

Es el elemento central de cualquier estrategia integrada de mantenimiento predictivo, estableciendo mecanismos para transformar datos operacionales en decisiones informadas que mejoran el desempeño de activos industriales (González, 2020). Esta gestión trasciende la simple recopilación de datos, que requiere dos tipos de arquitecturas sofisticadas: arquitecturas tecnológicas para captura, almacenamiento y procesamiento de datos; y arquitecturas organizacionales para distribución, interpretación y utilización de información en diferentes niveles jerárquicos.

La efectividad de estos sistemas depende de dos categorías de aspectos: aspectos técnicos relacionados con las tecnologías de información (sensores, bases de datos, algoritmos de análisis) y aspectos organizacionales vinculados a procesos de trabajo y competencias del personal técnico (procedimientos de interpretación, protocolos de comunicación, habilidades analíticas) (Crespo, 2007).

La arquitectura de gestión debe abordar cuatro tipos de fuentes de información heterogéneas características de entornos industriales modernos (Crespo, 2007):

1. **Sistemas SCADA:** Proporcionan datos en tiempo real de variables de proceso (temperatura, presión, velocidad, consumo eléctrico).

2. **Equipo de monitoreo predictivo:** Generan mediciones especializadas (vibraciones, termografías, análisis de aceite) mediante equipos portátiles o sistemas permanentes.
3. **Sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS):** Almacenan historiales de intervenciones, consumo de repuestos y programación de tareas.
4. **Experiencia del personal:** Captura observaciones, diagnósticos y lecciones aprendidas del personal técnico mediante reportes estructurados.

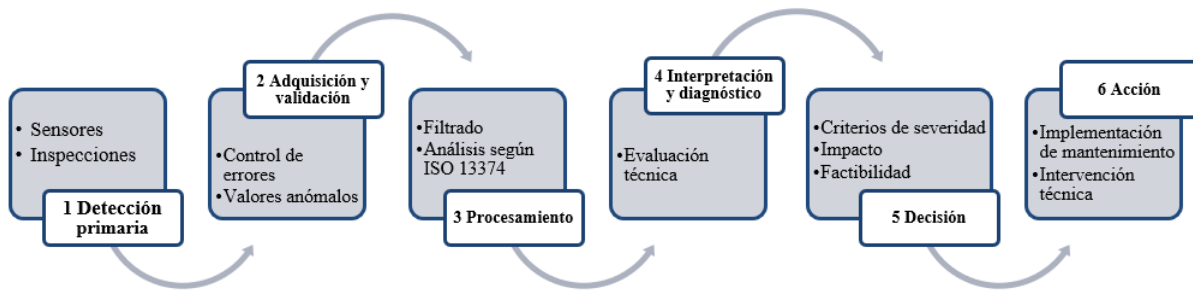
Esta diversidad de fuentes genera variabilidad temporal que abarca tres escalas temporales: alertas críticas que requieren acción inmediata (segundos a minutos); tendencias de mediano plazo que informan ajustes tácticos al plan de mantenimiento (días a semanas); y tendencias de largo plazo que informan decisiones estratégicas de renovación de activos (meses a años). La integración efectiva de estas múltiples fuentes de información requiere dos elementos fundamentales: primero, protocolos estandarizados que definan formatos comunes de datos; y segundo, sistemas de información robustos que garanticen la calidad y trazabilidad de los datos recopilados (Crespo, 2007).

4.5.2. Flujos de datos: Detección hasta acción

Los flujos de datos desde detección hasta acción representan procesos complejos que requieren un diseño cuidadoso para asegurar una transición eficiente a través de múltiples etapas de transformación. El proceso inicia con la detección primaria mediante tres mecanismos: primero, sensores automáticos que monitorean continuamente; segundo, inspecciones programadas que realizan mediciones periódicas; y tercero, análisis de laboratorio que evalúan muestras extraídas. Estos mecanismos generan datos sobre el estado y desempeño del equipo (ISO13274-1, 2003). La Figura 7 presenta el flujo secuencial completo de información en mantenimiento con sus cinco etapas principales.

Figura 7

Flujo completo de información en mantenimiento.



Nota: En la Figura 7, se muestra el flujo secuencial de izquierda a derecha con cinco etapas principales (González, 2020), (Crespo, 2007) y (ISO13274-1, 2003).

El flujo ilustrado evidencia la secuencia desde adquisición de datos hasta generación de recomendaciones, estableciendo los puntos de transformación donde la información bruta se convierte en conocimiento útil para la toma de decisiones.

La adquisición debe implementar tres tipos de controles de validación: detección de errores de medición (valores fuera de rango físicamente posible); identificación de inconsistencias (cambios abruptos sin causa operacional); y reconocimiento de valores anómalos que comprometan los análisis posteriores (outliers estadísticos). Esta validación resulta crítica porque datos erróneos pueden generar falsas alarmas o enmascarar problemas reales.

El procesamiento transforma información bruta en conocimiento útil mediante tres operaciones fundamentales: aplicación de algoritmos de análisis (transformadas FFT para vibraciones, análisis termográfico de gradientes); correlación histórica que compara mediciones actuales con registros previos; y contextualización basada en condiciones operacionales específicas (carga de producción, condiciones ambientales) (ISO13274-1, 2003). Esta etapa debe considerar múltiples fuentes de variabilidad que influyen la interpretación correcta de mediciones: condiciones ambientales (temperatura, humedad), modos de operación (carga, velocidad, receta de mezclado) e historiales de mantenimiento previos (intervenciones recientes, modificaciones).

La interpretación requiere cuatro actividades analíticas: comparación con umbrales establecidos según normativas (ISO 10816 para vibraciones, ISO 18434 para termografía); análisis de tendencias temporales para identificar evolución de parámetros; identificación de patrones que indiquen degradación progresiva; y reconocimiento de cambios abruptos en condiciones operacionales que requieran investigación inmediata (ISO13274-1, 2003).

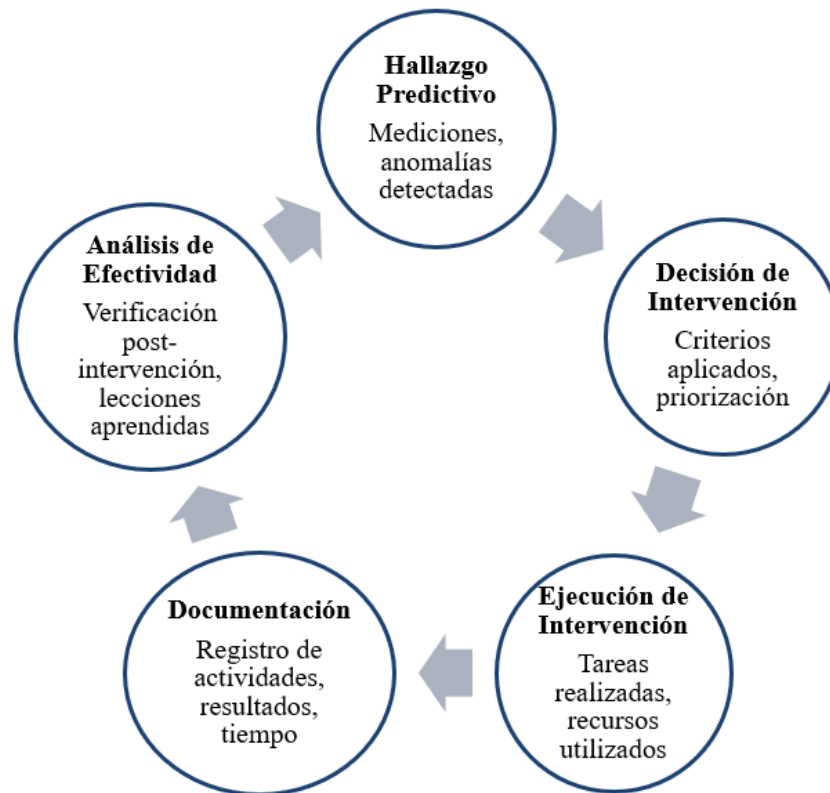
4.5.3. Documentación de intervenciones y trazabilidad

Es el elemento fundamental para el funcionamiento efectivo de dos procesos críticos: sistemas de retroalimentación que ajustan el plan de mantenimiento basándose en resultados de intervenciones y sistemas de mejora continua que capturan lecciones aprendidas. Esta documentación debe capturar cuatro elementos esenciales: primero, actividades realizadas durante la intervención; segundo, contexto de decisiones (por qué se decidió intervenir en ese momento); tercero, justificaciones técnicas (qué hallazgos predictivos motivaron la acción); y cuarto, lecciones aprendidas que informen decisiones futuras (qué funcionó bien y qué puede mejorarse) (ISO20816-1, 2016).

La norma ISO 14224 proporciona marcos estructurados estableciendo cuatro tipos de taxonomías estándar: clasificación de tipos de intervenciones (preventiva programada, predictiva condicional, correctiva no planificada); categorización de modos de fallo (mecánico, eléctrico, hidráulico); metodología de análisis de causa raíz (defecto de diseño, operación inadecuada, desgaste natural); y registro de efectos observados (pérdida de función, degradación de desempeño, riesgo de seguridad) como se muestra. Estas taxonomías facilitan el análisis comparativo entre equipos similares y la identificación de patrones recurrentes (ISO20816-1, 2016). La Figura 8 presenta el sistema integrado de trazabilidad que ilustra cómo la información circula generando aprendizaje organizacional.

Figura 8

Sistema integrado de trazabilidad.



Nota: En la Figura 8, se evidencia cómo la información circula generando aprendizaje organizacional (Crespo, 2007), (ISO20816-1, 2016) y (González, 2020).

El sistema ilustrado muestra el ciclo completo desde el hallazgo predictivo hasta el análisis de efectividad, evidenciando los puntos de retroalimentación que permiten el aprendizaje organizacional y la mejora continua del proceso de mantenimiento.

La trazabilidad efectiva requiere sistemas de información que vinculen tres niveles de información: decisiones de mantenimiento con antecedentes técnicos que las motivaron; mediciones específicas (valores de vibración, temperatura, concentración de metales) con criterios aplicados para determinar niveles de severidad; y seguimiento posterior para verificar efectividad de acciones implementadas mediante mediciones de confirmación (Crespo, 2007). Esta trazabilidad debe facilitar tres tipos de análisis retrospectivo: evaluación de calidad de decisiones (¿fueron acertados los criterios de intervención?); identificación de patrones en

efectividad de diferentes tipos de intervención (¿qué acciones generan mejores resultados?); y desarrollo de conocimiento institucional que mejore las capacidades futuras de diagnóstico y respuesta (documentación de mejores prácticas) (Crespo, 2007).

La integración con sistemas de gestión de mantenimiento debe asegurar que la información generada sea accesible en tres contextos de uso: análisis futuros de problemas similares; búsquedas temáticas por tipo de fallo o componente; y generación de reportes que apoyen la toma de decisiones a diferentes niveles organizacionales (operativo, táctico, estratégico). Esto requiere tres acciones fundamentales: primero, estandarizar formatos de documentación; segundo, clasificar información mediante taxonomías consistentes; y tercero, establecer mecanismos eficientes de búsqueda y recuperación. Los sistemas integrados deben facilitar el análisis agregado de tres aspectos: tendencias en el desempeño de los equipos, efectividad de las estrategias de mantenimiento aplicadas y oportunidades de mejora en procesos y procedimientos (Morales, s.f.).

4.6. Metodologías de diagnóstico organizacional

Representan un conjunto de técnicas fundamentales para evaluar integralmente los sistemas de mantenimiento industrial. Según Urian y cols. (2023), estas metodologías, trascienden la evaluación técnica tradicional al incorporar cuatro dimensiones de análisis: primero, procesos organizacionales (cómo se planifica y ejecuta el mantenimiento); segundo, estructuras de gestión (roles, responsabilidades, líneas de autoridad); tercero, flujos de información (cómo circulan los datos técnicos); y cuarto, competencias del personal técnico (conocimientos, habilidades, experiencia).

El enfoque holístico del diagnóstico organizacional reconoce una premisa fundamental: las deficiencias en el rendimiento del mantenimiento a menudo tienen causas que requieren metodologías estructuradas para su identificación y corrección efectiva. Las causas pueden ser técnicas (equipos inadecuados, procedimientos deficientes), organizacionales (falta de coordinación, comunicación deficiente) o humanas (capacitación insuficiente, resistencia al cambio) (Urian y cols., 2023).

4.6.1. Auditoría de sistemas de mantenimiento

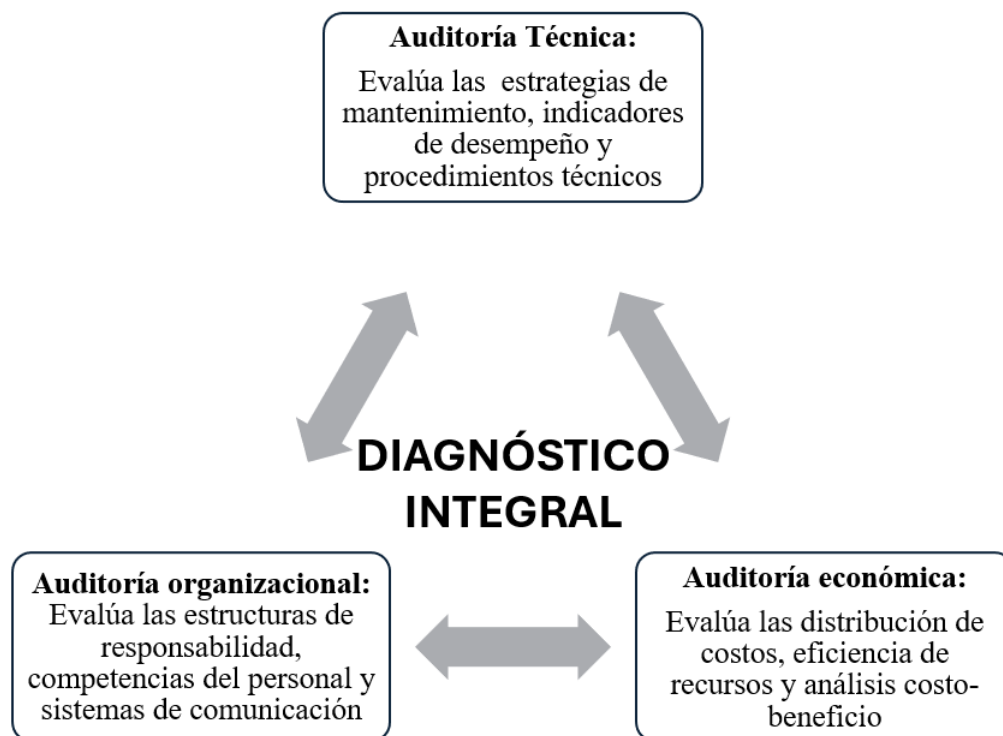
Es una metodología que proporciona evaluación comprensiva de múltiples dimensiones del sistema de gestión de activos industriales. Espinoza y Piedmag (2021) definen la auditoría de

mantenimiento como un proceso que evalúa tres aspectos fundamentales: primero, aspectos técnicos (estado de equipos, efectividad de técnicas predictivas, calidad de procedimientos); segundo, aspectos organizacionales (estructura de responsabilidades, procesos de comunicación, competencias del personal); y tercero, aspectos económicos (costos de mantenimiento, eficiencia en uso de recursos, retorno de inversión).

Este proceso evaluativo requiere un marco estructurado que organice las dimensiones técnicas, organizacionales y económicas de forma coherente. La Figura 9 presenta el marco integrado de auditoría con sus tres componentes principales organizados en bloques interrelacionados.

Figura 9

Marco de auditoría de sistemas de mantenimiento.



Nota: En la Figura 9 se muestra un marco integrado con tres componentes principales organizados en bloques (Espinoza y Piedmag, 2021).

El marco ilustrado organiza la evaluación en tres bloques que abordan aspectos técnicos, organizacionales y económicos, estableciendo las interrelaciones entre cada dimensión para

lograr una evaluación integral del sistema de mantenimiento.

Esta evaluación debe seguir cinco etapas secuenciales: planificación que define alcance, recursos y cronograma; recopilación de evidencia mediante revisión documental, entrevistas y observación directa; análisis de información aplicando criterios normativos; identificación de brechas comparando situación actual versus mejores prácticas; y formulación de recomendaciones priorizadas según impacto y factibilidad (Espinoza y Puedmag, 2021).

Los componentes organizacionales de la auditoría abarcan cuatro áreas de análisis: estructuras de responsabilidad (claridad de roles, líneas de autoridad, mecanismos de coordinación); evaluación de competencias del personal técnico (conocimientos especializados, habilidades prácticas, experiencia acumulada); revisión de sistemas de comunicación interdepartamental (flujos de información, reuniones de coordinación, canales formales e informales); y análisis de cultura organizacional relacionada con mantenimiento (valoración del mantenimiento preventivo, actitud hacia innovación, resistencia al cambio) (Espinoza y Puedmag, 2021).

La implementación efectiva combina dos tipos de técnicas: primero, técnicas cuantitativas que proporcionen mediciones objetivas, y segundo, técnicas cualitativas que capturen percepciones y experiencias. Las técnicas cuantitativas incluyen cuatro herramientas: análisis estadístico de indicadores KPI (disponibilidad, confiabilidad, MTBF, MTTR), evaluación de cumplimiento programático (porcentaje de tareas completadas a tiempo), análisis de distribución de costos (correctivo vs. preventivo vs. predictivo) y benchmarking con estándares industriales relevantes (Espinoza y Puedmag, 2021). Las técnicas cualitativas incluyen tres herramientas: entrevistas estructuradas con personal clave, grupos focales con técnicos de mantenimiento y observación directa de procesos operativos.

4.6.2. Normativas ISO 14224 e ISO 13374-2

La implementación exitosa del diagnóstico organizacional demanda tres elementos fundamentales: marcos conceptuales robustos que orienten la recopilación de información, protocolos estandarizados que garanticen consistencia metodológica y criterios de evaluación objetivos que faciliten la identificación precisa de brechas de desempeño. López (2012) enfatiza que el diagnóstico efectivo debe considerar cuatro aspectos del contexto específico organizacional: primero, características sectoriales (industria de neumáticos con equipos especializados); segundo, complejidad tecnológica de equipos (mixers con múltiples subsistemas); tercero,

restricciones operacionales (disponibilidad limitada para paradas); y cuarto, capacidades organizacionales que influyen en la viabilidad de estrategias de mejora propuestas (recursos disponibles, competencias del personal).

La norma ISO 14224 establece requisitos específicos para la recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento. Esta norma define tres elementos fundamentales: primero, taxonomías para clasificación de equipos, fallas e intervenciones; segundo, procedimientos para recopilación consistente de datos; y tercero, formatos estándar para intercambio de información entre organizaciones (ISO14224, 2016). Los objetivos son dos: asegurar la calidad de la información documentada y facilitar comparaciones entre equipos similares en diferentes contextos operacionales.

La norma ISO13374-2 (2004) proporciona arquitecturas de procesamiento de datos en sistemas de monitoreo y diagnóstico. Esta norma establece dos aspectos críticos: primero, cómo debe fluir la información entre sistemas predictivos (equipos de monitoreo) y sistemas preventivos (sistemas de planificación de mantenimiento); y segundo, qué niveles de procesamiento automático son necesarios para transformar datos brutos en decisiones accionables. La norma define seis niveles de arquitectura funcional: adquisición de datos, manipulación de datos, detección de estado, evaluación de salud, pronóstico de salud y asesoramiento de decisión.

4.7. Desarrollo de procedimientos operativos

Es un proceso fundamental que permite la transformación de modelos conceptuales y marcos teóricos en herramientas prácticas implementables en entornos industriales reales. Según González (2020) este proceso, debe abordar la brecha crítica entre dos niveles: primero, el diseño conceptual que define qué debe hacerse; y segundo, la implementación práctica que especifica cómo debe ejecutarse paso a paso. Los procedimientos desarrollados deben cumplir dos requisitos simultáneos: ser técnicamente correctos (basados en mejores prácticas de ingeniería) y ser operacionalmente factibles (aplicables con recursos y competencias disponibles).

En el contexto específico de la integración de técnicas predictivas con planes de mantenimiento, los procedimientos operativos deben proporcionar tres tipos de guías claras: primero, cómo interpretar resultados predictivos específicos (valores de vibración, temperatura, concentración de metales); segundo, cómo traducir estos hallazgos en acciones apropiadas de

mantenimiento (ajuste, reparación, reemplazo); y tercero, cómo documentar y retroalimentar el proceso para mejora continua (Márquez, León, y Herguedas, 2021).

4.7.1. Principios de diseño de procedimientos técnicos

Establecen los fundamentos metodológicos que aseguran tres atributos esenciales: efectividad (logran el objetivo técnico), eficiencia (optimizan el uso de recursos) y adaptabilidad (funcionan en diferentes contextos operacionales). Luna, Badillo, y Vázquez (2021) establecen cinco principios fundamentales:

1. **Principio de simplicidad operacional:** Los procedimientos deben ser tan simples como sea posible mientras mantengan la completitud técnica necesaria. Esto implica evitar complejidades innecesarias que puedan generar dos problemas: errores de ejecución por confusión o resistencia por parte de los usuarios que perciben el procedimiento como excesivamente complicado (Luna y cols., 2021).
2. **Principio de claridad comunicacional:** Las instrucciones deben cumplir tres requisitos: ser inequívocas (una sola interpretación posible), ser específicas (detallar acciones concretas, no generalidades) y estar expresadas en lenguaje técnico apropiado para la audiencia destinataria. El objetivo es minimizar ambigüedades que puedan resultar en interpretaciones incorrectas (Cervelló, Martínez, Ramírez, y Virgili, 2009).
3. **Principio de completitud funcional:** Los procedimientos deben abordar cuatro aspectos críticos necesarios para la implementación exitosa: preparación (herramientas, equipos, condiciones previas), ejecución (pasos secuenciales detallados), verificación (cómo confirmar que se ejecutó correctamente) y documentación de resultados (qué registrar y dónde) (Sánchez, 2017).
4. **Principio de flexibilidad adaptativa:** Los procedimientos deben acomodar variabilidad en condiciones operacionales, proporcionando dos elementos: marcos estructurados que guían la ejecución y espacios para el ejercicio apropiado del juicio técnico cuando surgen situaciones no previstas (Sánchez, 2017).
5. **Principio de participación del usuario:** El desarrollo efectivo requiere estrecha colaboración con el personal técnico que implementará los procedimientos. Esta colaboración asegura dos aspectos críticos: el diseño refleja realidades operacionales (no solo teoría) y considera restricciones prácticas (tiempo disponible, herramientas existentes, nivel de habilidad) (Luna y cols., 2021).

4.7.2. Criterio de intervención y herramientas de bajo costo

El establecimiento de criterios de intervención traduce evaluaciones técnicas en decisiones operacionales específicas, definiendo dos elementos fundamentales: primero, umbrales numéricos que determinan niveles de severidad; y segundo, reglas lógicas que determinan cuándo son apropiadas las acciones de mantenimiento. Sánchez (2017) establece que estos criterios deben cumplir dos requisitos contradictorios que requieren equilibrio cuidadoso: ser suficientemente específicos para asegurar consistencia entre diferentes evaluadores, pero suficientemente flexibles para acomodar variabilidad operacional legítima.

El desarrollo efectivo requiere equilibrio entre dos aspectos críticos: primero, sensibilidad para detectar problemas emergentes en etapas tempranas (evitar falsos negativos); y segundo, especificidad para evitar falsas alarmas que generen acciones innecesarias y desperdicien recursos (evitar falsos positivos). Este equilibrio se logra mediante calibración empírica basada en experiencia operacional acumulada (Sánchez, 2017).

Los criterios deben considerar cuatro dimensiones fundamentales (Sánchez, 2017):

1. **Severidad técnica basada en análisis de riesgo:** Evalúa la magnitud de la degradación detectada y su potencial para causar falla funcional. Se clasifica en niveles como normal, moderado, severo y crítico.
2. **Urgencia determinada por tasas de degradación:** Evalúa la velocidad de evolución del problema. Una anomalía severa, pero estable, puede ser menos urgente que una anomalía moderada, pero con evolución rápida.
3. **Consecuencias potenciales:** Considera tres tipos de impacto: seguridad del personal, impacto ambiental y aspectos económicos (costos de reparación, pérdida de producción).
4. **Factibilidad de intervención:** Considera recursos disponibles (repuestos, personal especializado, herramientas), ventanas de oportunidad para paradas programadas e impacto en la producción.

La integración de estas cuatro dimensiones permite optimizar dos objetivos simultáneos: maximizar la efectividad de intervenciones (resolver problemas antes de que causen fallas) mientras se minimizan costos operacionales (evitar intervenciones innecesarias o prematuras).

4.8. Metodologías de evaluación y validación

Es el fundamento para verificar que los modelos de integración de mantenimiento predictivo cumplan tres categorías de criterios: primero, calidad técnica (corrección metodológica, completitud, robustez); segundo, factibilidad práctica (viabilidad económica, recursos requeridos, complejidad de implementación); y tercero, efectividad operacional (potencial de mejora, impacto en indicadores clave, sostenibilidad). Parra y Crespo (2012), la validación de sistemas de mantenimiento integrado requiere enfoques multidimensionales que evalúen simultáneamente la corrección técnica y la viabilidad de implementación organizacional.

La evaluación debe proporcionar evidencia objetiva sobre dos aspectos fundamentales: la calidad de las soluciones propuestas (cumplen estándares técnicos reconocidos) y la utilidad práctica (son implementables y generarán beneficios esperados). Esto se logra empleando marcos estructurados que permitan análisis comprensivo de diferentes aspectos críticos mediante criterios predefinidos, escalas de medición consistentes y procesos de evaluación reproducibles (Realyvásquez, Maldonado, y García, 2018).

La complejidad de los sistemas de mantenimiento predictivo integrado demanda metodologías de evaluación que aborden tres dimensiones simultáneamente: dimensión técnica, dimensión organizacional y dimensión económica. Tavner (2012) destaca que la validación efectiva debe considerar estos tres aspectos de manera integral, reconociendo que un modelo técnicamente perfecto puede fallar si no es organizacionalmente aceptable o económicamente viable.

4.8.1. Matrices de evaluación multicriterio

Son marcos estructurados para la evaluación de propuestas complejas según múltiples dimensiones con diferentes niveles de importancia relativa. Saaty (2008) establece que estas matrices deben organizar criterios de evaluación en estructuras jerárquicas que cumplan dos objetivos: facilitar análisis comprensivo descomponiendo problemas complejos en elementos más manejables y permitir comparación objetiva de alternativas mediante agregación ponderada de evaluaciones parciales.

La metodología de proceso de análisis jerárquico (AHP) desarrollada por Saaty permite estructurar problemas complejos de evaluación mediante tres pasos secuenciales: primero, descomposición del problema en jerarquías de criterios y subcriterios más manejables; segundo,

comparación pareada de elementos para determinar pesos relativos; y tercero, síntesis de evaluaciones parciales para generar clasificación global (Saaty y Vargas, 2012).

El diseño efectivo de matrices multicriterio requiere cuatro consideraciones fundamentales. Primero, selección cuidadosa de criterios que sean relevantes (relacionados con objetivos de evaluación), medibles (cuantificables o evaluables mediante escalas cualitativas) y suficientemente específicos para permitir discriminación entre niveles de calidad. Segundo, Belton y Stewart (2012) enfatizan que los criterios deben ser mutuamente independientes (evaluación de un criterio no afecta evaluación de otro) y exhaustivos en conjunto (cubren todos los aspectos relevantes), evitando redundancias que distorsionen evaluaciones finales.

Tercero, la formulación debe ser clara e inequívoca, permitiendo que diferentes evaluadores interpreten criterios consistentemente, lo cual es fundamental para la confiabilidad del proceso de evaluación. Cuarto, las escalas de medición deben ser apropiadas para cada criterio: escalas numéricas para criterios cuantitativos (costos, tiempos), escalas ordinales para criterios cualitativos (bajo/medio/alto) y escalas tipo Likert para evaluaciones de percepciones (1-5, totalmente en desacuerdo a totalmente de acuerdo) (Belton y Stewart, 2012). La Tabla 3 presenta la estructura de matriz de evaluación multicriterio con sus categorías de criterios, escalas de medición y métodos de agregación.

Tabla 3

Estructura de matriz de evaluación multicriterio.

Categoría	Criterio específico	Peso relativo	Escala de medición	Método de medición	Fuente de información
CRITERIOS TÉCNICOS (30%)	Corrección metodológica	10%	1-5 (Deficiente a Excelente)	Revisión por expertos técnicos	Panel de especialistas
	Complejidad de componentes	8%	1-5 (Incompleto a Completo)	Lista de verificación	Auditoría técnica
	Robustez del modelo	7%	1-5 (Frágil a Robusto)	Análisis de sensibilidad	Simulación de escenarios
	Alineación con estándares	5%	1-5 (No conforme a Totalmente conforme)	Comparación con normas	Evaluación de conformidad

La Tabla 3 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 3.

CRITERIOS DE FACTIBILIDAD (25%)	Viabilidad económica	10%	1-5 (No viable a Altamente viable)	Análisis costo-beneficio	Evaluación financiera
	Recursos requeridos	8%	1-5 (Excesivos a Adecuados)	Inventario de necesidades	Análisis de recursos
	Complejidad de implementación	4%	1-5 (Muy compleja a Simple)	Evaluación de procesos	Análisis de complejidad
	Compatibilidad organizacional	3%	1-5 (Incompatible a Compatible)	Evaluación cultural	Análisis organizacional
CRITERIOS DE EFECTIVIDAD (25%)	Potencial de mejora	10%	1-5 (Bajo a Alto)	Proyección de beneficios	Modelado predictivo
	Impacto en KPIs	8%	1-5 (Negativo a Muy positivo)	Análisis de indicadores	Simulación de impactos
	Escalabilidad	4%	1-5 (No escalable a Escalable)	Evaluación de extensibilidad	Análisis de arquitectura
	Sostenibilidad temporal	3%	1-5 (Insostenible a Sostenible)	Análisis de tendencias	Evaluación prospectiva

Nota: La Tabla 3 muestra la matriz de evaluación multicriterio - categorías de criterios, escalas de medición y métodos de agregación (Parra y Crespo, 2012) y (Realyvásquez y cols., 2018).

La estructura presentada organiza los criterios en cuatro categorías principales (técnicos, factibilidad, efectividad y sostenibilidad), con pesos diferenciados que reflejan la importancia relativa de cada dimensión en la evaluación integral de propuestas de integración.

Las escalas de medición deben ser apropiadas para la naturaleza de cada criterio, empleando escalas cuantitativas cuando mediciones objetivas son posibles y escalas cualitativas estructuradas para evaluaciones basadas en juicios subjetivos informados. Ishizaka y Nemery (2013), recomiendan que las escalas cualitativas incluyan definiciones específicas para cada nivel que minimicen ambigüedades en la interpretación. La granularidad debe balancear precisión discriminatoria con practicidad de aplicación, evitando escalas excesivamente detalladas o demasiado gruesas.

4.8.2. Evaluación por panel de expertos técnicos

Aprovecha conocimiento especializado distribuido entre múltiples expertos para generar tres beneficios fundamentales: primero, evaluaciones más robustas que integran diferentes perspectivas; segundo, mayor credibilidad por consenso entre especialistas reconocidos; y tercero, identificación de aspectos críticos que podrían pasar inadvertidos en evaluaciones individuales.

La metodología Delphi, desarrollada por Dalkey y Helmer (1963) en la década de 1960 y actualizada por Rowe y Wright (2011) en el siglo XXI, emplea protocolos que aseguran tres características en las evaluaciones: evaluaciones informadas basadas en documentación técnica completa, evaluaciones objetivas mediante instrumentos estructurados y evaluaciones independientes sin influencia de personalidades dominantes mediante anonimato de respuestas.

La composición del panel debe incluir expertos con cuatro tipos de especialización relevante: expertos técnicos en mantenimiento predictivo con conocimiento profundo de técnicas (vibraciones, termografía, tribología), expertos en gestión de mantenimiento con experiencia en desarrollo de planes y procedimientos, expertos con experiencia operacional en implementación de sistemas similares en contextos industriales comparables y expertos con conocimiento organizacional en gestión del cambio y factores humanos (Rowe y Wright, 2011).

El proceso debe proporcionar cinco tipos de información comprensiva sobre propuestas a evaluar (Skulmoski, Hartman, y Krahn, 2007):

1. **Documentación técnica detallada:** Incluye descripción completa del modelo propuesto, diagramas de flujo, procedimientos desarrollados y herramientas diseñadas.
2. **Evidencia de validación preliminar:** Presenta resultados de pruebas piloto, simulaciones o análisis comparativos que demuestren viabilidad técnica.
3. **Contexto organizacional de implementación:** Describe características de la empresa, capacidades del personal y recursos disponibles.
4. **Análisis de beneficios esperados:** Cuantifica mejoras proyectadas en indicadores clave de desempeño.
5. **Plan de implementación:** Detalla fases, cronograma, recursos requeridos y factores críticos de éxito.

Skulmoski y cols. (2007) enfatizan que los instrumentos de evaluación deben capturar dos tipos de información complementaria: primero, evaluaciones cuantitativas mediante escalas estructuradas (1-5 o 1-10) que permitan análisis estadístico; y segundo, evaluaciones cualitativas mediante comentarios detallados que expliquen razonamientos, identifiquen fortalezas y debilidades específicas, y propongan mejoras constructivas.

El análisis debe emplear tres técnicas estadísticas apropiadas: primero, medidas de tendencia central (media, mediana) para identificar evaluación típica; segundo, medidas de dispersión (desviación estándar, rango intercuartílico) para identificar grados de consenso; y tercero, análisis de varianza para identificar áreas de divergencia significativa entre evaluadores y patrones relacionados con diferentes tipos de expertos (técnicos vs. gerenciales, internos vs. externos) (Skulmoski y cols., 2007).

4.8.3. Comparación con estándares internacionales

La comparación con estándares internacionales proporciona benchmarks objetivos que permiten evaluar la calidad de propuestas relativas a mejores prácticas reconocidas globalmente. Esta comparación cumple tres objetivos fundamentales: validación externa de calidad técnica mediante verificación de conformidad con requisitos normativos, identificación de brechas entre propuesta actual y mejores prácticas internacionales y facilita la comunicación de las propuestas a las partes interesadas mediante referencia a marcos reconocidos internacionalmente.

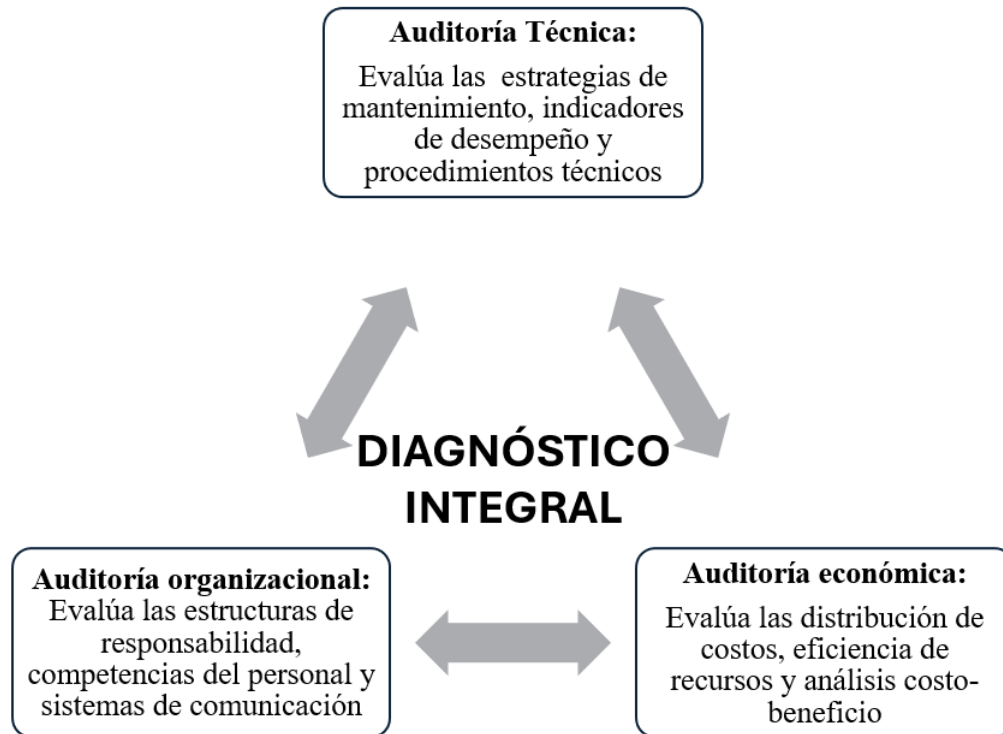
Los estándares ISO relevantes para mantenimiento integrado incluyen tres familias normativas principales (ISO, 2018):

- **Familia ISO 55000 para gestión de activos:** Proporciona marcos para gestión de activos físicos, incluyendo ISO 55000 (fundamentos y terminología), ISO 55001 (requisitos del sistema de gestión) e ISO 55002 (directrices para aplicación). Estos estándares establecen principios para la gestión del ciclo de vida completo de activos (ISO55000, 2014).
- **Norma ISO 14224:2016:** Establece dos elementos fundamentales para la recopilación de datos de confiabilidad y mantenimiento: taxonomías estándar para clasificación de equipos, fallas e intervenciones y procedimientos para recopilación consistente de datos que permitan comparaciones entre organizaciones (ISO14224, 2016).
- **Norma ISO 17359:2018 para monitoreo de condición:** Proporciona marcos específicos para procesamiento de información predictiva en sistemas de mantenimiento basado en condición, estableciendo arquitecturas funcionales y requisitos de calidad de datos (ISO17359, 2018).

La Figura 10 presenta el proceso secuencial de comparación con estándares internacionales.

Figura 10

Proceso de comparación con estándares internacionales.



Nota: En la Figura 10, se muestra un proceso secuencial con cuatro etapas (Parra y Crespo, 2012), (ISO55000, 2014), (ISO14224, 2016) y (ISO17359, 2018).

El proceso ilustrado establece la secuencia desde identificación de estándares aplicables hasta documentación de brechas, proporcionando un marco metodológico para evaluar conformidad normativa de propuestas de integración.

El proceso de comparación debe incluir cuatro actividades fundamentales (Parra y Crespo, 2012):

1. **Análisis detallado de requerimientos establecidos en estándares relevantes:** Identifica qué requisitos son aplicables al contexto específico del proyecto (no todos los requisitos de un estándar aplican a todos los casos).
2. **Identificación de aspectos de propuestas que corresponden a elementos cubiertos por**

estándares específicos: Establece mapeo entre componentes del modelo propuesto y secciones relevantes de las normas.

3. **Evaluación del grado de conformidad con requisitos normativos:** Determina para cada requisito aplicable si la propuesta cumple totalmente (conforme), cumple parcialmente (parcialmente conforme) o no cumple (no conforme).
4. **Documentación de brechas y elaboración de plan de acción:** Identifica áreas donde la propuesta no alcanza estándares internacionales y propone mejoras específicas para cerrar brechas identificadas.

Esta comparación proporciona dos beneficios adicionales: validación externa de calidad técnica mediante conformidad con marcos reconocidos y la facilidad de comunicación a las partes interesadas mediante referencia a estándares que ellos conocen y valoran (Parra y Crespo, 2012).

5. Marco metodológico

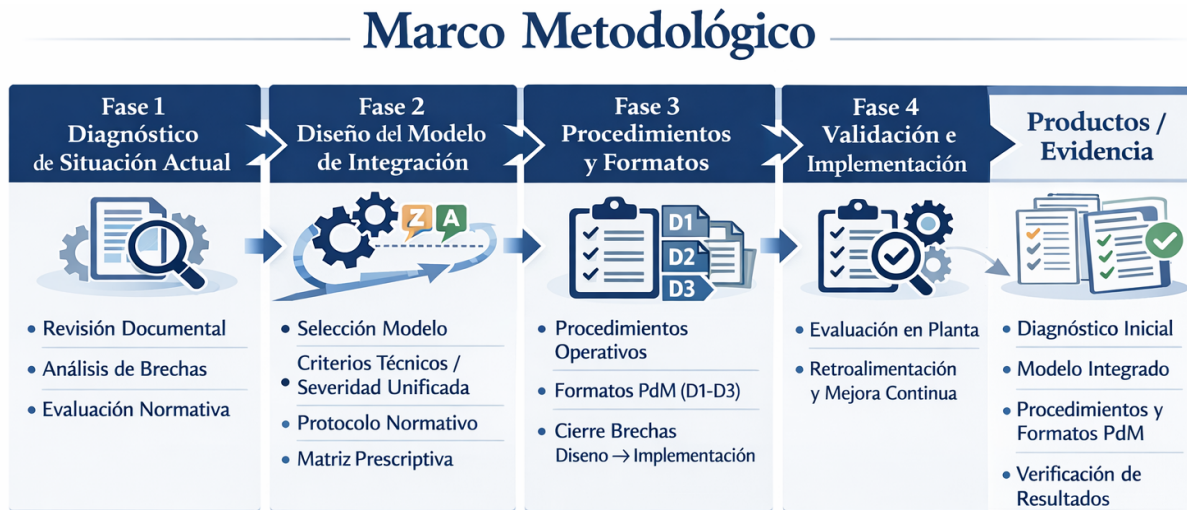
La metodología de la investigación es el conjunto de procedimientos y técnicas que se aplican de manera ordenada y estructurada en la realización de un estudio.

El presente trabajo aplica una metodología de proceso estructurada en cuatro fases secuenciales que corresponden directamente con los objetivos específicos planteados, orientados a proponer un modelo de integración entre las técnicas predictivas y el plan de mantenimiento del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos. Cada fase genera productos que alimentan la siguiente: el diagnóstico identifica brechas operativas, el diseño establece criterios técnicos y matriz de decisión, el desarrollo de procedimientos operacionaliza el modelo mediante formatos estandarizados y la validación teórica demuestra efectividad mediante evaluación retrospectiva, panel de expertos y análisis de conformidad normativa.

Esta estructura metodológica permite abordar el problema de investigación desde el diagnóstico inicial hasta la validación final, garantizando trazabilidad entre hallazgos, diseño, implementación documental y demostración de efectividad. La Figura 11 presenta la estructura metodológica y la secuencia de las cuatro fases del trabajo.

Figura 11

Resumen gráfico del marco metodológico.



Nota: La Figura 11 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

5.1. Diagnosticar el estado actual del plan de mantenimiento y el nivel de integración de las técnicas predictivas implementadas en el mezclador industrial de una empresa manufacturera de neumáticos, mediante evaluación documental basada en normas ISO y validación operativa.

El mezclador industrial es un equipo crítico cuya disponibilidad impacta directamente a la continuidad operativa de la empresa. La empresa ha incorporado técnicas predictivas como análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceite, con el propósito de anticipar fallas y optimizar intervenciones. Sin embargo, existe una desconexión entre los resultados obtenidos con estas técnicas y el plan de mantenimiento preventivo: cuando las técnicas detectan anomalías, se coordinan intervenciones puntuales, pero no existen mecanismos formales para integrar estos hallazgos al plan de mantenimiento.

Además, las intervenciones menores no se documentan correctamente, lo que dificulta la trazabilidad de las acciones realizadas y limita el aprendizaje organizacional derivado de la experiencia operativa. Esta situación plantea la hipótesis de que podría existir una desconexión significativa entre las técnicas predictivas aplicadas y el plan de mantenimiento

preventivo, estimándose retroalimentación efectiva inferior al 30%. Dicho valor representa la proporción de hallazgos predictivos que se traducen en ajustes formales documentados del plan de mantenimiento, incluyendo modificación de frecuencias de tareas existentes, la actualización de procedimientos técnicos o la incorporación de nuevas actividades preventivas derivadas de detecciones predictivas.

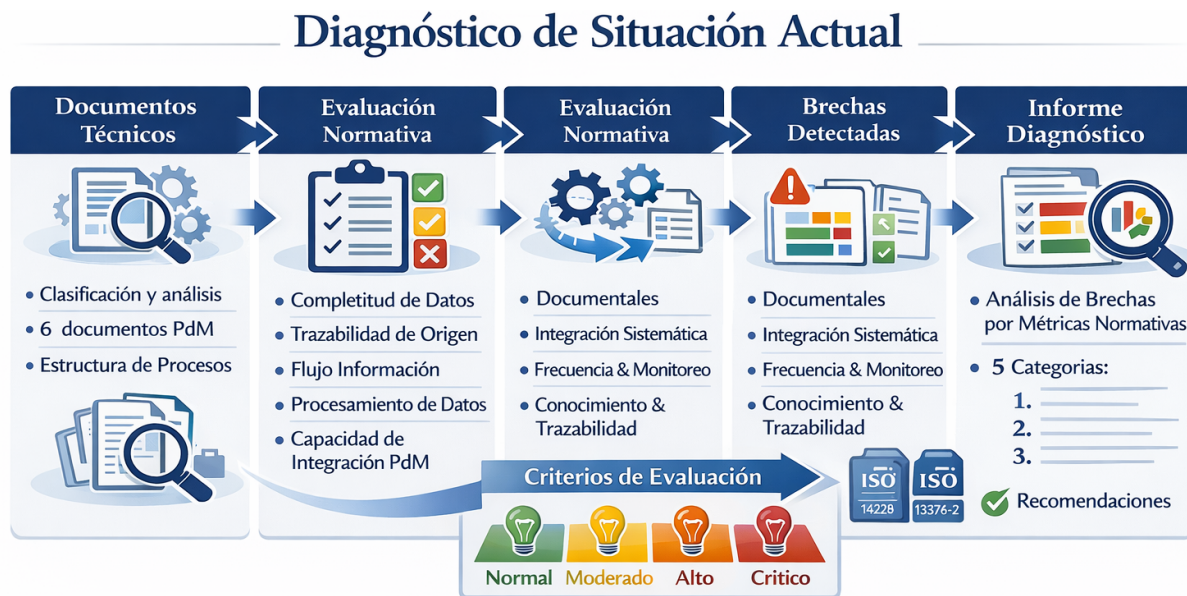
Para diagnosticar esta situación, la fase se estructura en cuatro componentes secuenciales que permiten evaluar integralmente la gestión de mantenimiento del mezclador industrial:

1. **Análisis de la estructura organizacional:** Se identifican roles y responsabilidades del personal mediante el organigrama funcional del departamento, se construye la taxonomía del equipo según lineamientos de la norma ISO 14224 y se elabora el diagrama de procesos de mantenimiento que mapea el flujo de información e identifica los documentos técnicos fundamentales generados durante la gestión del equipo.
2. **Revisión documental:** Se desarrollan métricas de evaluación documental basadas en las normas ISO 14224 e ISO 13374-2 que miden completitud de datos, trazabilidad de origen, flujo de información, procesamiento de datos y capacidad de integración predictiva y aplica estas métricas individualmente a cada uno de los documentos identificados.
3. **Análisis de brechas:** Compara los resultados de la evaluación documental contra los requisitos normativos establecidos, identifica categorías de desviaciones operativas y respalda cada brecha con evidencia documental específica obtenida de las evaluaciones individuales.
4. **Validación operativa:** Diseña cuestionarios estructurados con escala de Likert, los aplica al personal del departamento que gestiona directamente el mezclador industrial y confirma la existencia de las brechas identificadas desde la perspectiva operativa del personal, consolidando hallazgos que establecen la línea base técnica para el modelo de integración propuesto.

La Figura 12 sintetiza el proceso de diagnóstico y los hallazgos obtenidos.

Figura 12

Resumen gráfico de la Fase 1: Diagnóstico de la situación actual.



Nota: La Figura 12 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

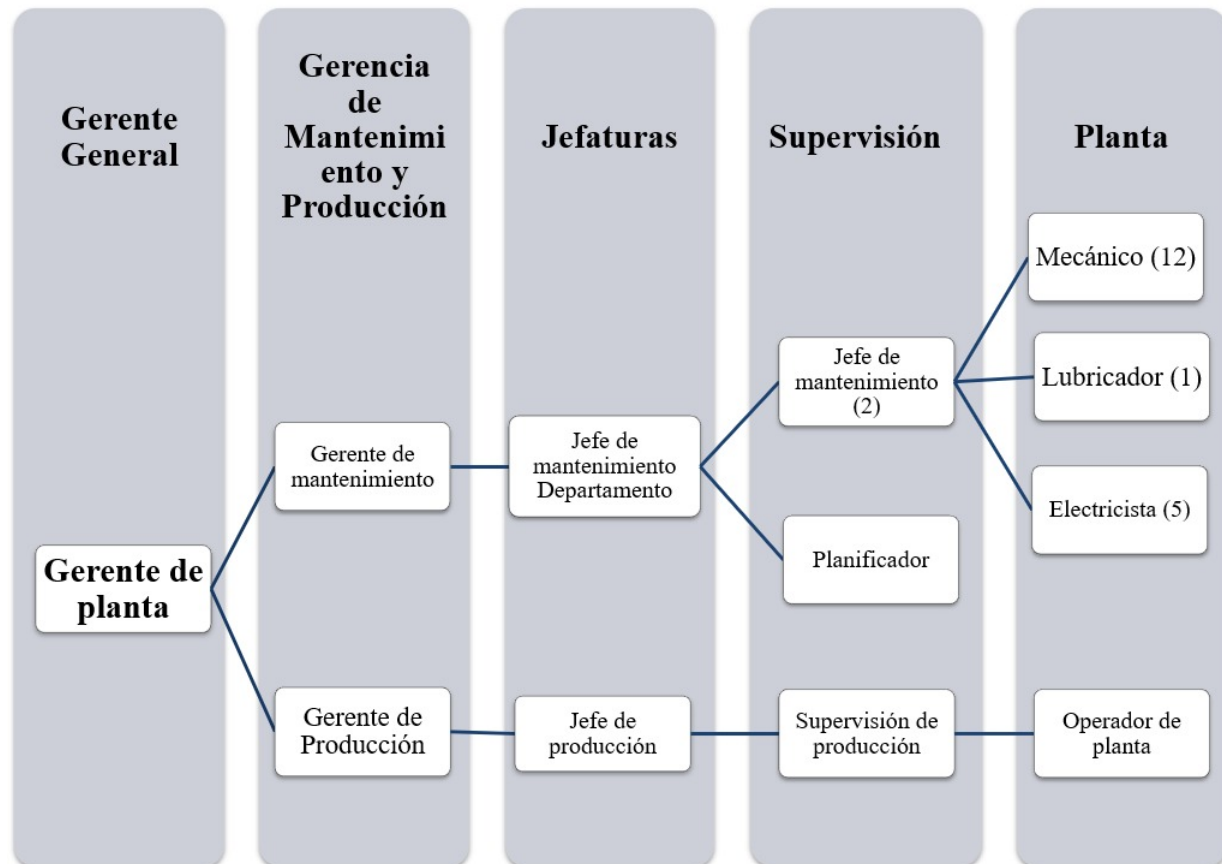
5.1.1. Estructura organizacional del departamento de mantenimiento

El análisis del organigrama identifica tres aspectos fundamentales: primero, los niveles de autoridad desde gerencia hasta personal técnico; segundo, los responsables directos del mezclador industrial según su función asignada; y tercero, las líneas de comunicación entre el personal que ejecuta técnicas predictivas y quienes actualizan el plan preventivo.

El diagnóstico requiere identificar los roles y responsabilidades que intervienen en la gestión del mezclador industrial. A continuación, en la Figura 13 se presenta el organigrama funcional del departamento de mantenimiento.

Figura 13

Organigrama del departamento de mantenimiento.



Nota: En la Figura 13, muestra el organigrama funcional del departamento de mantenimiento.

La estructura organizacional muestra que el jefe de mantenimiento del departamento centraliza las decisiones técnicas y supervisa dos funciones principales: el planificador, responsable de la planificación y programación del mantenimiento, y los técnicos de planta, quienes constituyen el personal técnico operativo. Estos roles determinan cómo fluye la información técnica del mezclador industrial, aspecto fundamental para analizar la documentación y procesos actuales.

5.1.2. Taxonomía del equipo

El departamento de mantenimiento no cuenta con clasificación estandarizada del mezclador industrial, lo que dificulta el registro uniforme de la información técnica y la trazabilidad de intervenciones. Esta ausencia de estructura formal impide correlacionar hallazgos de téc-

nicas predictivas con componentes específicos del equipo y limita el análisis de patrones de falla.

La norma ISO 14224 define taxonomía como “clasificación de activos en grupos basados en factores comunes” y establece una estructura jerárquica de nueve niveles para equipos industriales, que desciende desde la instalación completa hasta componentes individuales como tornillos o sellos. (Carrillo) señala que “en una planta o infraestructura se puede resumir los siguientes niveles”, presentando una estructura descendente desde plantas generales hasta componentes específicos, como se observa en la Figura 14, donde los primeros cuatro niveles resultan suficientes para clasificar el mezclador industrial según su complejidad operativa. Esta delimitación hasta el cuarto nivel resulta apropiada porque las técnicas predictivas implementadas en el mezclador industrial, vibraciones, termografía y análisis de aceite, generan diagnósticos en los subsistemas sin requerir mayor desagregación hacia componentes individuales.

Figura 14

Diagrama jerárquico ISO 14224 con los 4 niveles aplicados al mezclador industrial.



Nota: En la Figura 14, muestra la estructura jerárquica ISO 14224 adaptada de (Carrillo). Planificación, Programación y Evaluación de la Gestión del Mantenimiento. Para este estudio se aplicaron los niveles 1 a 4 delimitados por la línea superior.

La elaboración de la taxonomía del mezclador industrial se realizó mediante revisión del plan de mantenimiento proporcionado por el departamento, en el que se identificaron los sistemas principales del equipo, se extrajeron los subsistemas con sus denominaciones exactas

tal como aparecen registrados en el plan y se verificaron las técnicas predictivas programadas para cada subsistema. Esta información se organizó en una estructura jerárquica de cuatro niveles siguiendo los lineamientos de ISO 14224 y la estructura resultante se presentó al jefe de mantenimiento y al planificador para la revisión técnica, donde se incorporaron correcciones sugeridas por ambos responsables para confirmar que la clasificación reflejara con precisión la configuración real del mezclador industrial y su esquema operativo de mantenimiento. La taxonomía final se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4

Taxonomía del equipo.

Nivel 1 Planta	Nivel 2 Sistema	Nivel 3 Equipo	Nivel 4 Subsistemas	Tipo de mantenimiento	Técnica predictiva
Área de producción	Mezclador industrial	Turbina	Absorbedor de negro de humo	Preventivo-Predictivo	Análisis de vibraciones-Termografía
			Absorbedor de gases	Preventivo-Predictivo	Análisis de vibraciones-Termografía
			Soplador de motores	Preventivo-Predictivo	Análisis de vibraciones y Termografía
			Colector de Negro Humo	Preventivo	N/A
		Pasaje de humo negro	Tecles	Preventivo	N/A
			Balanza de negro de humo	Preventivo	N/A
		Pasaje de aceite	Tanques de aceite	Predictivo	Análisis de aceite
			Balanza aceite de proceso	Predictivo	Análisis de aceite
			Sistema de inyección a cámara	Predictivo	Análisis de aceite
		Pasaje de caucho	Cargador de caucho	Preventivo	N/A
			Cargador pacas de caucho	Preventivo	N/A
			Balanza de caucho	Preventivo	N/A
			Alimentador a cámara	Preventivo	N/A
		Mezclado de caucho	Camara de mezclado	Predictivo	Análisis de aceite
			Extrusora de descarga	Preventivo-Predictivo	Análisis de vibraciones, Análisis de aceite y Termografía
			Calandria de laminado	Preventivo-Predictivo	Análisis de vibraciones, Análisis de aceite y Termografía
		Enfriamiento de caucho	Tinas de lechada	Preventivo	N/A
			Rack de enfriamiento	Preventivo	N/A
		Almacenamiento	Wig-Wag	Preventivo	N/A
			Stacker	Preventivo	N/A
		Motores	Motor	Preventivo-Predictivo	Termografía
		Sistema neumático	Sistema neumático	Preventivo	N/A
		Transporte	Traportadores	Preventivo	N/A

Nota: En la Tabla 4 se muestra el término "Turbina", en Nivel 3 que corresponde a la denominación utilizada en el plan de mantenimiento de la empresa para identificar a la torre de producción de negro de humo para mezclar los gases y crear las llamas.

La taxonomía identifica 23 subsistemas operativos del mezclador industrial distribuidos en 10 sistemas principales. De estos subsistemas, 10 incorporan técnicas de mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones, termografía y/o análisis de aceite, representando 43% del equipo total, mientras los 13 subsistemas restantes operan únicamente bajo mantenimiento preventivo predeterminado. Los subsistemas con técnicas predictivas concentran equipos rotativos críticos como absorbedores, soplador, extrusora y calandria, además de sistemas de lubricación como tanques, balanzas y cámara de mezclado, cuya falla impacta directamente la continuidad operativa. Esta distribución establece el alcance de la evaluación documental posterior: analizar cómo los hallazgos predictivos generados en estos 10 subsistemas se integran al plan de mantenimiento preventivo del equipo completo. La taxonomía proporciona códigos únicos para cada subsistema, permite vincular técnicas predictivas con componentes específicos del mezclador industrial y establece la estructura estandarizada necesaria para analizar los flujos documentales del sistema de mantenimiento.

5.1.3. Diagrama de procesos de mantenimiento

La taxonomía del mezclador industrial permitió establecer la clasificación técnica de subsistemas y las técnicas predictivas asociadas a cada uno. Para entender cómo el departamento gestiona el mantenimiento de estos subsistemas, se requiere conocer el contexto operativo.

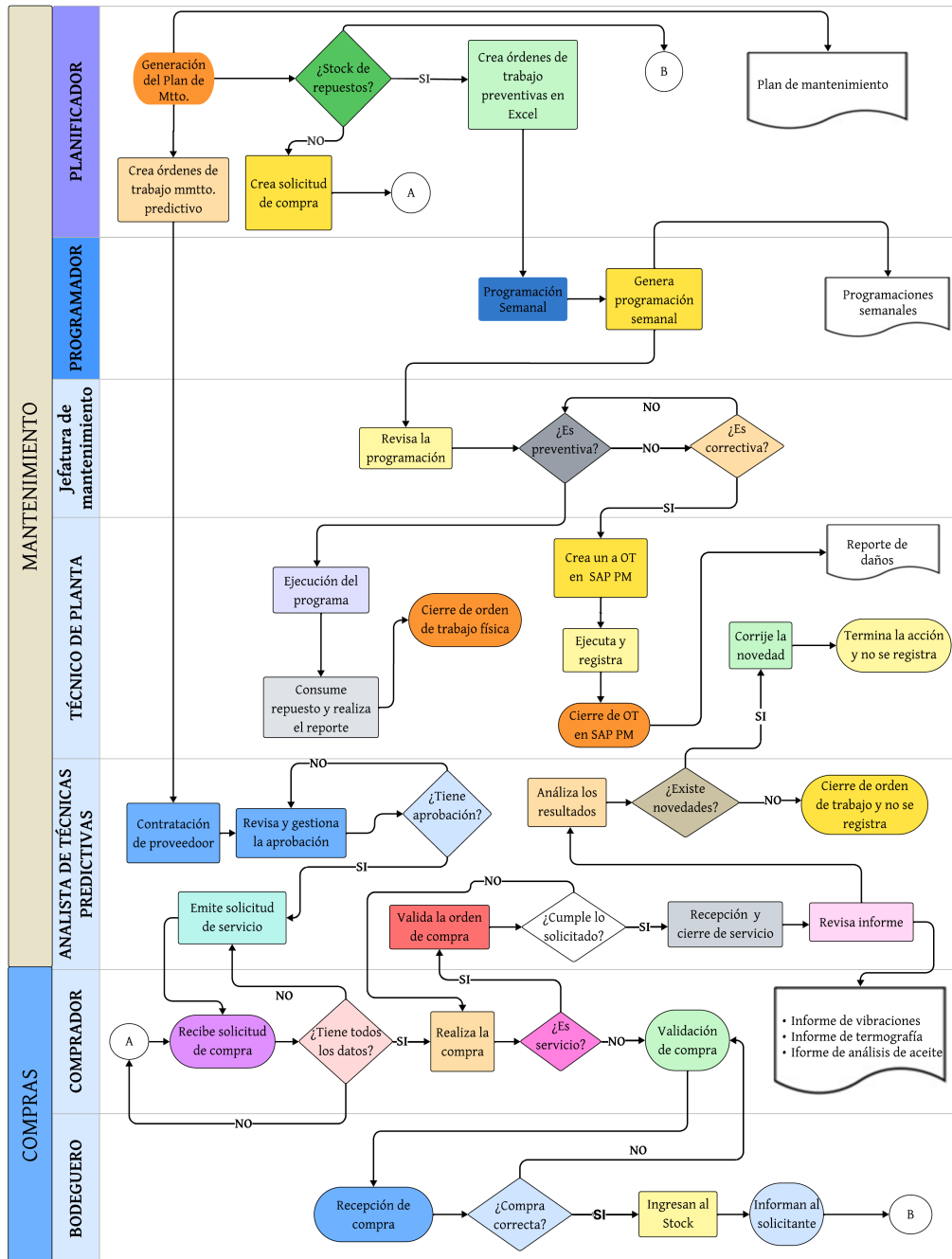
En consecuencia, se elaboró un diagrama de flujo que representa las actividades de planificación, ejecución, registro y análisis de la información. La elaboración de este diagrama se realizó con la revisión de documentos técnicos proporcionados por el departamento de mantenimiento, donde cada responsable entregó los documentos correspondientes a su función según el organigrama: el planificador con el plan de mantenimiento y programaciones semanales y el jefe de mantenimiento facilitó informes de técnicas predictivas generados por proveedores externos. El diagrama resultante fue validado por el jefe de mantenimiento y el planificador, quienes confirmaron que el flujo representado corresponde al proceso operativo real del departamento.

El diagrama identifica las rutas que siguen los órdenes de trabajo desde su origen, ya sea por plan preventivo, informe predictivo o falla correctiva, hasta su cierre y documentación. Esta identificación permitió determinar los documentos técnicos generados en cada etapa del proceso, los responsables de su elaboración según los roles del organigrama y los puntos de almacenamiento correspondientes. La Figura 15 presenta el diagrama de flujo del proceso de

mantenimiento.

Figura 15

Diagrama actual del proceso de planificación del departamento de mantenimiento.



Nota: En la Figura 15, presenta el diagrama de flujo del proceso de mantenimiento.

El diagrama revela que el departamento opera en tres flujos principales: inspecciones predictivas programadas, tareas preventivas del plan de mantenimiento e intervenciones correctivas registradas en SAP PM. Cada flujo genera documentos específicos que contienen información técnica del mezclador industrial. Los seis documentos identificados son: el plan de mantenimiento y las programaciones, el informe de análisis de vibraciones, el informe de termografía, el informe de análisis de aceite y el reporte de daños del sistema en SAP PM. Estos documentos representan la base para evaluar la calidad técnica y capacidad de integración del sistema de mantenimiento.

5.1.4. Revisión documental

La gestión de mantenimiento del mezclador industrial genera múltiples documentos técnicos durante la planificación, ejecución y registro de actividades. La revisión documental evalúa si estos documentos cumplen requisitos normativos de calidad según ISO 14224 e ISO 13374-2 y si permiten la integración efectiva entre sistemas predictivo y preventivo.

La revisión se estructura en tres componentes secuenciales: primero, la identificación de documentos establece cuáles existen, quién la genera y dónde se almacena; segundo, el desarrollo de métricas traduce requisitos ISO en cinco criterios medibles: completitud de datos, trazabilidad de origen, flujo de información, procesamiento analítico e integración predictiva; y tercero, la evaluación documental aplica estas métricas a cada documento, determinando fortalezas y deficiencias específicas. Los resultados proporcionan la base técnica para identificar brechas operativas que impiden retroalimentación efectiva entre hallazgos predictivos y el plan de mantenimiento preventivo.

5.1.4.1. Identificación de documentos

El diagrama de procesos de la Figura 15 mostró que el mantenimiento del mezclador industrial genera información en diferentes etapas. La identificación de documentos determina cuáles son estos documentos, quién los genera y dónde se almacenan mediante coordinación directa con los responsables del departamento.

Se coordinó con el planificador del departamento para acceder al plan de mantenimiento y las programaciones semanales; se estableció contacto con el jefe de mantenimiento para obtener los informes de las técnicas predictivas; y se accedió al sistema SAP PM corporativo para extraer los reportes de daños correctivos. La Tabla 5 consolida esta identificación.

Tabla 5*Identificación de documentos técnicos.*

Documento técnico	Código del documento	Generado por	Formato de archivo	Almacenamiento
Plan de mantenimiento	-	Planificador	Excel	Digital
Programaciones semanales	-	Planificador	Excel	Físico
Informe de análisis de vibraciones	-	Proveedor externo	PDF	Físico
Informe de termografía	-	Proveedor externo	PDF	Físico
Informe de análisis de aceite	-	Proveedor externo	PDF	Físico
Reporte de daños	-	Sistema SAP PM	SAP PM	Digital

Nota: La Tabla 5, consolida esta identificación de los documentos técnicos.

La identificación establece seis tipos de documentos: tres generados por proveedores externos especializados en técnicas predictivas y tres generados internamente por el departamento de mantenimiento. Esta información proporciona la base para evaluar la calidad técnica de cada documento.

5.1.4.2. Desarrollo de métricas de evaluación documental

Para evaluar los documentos identificados en la Tabla 5, resulta indispensable establecer criterios objetivos que permitan determinar la calidad y capacidad de integración. Con este propósito se seleccionan normas internacionales que definen requisitos para el registro de información de mantenimiento, se desarrollan métricas específicas basadas en estos requisitos y se establecen criterios operacionales para su aplicación a la documentación del mezclador industrial.

5.1.4.2.1. Selección de normas

La norma ISO 14224:2006 establece requisitos específicos para evaluar la calidad de documentación en mantenimiento industrial, define qué información debe contener un documento técnico de mantenimiento (completitud) y cómo debe identificarse su origen y responsables (trazabilidad), aspectos fundamentales para determinar si los documentos del mezclador industrial cumplen estándares internacionales de calidad.

La norma ISO 13374-2:2004 define arquitecturas de integración para sistemas de mantenimiento basado en condición, y establece cómo debe fluir la información entre sistemas

de monitoreo predictivo y sistemas de planificación preventiva, cómo debe procesarse automáticamente y cómo deben integrarse los hallazgos predictivos en decisiones de mantenimiento. Estos criterios son directamente aplicables al problema identificado: la desconexión entre técnicas predictivas y el plan de mantenimiento del mezclador industrial.

5.1.4.2.2. Desarrollo de métricas

El desarrollo de métricas se realizó con el análisis de requisitos establecidos en ISO 14224:2006 para campos de información obligatorios y en ISO 13374-2:2004 para arquitecturas funcionales de procesamiento. A partir de estos requisitos se definieron cinco métricas con escalas de medición apropiadas: cuantitativa para completitud y cualitativas ordinales para las demás métricas. Las cinco métricas desarrolladas son:

1. **Completitud de datos:** Mide el porcentaje de campos de información obligatorios presentes en cada documento.
2. **Trazabilidad de origen:** Evalúa la capacidad de identificar quién generó el documento, cuándo fue creado, bajo qué metodología y si existe control de cambios documentado.
3. **Flujo de información:** Determina si los datos pueden intercambiarse entre sistemas de manera automática, estructurada, o si requieren transferencia manual.
4. **Procesamiento de datos:** Evalúa la capacidad del sistema para analizar información mediante algoritmos, tendencias o umbrales dinámicos versus registro simple de valores.
5. **Capacidad de integración predictiva:** Mide si existen mecanismos formales para que los hallazgos de técnicas predictivas modifiquen el plan de mantenimiento preventivo.

La Tabla 6 presenta estas métricas con sus criterios de evaluación y aplicación específica al mezclador industrial.

Tabla 6*Métricas de evaluación documental desarrolladas.*

Métrica	Norma base	Criterio de evaluación	Métrica de medición	Aplicación al mezclador industrial
Complejidad de datos	ISO 14224	Porcentaje de campos obligatorios completados según estándares de calidad de datos	Escala 0-100 %: - Excelente (>90 %) - Buena (70-90 %) - Limitada (50-69 %) - Deficiente (<50 %)	Verificar información completa de componentes, parámetros técnicos, fechas y procedimientos.
Trazabilidad de origen	ISO 14224	Identificación clara y documentada del origen de datos con verificación de fuente	Escala cualitativa: - Excelente (identificación completa + metodología) - Adecuada (identificación + responsable) - Limitada (solo identificación) Deficiente (sin trazabilidad)	Evaluar autoría, responsable, metodología y rastreabilidad de la información técnica.
Flujo de información	ISO 13374-2	Integración en arquitectura de datos de monitoreo y diagnóstico de condición (CM&D)	Escala cualitativa: - Excelente (integración automática) - Bueno (intercambio estructurado) - Limitado (transferencia manual) - Deficiente (información aislada)	Verificar capacidad de intercambio de datos entre sistemas predictivos y de planificación.
Procesamiento de datos	ISO 13374-2	Capacidad de procesamiento automático para análisis y toma de decisiones técnicas	Escala cualitativa: - Avanzado (algoritmos automáticos) - Competente (análisis estructurado) - Básico (verificación simple) - Limitado (sin procesamiento)	Evaluar formato, estructura y compatibilidad para análisis estadístico y correlacional.
Capacidad de integración predictiva	13374-2	Facilita la incorporación de hallazgos predictivos en planificación de mantenimiento	Escala cualitativa: - Alta (retroalimentación automática) - Media (mecanismos documentados) - Baja (sin integración formal) - Nula (sistemas independientes)	Verificar potencial de retroalimentación entre información predictiva y preventiva.

Nota: La Tabla 6, presenta estas métricas con sus criterios de evaluación y aplicación específica al mezclador industrial.

Para garantizar la aplicación consistente de estas métricas durante la evaluación documental, resulta necesario traducir los requisitos normativos abstractos en parámetros operacionales verificables. En consecuencia, la Tabla 7 detalla los criterios operacionales específicos que definen los niveles de cumplimiento para cada métrica, estableciendo cuándo un documento alcanza evaluación Excelente, Buena, Limitada o Deficiente según la evidencia documental.

Tabla 7*Criterios operacionales para aplicar las métricas de evaluación documental.*

Métrica	Nivel de evaluación	Criterios operacionales específicos
Compleitud de datos	Excelente (>90%)	Cuando más del 90% de los campos obligatorios están presentes: identificación del equipo, localización, parámetros técnicos, fechas de ejecución, responsables, procedimientos aplicados.
	Buena (70-90%)	Entre 70% y 90% de campos obligatorios presentes.
	Limitada (50-69%)	Entre 50% y 69% de campos obligatorios presentes.
	Deficiente (<50%)	Menos del 50% de campos obligatorios presentes.
Trazabilidad de origen	Excelente	Cuando tiene la identificación completa del autor o responsable, incluye control de cambios documentado con fechas y razones de modificaciones, especifica la metodología técnica aplicada.
	Adecuada	Cuando tiene identificación del responsable sin metodología detallada.
	Limitada	Solo cuando tiene identificación básica.
	Deficiente	Cuando carece de elementos de trazabilidad.
Flujo de información	Excelente	Cuando tiene integración automática entre sistemas de monitoreo predictivo y sistemas de planificación mediante interfaces digitales.
	Bueno	Cuando tiene intercambio estructurado con intervención mínima.
	Limitado	Cuando requiere procesos manuales de transcripción.
	Deficiente	Cuando la información permanece aislada.
Procesamiento de datos	Avanzado	Cuando implementa algoritmos automáticos para análisis de tendencias y generación de alertas.
	Competente	Cuando incluye análisis estructurado manual con metodologías documentadas.
	Básico	Cuando realiza verificación simple con umbrales fijos.
	Limitado	Cuando carece de capacidades analíticas.
Capacidad de integración predictiva	Alta	Cuando existen mecanismos automáticos que traduzcan hallazgos predictivos en ajustes del plan sin intervención externa.
	Media	Cuando existen procedimientos documentados que establecen cómo modificar la planificación, aunque la implementación sea manual.
	Baja	Cuando las técnicas operan como verificaciones independientes sin protocolos formales de integración.
	Nula	Cuando los sistemas funcionan completamente aislados.

Nota: En la Tabla 7 se presenta los criterios operacionales desarrollados a partir de requisitos establecidos en ISO 14224:2006 e ISO 13374-2:2004, aplicados específicamente al contexto operativo del mezclador industrial.

Los criterios operacionales transforman requisitos normativos generales en escalas de medición objetivas y reproducibles, asegurando que la evaluación de cada documento técnico del mezclador industrial sea comparable, rastreable y que se alinee con estándares internacionales de calidad en gestión de mantenimiento industrial.

5.1.4.3. Evaluación documental

La evaluación documental se realiza mediante la aplicación de las métricas para identificar fortalezas y limitaciones de cada documento en su capacidad para facilitar la integración entre sistemas predictivos y preventivos.

Se evalúa individualmente los documentos identificados en la Tabla 5, organizados en cinco grupos de evaluación:

1. Evaluación del plan de mantenimiento y programaciones preventivas.
2. Evaluación del informe de análisis de vibraciones.
3. Evaluación del informe de termografía.
4. Evaluación del informe de análisis de aceite.
5. Evaluación del reporte de daños del sistema SAP PM.

Para cada documento se aplican las métricas de completitud de datos, trazabilidad de origen, flujo de información, procesamiento de datos y capacidad de integración predictiva que se desarrollaron en la Tabla 6, determinando el nivel de cumplimiento según las escalas establecidas en la Tabla 7.

5.1.4.3.1. Evaluación del plan de mantenimiento y las programaciones preventivas

Estos documentos se evalúan conjuntamente porque las programaciones se derivan directamente del plan de mantenimiento. El plan de mantenimiento es un documento formal, en su sexta revisión del 6 de febrero de 2025, elaborado por el planificador. El documento estructura 145 tareas de mantenimiento organizadas en 12 subsistemas principales. Cada tarea específica: descripción técnica, frecuencia de ejecución, estado del equipo durante la intervención, métodos de trabajo, responsable técnico, personal requerido, tiempo estimado y código de registro. Incluye tres técnicas predictivas: vibraciones (semestral), aceites (anual) y termografía (anual).

A continuación, se evalúa el plan de mantenimiento:

1. **Compleitud de datos:** Se realizó con la revisión directa de las 145 tareas del plan. Se identificaron 8 campos obligatorios según ISO 14224 (Sección 9): descripción, frecuencia, responsable, tiempo estimado, métodos, personal requerido, estado del equipo y código. La verificación campo por campo confirmó que las 145 tareas contienen estos 8 campos ($145/145 = 100\% = \text{Excelente según escala } >90\%$). Para la integración predictiva se buscaron 3 campos adicionales: criterios de ajuste de frecuencias, umbrales de decisión y procedimientos de retroalimentación. Ninguna de las 3 técnicas predictivas incluye estos campos ($0/3 = 0\% = \text{Deficiente } <50\%$).
2. **Trazabilidad de origen:** Para esta métrica se verificó la presencia de elementos de identificación requeridos por ISO 14224: autor identificado (campo “Elaborado por: Planificador”), control de cambios con 6 revisiones documentadas (Rev. 1 a Rev. 6, fechas desde 15/03/2015 hasta 06/02/2025), razones de cada actualización registradas. Se verificó en cada tarea: códigos únicos de registro (predominantemente presentes en 145/145 tareas). Todos los elementos de trazabilidad presentes (4/4 elementos = Excelente).
3. **Flujo de información:** El análisis siguió los lineamientos de ISO 13374-2, Sección 3. Se buscaron campos en las 3 técnicas predictivas que permitan intercambio automático de datos con sistema de planificación: 9 conectividad digital, transferencia automática de hallazgos, generación automática de ajustes al plan. La revisión de las filas de vibraciones, aceites y termografía no muestra campos de integración digital (0/3 técnicas con conectividad). Transferencia manual = Limitado.
4. **Procesamiento de datos:** Conforme a ISO 13374-2 (Sección 4). Se buscaron en las 145 tareas: algoritmos de ajuste automático de frecuencias, campos de umbrales dinámicos, procesamiento de tendencias históricas. Las frecuencias son valores fijos (mensual, bimensual, trimestral, semestral, anual) sin campos de modificación automática (0/145 tareas con procesamiento dinámico). Verificación simple sin procesamiento = Limitado.
5. **Capacidad de integración predictiva:** Aplicando ISO 13374-2 Secciones 4.5-4.6, se buscaron procedimientos documentados en sección de técnicas predictivas: criterios de decisión post-hallazgos, mecanismos de retroalimentación al plan, protocolos de ajuste de frecuencias. No existen procedimientos formales documentados en el plan (0/3 técnicas con procedimientos de retroalimentación). Sistemas independientes = Nula.

La Tabla 8 consolida los resultados de las cinco evaluaciones realizadas.

Tabla 8

Evaluación del plan de mantenimiento según métricas normativas.

Métrica	Evaluación	Escala
Compleitud de datos	Excelente (100%) estructura / Deficiente (<50%) predictiva	0-100%
Trazabilidad se origen	Excelente	Cualitativa
Flujo de información	Limitado	Cualitativa
Procesamiento de datos	Limitado	Cualitativa
Capacidad de integración	Nula	Cualitativa

Nota: La Tabla 8, consolida los resultados de evaluación del plan de mantenimiento.

El plan de mantenimiento presenta robustez documental formal con completitud estructural y trazabilidad excelentes, evidenciando cumplimiento de requisitos básicos ISO 14224. Sin embargo, las deficiencias críticas en integración predictiva confirman que las técnicas de monitoreo operan como tareas programadas independientes sin mecanismos formales para modificar la planificación preventiva.

5.1.4.3.2. Evaluación del informe de análisis de vibraciones

Los informes documentan el monitoreo de condición en equipos rotativos críticos del mezclador industrial, mediante el análisis de vibraciones. Los informes de análisis de vibraciones son generados por un proveedor externo, mediante mediciones con el equipo Emerson CSI 2140 siguiendo la metodología ISO 10816-3, para evaluar la severidad de la vibración. Estos informes evalúan cuatro subsistemas del mezclador industrial: absorbedor de negro de humo, absorbedor de gases, soplador de motores y conjunto extrusora-calandria.

A continuación, se evalúa el informe de análisis de vibraciones:

1. **Compleitud de datos:** Los informes presentan completitud críticamente deficiente. La evaluación identificó 12 campos obligatorios según ISO 14224 para documentación de mediciones predictivas: identificación normalizada del equipo, código de localización, especificación de puntos de medición con coordenadas espaciales, parámetros de operación durante medición (carga, velocidad, temperatura), configuración instrumental, procedimientos aplicados, analista responsable, fecha de medición, valores medidos, umbrales de

comparación, diagnóstico técnico y recomendaciones. Los informes incluyen únicamente 4 campos (analista, fecha, valores medidos, recomendaciones genéricas), alcanzando 33% de completitud (4/12 campos presentes). Esta deficiencia impide correlacionar mediciones con condiciones operacionales específicas y dificulta la reproducibilidad de diagnósticos.

2. **Trazabilidad de origen:** Alcanza nivel excelente al cumplir los tres requisitos establecidos: identificación completa del técnico responsable de mediciones, especificación de fecha exacta de inspección y detalle de metodología normativa aplicada (ISO 10816-3). Los informes incluyen firma del analista certificado y sello institucional del proveedor, cumpliendo requisitos de ISO 14224 para identificación de origen.
3. **Flujo de información:** Es limitado, porque opera mediante entrega física de informes PDF impresos al departamento de mantenimiento sin integración digital con sistemas de planificación. La evaluación según ISO 13374-2 Sección 3 requiere intercambio automático de datos entre sistemas de monitoreo y planificación. Los informes actuales requieren transcripción manual completa, generando tres problemas: demoras entre detección y notificación (5-7 días según validación operativa), riesgo de pérdida durante transcripción e imposibilidad de análisis integrado correlacionando datos vibratorios con otras fuentes predictivas o registros de SAP PM.
4. **Procesamiento de datos:** Alcanza nivel básico según ISO 13374-2 Sección 4, que establece seis niveles funcionales de procesamiento. Los informes implementan únicamente el nivel 1 (adquisición de datos) y el nivel 3 básico (detección de estado mediante comparación con umbrales fijos ISO 10816-3). No implementan análisis de tendencias históricas (nivel 4), evaluación de salud mediante correlaciones multivariadas (nivel 5) ni pronóstico de degradación futura (nivel 6). Las recomendaciones son genéricas (“seguir monitoreo periódico”) sin umbrales cuantitativos específicos que orienten decisiones de intervención.
5. **Capacidad de integración:** Es baja según ISO 13374-2 Secciones 4.5-4.6, que requieren retroalimentación documentada entre diagnósticos y planificación. Los informes carecen de tres elementos críticos: mecanismos formales para generar órdenes de trabajo preventivas derivadas de hallazgos, protocolos documentados para modificar frecuencias de tareas según evolución de parámetros y criterios de escalamiento de acciones basados en severidad, evidenciando operación aislada sin retroalimentación al plan de mantenimiento.

La Tabla 9 consolida los resultados de evaluación del informe de análisis vibracional mediante las cinco métricas desarrolladas.

Tabla 9

Evaluación del informe de análisis de vibraciones según métricas normativas.

Métrica	Evaluación	Escala
Completitud de datos	Deficiente (<50%)	0-100%
Trazabilidad se origen	Excelente	Cualitativa
Flujo de información	Limitado	Cualitativa
Procesamiento de datos	Básico	Cualitativa
Capacidad de integración	Baja	Cualitativa

Nota: La Tabla 9, consolida los resultados de evaluación del informe de análisis de vibraciones.

Los informes de análisis de vibraciones presentaron una trazabilidad excelente con identificación clara del proveedor, pero completitud críticamente deficiente en parámetros técnicos fundamentales. La ausencia de información básica como velocidades de operación y especificaciones de rodamientos impide el análisis de vibraciones efectivo según ISO 14224. Las limitaciones en procesamiento y la ausencia de protocolos de integración confirman que estos informes operan como verificaciones periódicas independientes sin vinculación operativa con el plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial.

5.1.4.3.3. Evaluación del informe de termografía

Este informe documenta la inspección térmica infrarroja de componentes eléctricos para detección de puntos calientes. Los informes de termografía son generados por un proveedor externo, mediante cámara termográfica FLIR, siguiendo lineamientos de ISO 18434-1 para inspección termográfica de equipos eléctricos y mecánicos. Estos informes evalúan componentes eléctricos y superficies mecánicas del mezclador industrial para detectar anomalías térmicas indicativas de degradación.

A continuación, se evalúa el informe de termografía:

1. **Completitud de datos:** Los informes presentan completitud dual diferenciada por tipo de información. Para datos básicos descriptivos, la completitud alcanza 100%, verificando

presencia de cuatro campos fundamentales según ISO 14224: identificación del equipo inspeccionado (presente), fecha de ejecución (presente), responsable técnico (presente) y termogramas con escala de temperatura (presentes). Sin embargo, para parámetros predictivos críticos establecidos en ISO 18434-1, la completitud es deficiente. La evaluación identificó 10 campos técnicos obligatorios para inspección termográfica: temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, emisividad configurada por material, reflectividad aparente, distancia de medición, ángulo de captura, carga operacional durante inspección, referencia térmica de componentes sanos y gradientes térmicos cuantitativos. Los informes incluyen únicamente 2 campos (temperatura observada y clasificación cualitativa), alcanzando 20%, de completitud predictiva (2/10 campos presentes). Esta ausencia limita la reproducibilidad y la validez de diagnósticos térmicos.

2. **Trazabilidad de origen:** Alcanza nivel excelente cumpliendo los tres requisitos: identificación del termógrafo certificado responsable, fecha exacta de inspección y referencia a metodología normativa aplicada. Los informes incluyen firma del analista y sello del proveedor, cumpliendo requisitos de identificación de origen establecidos en ISO 14224.
3. **Flujo de información:** Es limitado según ISO 13374-2 Sección 3, porque opera mediante entrega física de informes PDF impresos sin integración digital con sistemas de planificación. Esta transferencia manual requiere transcripción completa de hallazgos, generando demoras en comunicación de hallazgos críticos (anomalías térmicas severas tardan 3-5 días en traducirse en acciones según validación operativa), riesgo de pérdida durante transcripción manual e imposibilidad de correlacionar datos termográficos con otras fuentes predictivas o registros operacionales históricos de SAP PM.
4. **Procesamiento de datos:** El procesamiento alcanza nivel básico según ISO 13374-2 Sección 4. Los informes implementan únicamente clasificación binaria simple (conforme/no conforme) mediante comparación visual con criterios generales, sin aplicar estándares cuantitativos específicos como gradientes térmicos establecidos en ISO 18434-1 Tabla A.1 ($\Delta T > 15^{\circ}\text{C}$ indica condición crítica, $\Delta T 15 - 10^{\circ}\text{C}$ condición seria, $\Delta T 5 - 10^{\circ}\text{C}$ condición menor). No implementan análisis de tendencias históricas de temperatura, correlaciones entre múltiples puntos térmicos ni algoritmos que proyecten evolución de anomalías. Las recomendaciones carecen de umbrales numéricos específicos para decisiones de intervención.
5. **Capacidad de integración predictiva:** Es baja según ISO 13374-2, Secciones 4.5-4.6. Los informes funcionan como verificaciones anuales independientes sin mecanismos

documentados para transformar hallazgos térmicos en acciones de mantenimiento planificado. No existe un protocolo formal estableciendo cómo anomalías termográficas deben generar órdenes de trabajo preventivas, ajustar frecuencias de inspección según severidad detectada o escalar acciones basándose en evolución térmica, evidenciando operación aislada sin retroalimentación al plan de mantenimiento.

La Tabla 10 consolida los resultados de evaluación del informe de termografía mediante las cinco métricas desarrolladas.

Tabla 10

Evaluación del informe de termografía según métricas normativas.

Métrica	Evaluación	Escala
Compleitud de datos	Excelente (100%) estructura / Deficiente (<50%) predictiva	0-100%
Trazabilidad se origen	Excelente	Cualitativa
Flujo de información	Limitado	Cualitativa
Procesamiento de datos	Básico	Cualitativa
Capacidad de integración	Bajo	Cualitativa

Nota: La Tabla 10, consolida los resultados de evaluación del informe de termografía.

El informe de termografía presentó completitud excelente en parámetros operativos básicos y trazabilidad robusta con identificación clara del proveedor. Sin embargo, la ausencia de especificaciones técnicas del guardamotor y umbrales de alarma normalizados limita su capacidad de análisis predictivo especializado según ISO 18434-1. El procesamiento básico con clasificación binaria simple y la recomendación genérica confirman que este informe opera como verificación térmica puntual sin vinculación operativa con el plan de mantenimiento del mezclador industrial.

5.1.4.3.4. Evaluación del informe de análisis de aceite

Estos informes documentan el monitoreo tribológico de lubricantes en sistemas críticos mediante análisis de laboratorio especializado. Los informes de análisis de aceite son generados por un proveedor externo, mediante análisis de laboratorio de muestras extraídas de sistemas hidráulicos y de lubricación del mezclador industrial. Estos informes evalúan cinco sistemas: tanques de aceite, balanza de aceite de proceso, sistema de inyección a cámara, cámara de

mezclado y conjunto extrusora-calandria.

A continuación, se evalúa el informe de análisis de aceites:

1. **Completitud de datos:** Los informes alcanzan completitud excelente (100 %) al verificar presencia de 10 campos obligatorios según ISO 14224 para análisis tribológico: identificación del sistema lubricado (presente), código de muestra rastreable (presente), fecha de toma de muestra (presente), fecha de análisis (presente), método analítico aplicado (espectrometría de emisión atómica ASTM D6595, presente), resultados cuantitativos de desgaste metálico en ppm (presente), contaminación particulada según ISO 4406 (presente), propiedades fisicoquímicas del lubricante (viscosidad, acidez, contenido de agua, presentes), valores de referencia para comparación (presentes) y recomendaciones técnicas (presentes). Esta completitud facilita diagnósticos precisos del estado de lubricantes y componentes internos.
2. **Trazabilidad de origen:** La trazabilidad alcanza nivel excelente cumpliendo cuatro requisitos: identificación del laboratorio certificado responsable, especificación de analista que ejecutó pruebas, detalle de metodología normativa aplicada (ASTM D6595, ASTM D445, ASTM D974) y control de cambios mediante código único de muestra rastreable desde extracción hasta reporte. Los informes incluyen acreditación ISO/IEC 17025 del laboratorio, cumpliendo requisitos de ISO 14224 para trazabilidad analítica.
3. **Flujo de información:** Alcanza nivel limitado con moderación según ISO 13374-2 Sección 3. Los informes se entregan en formato PDF digital mediante correo electrónico al jefe de mantenimiento, reduciendo demoras respecto a entregas físicas. Sin embargo, requieren transcripción manual para incorporación en sistemas de planificación del departamento. No existe integración automática con SAP PM que permita correlacionar resultados tribológicos con historiales de intervenciones, consumo de aceite o parámetros operacionales del mezclador industrial. Esta transferencia manual reduce el riesgo de pérdida, pero mantiene la imposibilidad de análisis integrado multifuente.
4. **Procesamiento de datos:** Alcanza nivel avanzado según ISO 13374-2 Sección 4. Los informes implementan cuatro niveles funcionales: adquisición de datos mediante técnicas analíticas normalizadas (nivel 1), manipulación mediante corrección por dilución y normalización de unidades (nivel 2), detección de estado comparando con umbrales ISO 4406 y límites de condenación del fabricante (nivel 3) y evaluación de salud mediante análisis de tendencias históricas de desgaste y correlación entre múltiples parámetros

tribológicos (nivel 4). Los reportes incluyen gráficos de evolución temporal de elementos metálicos y proyecciones cualitativas de degradación basadas en tasas de incremento observadas, constituyendo el análisis predictivo más completo entre los documentos evaluados.

5. **Capacidad de integración predictiva:** La capacidad alcanza nivel medio según ISO 13374-2, Secciones 4.5-4.6. Los informes incluyen recomendaciones específicas diferenciadas por severidad: aceite conforme sin acción requerida, aceite en observación con recomendación de reducir intervalo de muestreo, aceite en alerta con recomendación de inspección mecánica programada y aceite crítico con recomendación de cambio inmediato y diagnóstico de causa raíz. Estas recomendaciones establecen mecanismos documentados para traducir hallazgos en acciones. Sin embargo, no existe protocolo formal en el departamento que garantice implementación sistemática con generación automática de órdenes de trabajo o ajustes documentados al plan de mantenimiento.

La Tabla 11 consolida los resultados de evaluación del informe de análisis de aceite mediante las cinco métricas desarrolladas.

Tabla 11

Evaluación del informe de análisis de aceite según métricas normativas.

Métrica	Evaluación	Escala
Complejidad de datos	Excelente 100%	0-100%
Trazabilidad se origen	Excelente	Cualitativa
Flujo de información	Limitado (moderado)	Cualitativa
Procesamiento de datos	Avanzado	Cualitativa
Capacidad de integración	Media	Cualitativa

Nota: La Tabla 11, consolida los resultados de evaluación del informe de análisis de aceite.

Los informes de análisis de aceite presentaron completitud más robusta de todas las técnicas predictivas evaluadas, con todos los parámetros técnicos fundamentales presentes y trazabilidad excelente. El procesamiento de datos es avanzado, con análisis multivariable de 27 parámetros simultáneos, umbrales especializados y gráficos automáticos de tendencias. Sin embargo, la capacidad de integración predictiva es media porque, aunque técnicamente

robusto, carece de protocolos documentados que permitan transformar resultados tribológicos específicos en modificaciones automáticas del plan de mantenimiento del mezclador industrial.

5.1.4.3.5. Evaluación del histórico de daños

Este documento registra las intervenciones correctivas ejecutadas en el equipo durante el período de febrero a junio de 2025. El histórico de daños es generado por el sistema SAP PM del departamento de mantenimiento, registrando eventos correctivos del mezclador industrial mediante avisos de daño creados por técnicos de planta y supervisores. A continuación, se evalúa el histórico de daños:

1. **Completitud de datos:** Alcanza 100% para campos estructurales obligatorios del sistema SAP PM. La evaluación verificó presencia de 8 campos: número de aviso de daño, fecha de creación, equipo afectado identificado por código funcional, descripción del problema, prioridad asignada, responsable de creación, fecha de cierre y estado del aviso. Todos estos campos están presentes en la estructura del sistema (8/8 campos = 100%).
2. **Trazabilidad de origen:** Alcanza nivel excelente cumpliendo requisitos de ISO 14224. El sistema SAP PM registra automáticamente usuario creador mediante credenciales de acceso, fecha y hora exacta con precisión de minutos, modificaciones posteriores con identificación de responsable y seguimiento completo del ciclo de vida desde creación hasta cierre.
3. **Flujo de información:** Alcanza nivel bueno según ISO 13374-2 Sección 3. SAP PM opera como sistema centralizado digital accesible para personal autorizado, permitiendo consulta en tiempo real sin requerir transcripción manual. El sistema permite generación de reportes filtrados por equipo, período y tipo de falla. Sin embargo, no existe integración automática con informes predictivos externos que permita correlacionar información entre sistemas.
4. **Procesamiento de datos:** Es básico según ISO 13374-2, Sección 4. SAP PM implementa únicamente funciones de registro y consulta (nivel 1) sin capacidades analíticas avanzadas automáticas como identificación de patrones, análisis de tendencias o generación de alertas predictivas basadas en datos históricos.
5. **Capacidad de integración predictiva:** Es baja según ISO 13374-2, Secciones 4.5-4.6. Aunque SAP PM registra eventos correctivos, no existe mecanismo formal documentado

dentro del sistema que correlacione automáticamente estos registros con hallazgos predictivos previos o genere retroalimentación hacia el plan preventivo.

La Tabla 12 consolida los resultados de evaluación del sistema SAP PM mediante las cinco métricas desarrolladas.

Tabla 12

Evaluación del histórico de daños según métricas normativas.

Métrica	Evaluación	Escala
Complejidad de datos	Excelente 100%	0-100%
Trazabilidad se origen	Excelente	Cualitativa
Flujo de información	Bueno con limitaciones	Cualitativa
Procesamiento de datos	Básico	Cualitativa
Capacidad de integración	Bajo	Cualitativa

Nota: La Tabla 12, consolida los resultados de evaluación del sistema SAP PM.

El histórico de daños presentó completitud excelente en parámetros fundamentales de confiabilidad y trazabilidad robusta mediante sistema SAP PM corporativo. El flujo de información es el más avanzado de todos los documentos evaluados con arquitectura centralizada digital. Sin embargo, el sistema carece de capacidades analíticas automáticas y mecanismos formales de correlación con informes predictivos externos, limitando su capacidad de retroalimentación hacia el plan de mantenimiento del mezclador industrial.

5.1.4.3.6. Síntesis consolidada de la evaluación documental

La evaluación de los seis documentos técnicos mediante las cinco métricas desarrolladas revela patrones diferenciados de calidad documental y capacidad de integración. La Tabla 13 consolida los resultados obtenidos para cada documento.

Tabla 13

Síntesis consolidada del análisis documental según normativas ISO.

Documento	Complejidad de datos	Trazabilidad de origen	Flujo de información	Procesamiento de datos	Capacidad de integración
Plan de mantenimiento	Excelente (100%) estructura / Deficiente (<50%) predictiva	Excelente	Limitado	Limitado	Nulo
Informe de vibraciones	Excelente (100%)	Excelente	Limitado	Básico	Bajo
Informe de termografía	Excelente (100%) básico / Deficiente (<50%) predictive	Excelente	Limitado	Básico	Bajo
Informe de análisis de aceite	Excelente (100%)	Excelente	Limitado (moderado)	Avanzado	Medio
Histórico de daños	Excelente (100%)	Excelente	Bueno (con Limitaciones)	Básico	Bajo

Nota: La Tabla 13, consolida los resultados obtenidos para cada documento.

Los resultados consolidados evidencian tres hallazgos principales: primero, existe alta heterogeneidad en completitud de datos: informes de aceite y SAP PM alcanzan excelencia (100%), mientras que vibraciones y termografía presentan deficiencias críticas (< 50% en parámetros predictivos); segundo, todos los documentos mantienen trazabilidad de origen excelente, cumpliendo requisitos ISO 14224 para identificación de responsables; y tercero, la capacidad de integración predictiva es limitada en todos los documentos evaluados: incluso el mejor documento es el de análisis de aceite con capacidad media, carece de mecanismos formales que garanticen la traducción automática de hallazgos en ajustes del plan preventivo. Estas deficiencias documentales impactan directamente la capacidad operativa del sistema de mantenimiento del mezclador industrial para conectar eficazmente las acciones predictivas con el plan de mantenimiento preventivo.

5.1.5. Análisis de brechas

El análisis de brechas identifica discrepancias entre el estado actual de la gestión documental del mezclador industrial y los requisitos establecidos por normas ISO 14224 e ISO 13374-2. A partir de los hallazgos de la evaluación documental, se detectan deficiencias técnicas, operativas y estructurales que limitan la integración efectiva entre técnicas predictivas y el plan de mantenimiento.

El análisis identifica las brechas mediante comparación de resultados de evaluación documental con requisitos normativos, categorizándolas según su naturaleza operativa. Estas

brechas identificadas se validan mediante cuestionarios aplicados al personal que gestiona el mezclador industrial.

5.1.5.1. Identificación de brechas

La comparación entre resultados de evaluación documental y requisitos normativos ISO permite identificar desviaciones recurrentes que limitan la efectividad del mantenimiento basado en condición. Una brecha representa la diferencia entre el estado actual observado con la evaluación de documentos técnicos y el estado requerido establecido por normas ISO 14224 e ISO 13374-2 para sistemas de mantenimiento integrado.

Estas brechas se categorizan según su naturaleza operativa en cinco grupos que abordan los siguientes aspectos:

1. **Documentales:** Agrupa deficiencias en completitud, estructura y formato de información registrada.
2. **Integración sistemática:** Aborda la ausencia de mecanismos formales de retroalimentación entre hallazgos predictivos y ajustes del plan preventivo.
3. **Frecuencia y monitoreo:** Evalúa inadecuación de intervalos de inspección predictiva respecto a patrones reales de degradación.
4. **Conocimiento y trazabilidad:** Identifica pérdida de experiencia operacional por documentación insuficiente de intervenciones.
5. **Normativas y estandarización:** Examina desviaciones respecto a requisitos ISO 14224 e ISO 13374-2 para gestión de datos de confiabilidad.

La identificación de brechas se ejecutó mediante análisis cruzado de deficiencias detectadas en la subsección 6.1.4.3, agrupándolas según categorías operativas que comparten mecanismos causales comunes y requieren intervenciones similares. Cada brecha identificada incluye descripción específica del problema observado, evidencia documental que respalda su existencia mediante referencia a subsecciones de evaluación documental e impacto cuantificado en la capacidad de integración predictiva. La Tabla 14 presenta las cinco categorías de brechas identificadas con su evidencia documental específica.

Tabla 14

Identificación de brechas en la integración de técnicas predictivas con el plan de mantenimiento.

Categoría de brecha	Descripción específica	Evidencia documental	Impacto de integración
Documentales	No retroalimentación de informes predictivos al plan.	Subsección 6.1.4.3.1: Técnicas predictivas aparecen como elementos programados independientes sin vinculación operativa con tareas preventivas.	Alto: Impide aprovechamiento de información predictiva.
	Sistemas de registro independientes. Ausencia de trazabilidad de acciones predictivas.	Subsección 6.1.4.3.2: Completitud de datos críticamente deficiente con 0% en parámetros técnicos fundamentales. Subsección 6.1.4.3.5: SAP PM registra correctivos, pero sin correlación con hallazgos predictivos previos	
Integración sistemática	Técnicas predictivas operan independientemente.	Subsección 6.1.4.3.2: Informes de vibraciones, operan como verificaciones periódicas independientes sin protocolo de traducción a ajustes del plan preventivo.	Crítico: Anula efectividad del monitoreo predictivo.
	No correlación automática con generación de OT. Ausencia de protocolos formales de respuesta.	Subsección 6.1.4.3.3: Análisis termográfico sin mecanismos documentados para transformar hallazgos en acciones de mantenimiento planificado. Subsección 6.1.4.3.4: Recomendación uniforme "seguir monitoreo periódico." evidencia ausencia de criterios automatizados.	
Frecuencia y monitoreo	Frecuencias inadecuadas para equipo crítico.	Subsección 6.1.4.3.1: Frecuencias fijas (semestral se hace vibraciones, anual se hace aceites y termografía) independientes de condición real del equipo.	Alto: Pérdida de detección temprana de fallas.
	No seguimiento de tendencias históricas. Falta de umbrales de alerta integrados.	Subsección 6.1.4.3.2: Ausencia de procesamiento automático de tendencias históricas.	
Conocimiento y trazabilidad	Pérdida de conocimiento en intervenciones.	Subsección 6.1.4.3.5: Sistema SAP PM carece de capacidades analíticas automáticas para identificar patrones o generar alertas predictivas.	Alto: Perpetúa mantenimiento reactivo.
	No documentación formal de metodologías. Ausencia de retroalimentación de efectividad	Subsección 6.1.4.3.2: Recomendaciones genéricas sin umbrales cuantitativos específicos para toma de decisiones. Subsección 6.1.4.3.1: Ausencia de procedimientos que establezcan cómo los resultados predictivos deben traducirse en modificaciones del plan de mantenimiento.	
Normativas y estandarización	Falta taxonomía formal ISO 14224.	Subsección 6.1.4.3.1: Codificación interna funcional sin referencia a estándares ISO 14224.	Medio: Limita escalabilidad y mejora continua.
	No clasificación de severidad estandarizada. Ausencia de procedimientos de actualización.	Subsección 6.1.4.3.3: Clasificación binaria simple sin estándares normativos específicos como ISO 18434-1. Subsección 6.1.4.3.2: Metodología basada en ISO 10816-3 pero sin aplicación práctica documentada.	

Nota: La Tabla 14, identifica las brechas y determina las desconexiones específicas entre las técnicas de mantenimiento predictivo implementadas y el plan de mantenimiento del mezclador industrial.

La tabla evidencia que las brechas identificadas no son deficiencias aisladas, sino un conjunto interrelacionado de fallas que afectan toda la cadena de valor del mantenimiento predictivo. La brecha de integración sistémica, con impacto crítico, representa el núcleo del problema al anular completamente la efectividad del monitoreo predictivo. Las brechas documentales, de frecuencia y monitoreo, y de conocimiento y trazabilidad, todas con impacto alto, constituyen barreras operativas que impiden capitalizar la información generada por las técnicas predictivas. Las brechas normativas y de estandarización, aunque de impacto medio, limitan la capacidad de mejora continua del sistema.

Esta identificación de brechas, respaldada por evidencia documental específica de cada subsección analizada, requiere validación operativa que confirme estas deficiencias desde la perspectiva de quienes gestionan directamente el mezclador industrial.

5.1.5.2. Validación de brechas

Las brechas identificadas en la Tabla 14 mediante la evaluación documental requieren validación operativa para confirmar que representan problemas reales en la gestión diaria del mezclador industrial. La evaluación documental determinó deficiencias técnicas en los seis documentos analizados, pero estas deficiencias deben contrastarse con la percepción del personal que ejecuta y supervisa el mantenimiento para confirmar su existencia e impacto operativo.

La validación se estructura en tres componentes metodológicos secuenciales. El diseño del instrumento establece el cuestionario estructurado que cuantifica la percepción sobre cada brecha. La selección de participantes identifica al personal clave según roles del organigrama, cuyas perspectivas diferenciadas permiten validación integral. Los criterios de validación definen umbrales cuantitativos que determinan cuándo una brecha se considera confirmada operativamente.

5.1.5.2.1. Diseño del instrumento de validación

El instrumento de validación consiste en un cuestionario estructurado con 15 preguntas organizadas en cinco bloques correspondientes a las categorías de brechas identificadas: documentales, integración sistémica, frecuencia y monitoreo, conocimiento y trazabilidad, y normativas y estandarización. Cada bloque contiene tres preguntas específicas que evalúan la percepción del personal sobre existencia e impacto operativo de la brecha.

Las preguntas emplean escala Likert de cinco niveles, donde 1 representa “totalmente en desacuerdo” y 5 representa “totalmente de acuerdo”. Esta escala cuantifica el grado de consenso sobre cada afirmación relacionada con las brechas identificadas. El Anexo C presenta las dos versiones del cuestionario aplicado: Versión A para supervisión/planificación y Versión B para técnicos. Ambas versiones evalúan las mismas dimensiones, pero adaptan la redacción al contexto operativo de cada rol.

5.1.5.2.2. Selección de participantes

La selección de participantes consideró tres criterios: rol directo en gestión del mezclador industrial según organigrama de la Figura 13, conocimiento operativo de técnicas predictivas implementadas y perspectiva diferenciada que abarque supervisión, planificación, producción y ejecución técnica. Esta combinación asegura validación desde múltiples perspectivas operativas complementarias. La Tabla 15 presenta los cinco participantes seleccionados.

Tabla 15

Selección de participantes para la validación de brechas.

Cargo	Responsabilidad en mezclador industrial	Perspectiva	Versión de cuestionario	Tiempo
Jefe de mantenimiento	Supervisión técnica y toma de decisiones	Visión integral gestión mantenimiento	Versión A	15 min
Jefe de producción	Continuidad operativa del proceso	Impacto de fallas en producción	Versión A	15 min
Planificador	Programación preventiva	Gestión operativa del plan	Versión A	15 min
Mecánico	Ejecución de tareas mecánicas	Realidad operativa mecánica	Versión B	15 min
Electricista	Ejecución de tareas eléctricas	Realidad operativa eléctrica	Versión B	15 min

Nota: La Tabla 15, presenta que la Versión A emplea lenguaje técnico-administrativo y la Versión B emplea lenguaje operativo directo.

5.1.5.2.3. Criterios de validación

Una brecha se considera validada cuando el promedio de respuestas en su bloque alcanza ≥ 3.5 , indicando consenso operativo sobre su existencia e impacto significativo. Este umbral permite diferenciar brechas con severidad confirmada (≥ 3.5) de aquellas con impacto moderado (3.0-3.49) o no confirmadas (< 3.0). El promedio se calcula sumando las respuestas de

los cinco participantes en las tres preguntas del bloque correspondiente y dividiendo entre el total de respuestas.

5.1.5.2.4. Resultados de validación

La aplicación del cuestionario a los cinco participantes seleccionados generó promedios cuantitativos por categoría de brecha. La Tabla 16 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 16

Resultados de validación operativa de brechas.

Categoría de brecha	Promedio	Estado de validación	Interpretación
Documentales	3.13	No Validada	Moderada
Integración sistemática	3.27	No validada	Moderada
Frecuencia y monitoreo	3.00	No validada	Moderada
Conocimiento y trazabilidad	3.33	No validada	Moderada
Normativa y estandarización	3.07	No validada	Moderada

Nota: La Tabla 16, presenta los resultados de validación operativa de cada brecha identificada.

Los resultados revelan que ninguna categoría alcanza el umbral de 3.5 establecido para la validación completa según el criterio de validación de 6.1.5.2.3. Sin embargo, todas las categorías superan el valor neutral de 3.0, confirmando la existencia de problemas operativos con severidad moderada. La integración sistémica y el conocimiento y trazabilidad presentan los promedios más altos (3.27 y 3.33, respectivamente), aunque aún, bajo el umbral de validación completa. Estas categorías representan áreas prioritarias de mejora dentro del contexto de severidad moderada. La frecuencia y monitoreo alcanzan exactamente el valor neutral (3.00), indicando reconocimiento del problema sin consenso sobre su criticidad.

La validación operativa evaluó el impacto de las brechas en tres dimensiones críticas: efectividad predictiva (transformación de hallazgos en acciones preventivas), disponibilidad del equipo (impacto en continuidad operativa) y gestión del conocimiento técnico (documentación de intervenciones). La Tabla 17 presenta la validación cualitativa consolidada desde la perspectiva de estas dimensiones.

Tabla 17

Validación operativa de brechas en la integración de técnicas predictivas del mezclador industrial.

Categoría de brecha	Efectividad predictiva	Disponibilidad de equipo	Gestión del conocimiento técnico
Documentales	Hallazgos predictivos no se convierten en tareas preventivas, perdiendo la capacidad de anticipación.	Deficiencias documentales contribuyen a mantenimiento reactivo	Ausencia de retroalimentación impide capturar qué intervenciones fueron efectivas.
Integración sistemática	Técnicas predictivas operan independientemente sin correlación automática con planificación.	Perpetúa mantenimiento reactivo a pesar de detectar incremento vibracional en reductor izquierdo.	Intervenciones no documentadas generan pérdida de metodologías exitosas
Frecuencia y monitoreo	Frecuencias fijas independientes de la condición real que limitan detección temprana.	Patrones de falla recurrentes evidencian intervalos inadecuados.	Sin seguimiento de tendencias históricas, no se aprende de patrones de falla.
Conocimiento y trazabilidad	No documentación formal de criterios de decisión post-hallazgos predictivos.	Dependencia de personal específico para resolver problemas ya identificados previamente.	Rotación de personal técnico causa pérdida de experiencia en resolución de anomalías.
Normativa y estandarización	Informes de proveedores externos sin clasificación uniforme de severidad predictiva.	Incertidumbre sobre urgencia real de intervenciones basadas en hallazgos predictivos.	Falta taxonomía ISO 14224 impide estandarización de respuestas a modos de falla específicos.

Nota: La Tabla 17, presenta la validación cualitativa consolidada desde la perspectiva de las dimensiones críticas.

La validación confirma la existencia de las brechas identificadas mediante análisis documental; es operativa, pero con severidad moderada, no crítica. El personal reconoce problemas mejorables en la gestión del mezclador industrial que justifican el desarrollo de un modelo de integración para optimizar el sistema. La discrepancia entre severidad anticipada por evaluación documental y severidad percibida por personal operativo indica que las deficiencias técnicas impactan la operación de manera menos crítica que la proyectada inicialmente, aunque persisten como oportunidades de mejora que el modelo de integración debe abordar.

5.1.6. Conclusiones del diagnóstico

El diagnóstico del estado actual del plan de mantenimiento y la implementación de técnicas predictivas del mezclador industrial reveló desconexiones entre ambos sistemas mediante evaluación documental rigurosa y validación operativa con personal clave.

- **Evaluación documental:** La aplicación de métricas basadas en ISO 14224 e ISO 13374-2 a seis documentos técnicos identificó heterogeneidad crítica en calidad documental. Los

informes de análisis de aceite y el sistema SAP PM presentan completitud excelente (100%) y trazabilidad robusta, mientras que los informes de vibraciones y termografía muestran deficiencias severas en parámetros predictivos (< 50% de campos obligatorios). El hallazgo más significativo corresponde a la capacidad de integración predictiva: cuatro de cinco documentos evaluados presentan capacidades entre “Nula” y “Baja”, evidenciando que las técnicas predictivas operan como sistemas aislados sin mecanismos formales de retroalimentación al plan preventivo.

- **Identificación de brechas:** El análisis cruzado de deficiencias documentales identificó cinco categorías de brechas operativas: documentales (sistemas de registro independientes), integración sistémica (ausencia de protocolos formales de respuesta), frecuencia y monitoreo (intervalos inadecuados para criticidad del equipo), conocimiento y trazabilidad (pérdida de experiencia por documentación insuficiente) y normativas y estandarización (desviaciones respecto a requisitos ISO). Estas brechas se respaldaron con evidencia específica de evaluaciones individuales de cada documento técnico.
- **Validación operativa:** La validación mediante cuestionarios aplicados a cinco actores clave (jefe de mantenimiento, jefe de producción, planificador, mecánico y electricista) reveló que las brechas identificadas existen operativamente, pero con severidad moderada. Ninguna categoría alcanzó el umbral de validación completa (≥ 3.5), obteniendo promedios entre 3.00 y 3.33. Esta discrepancia entre severidad anticipada por evaluación documental y severidad percibida por personal operativo indica que las deficiencias técnicas impactan la operación del mezclador industrial de manera menos crítica que la proyectada inicialmente.
- **Hallazgo principal:** El diagnóstico confirma la existencia de desconexión entre técnicas predictivas y plan preventivo, evidenciada por ausencia de mecanismos formales de integración en todos los documentos evaluados. La severidad operativa de esta desconexión resulta moderada según la validación con personal. Las brechas identificadas representan oportunidades de mejora que justifican el desarrollo de un modelo de integración para optimizar el sistema de mantenimiento del mezclador industrial.

El diagnóstico establece la línea base técnica para el modelo de integración, identificando cuatro requisitos específicos que orientan su diseño: crear mecanismos formales de retroalimentación entre hallazgos predictivos y el plan de mantenimiento preventivo, establecer protocolos claros de respuesta según severidad detectada, documentar metodologías exitosas para preservar conocimiento técnico y estandarizar clasificaciones según normas internacionales. Estos

requisitos, derivados de las cinco brechas operativas identificadas y validadas con el personal del departamento, fundamentan el diseño del modelo de integración que se desarrolla en la siguiente fase.

5.2. Diseñar un modelo de integración que establezca claramente las relaciones entre los resultados de las técnicas predictivas y los ajustes necesarios al plan de mantenimiento del mezclador industrial.

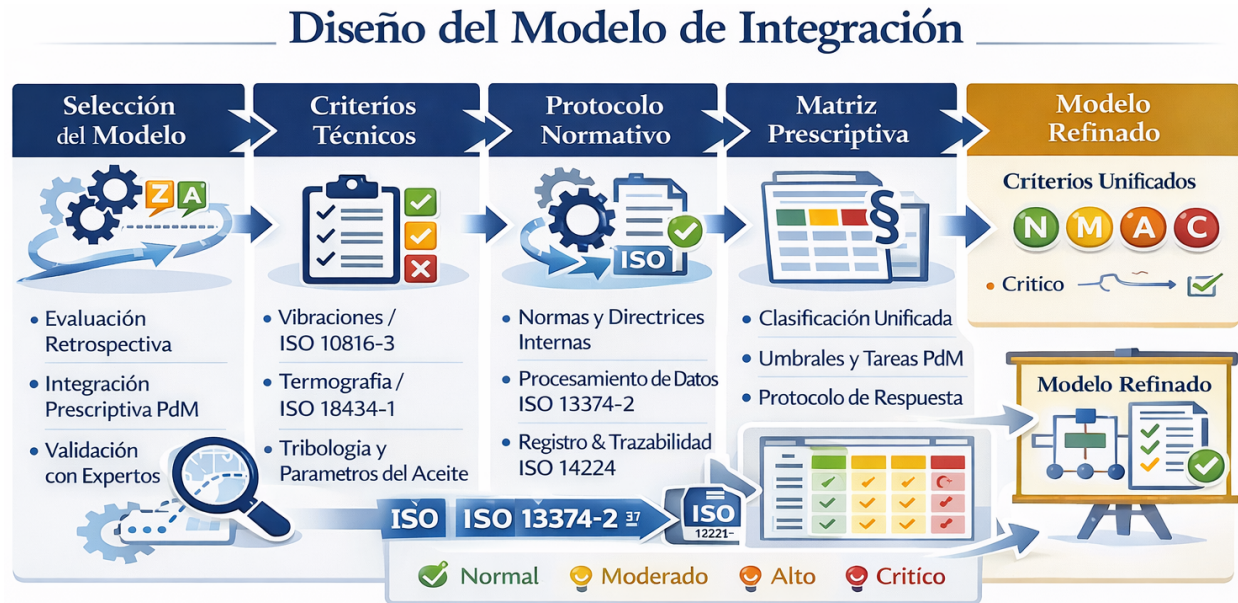
La Fase 1 identificó cinco brechas operativas donde las técnicas predictivas aplicadas al mezclador industrial operan desconectadas del plan de mantenimiento preventivo. El diagnóstico reveló ausencia de protocolos formales que transformen hallazgos de vibraciones, termografía y análisis de aceite en ajustes documentados del plan preventivo. Esta desconexión genera pérdida de oportunidades para anticipar fallas, ya que información valiosa sobre degradación de componentes no se traduce en decisiones de mantenimiento oportunas.

La Fase 2 diseña un modelo de integración que establece relaciones formales entre resultados predictivos y ajustes necesarios al plan de mantenimiento del mezclador industrial. El modelo integra criterios técnicos normativos para clasificar severidad de hallazgos, protocolos que convierten información predictiva en acciones ejecutables, matriz prescriptiva vinculando severidad con intervenciones específicas y plazos de ejecución, y metodología de validación retrospectiva mediante análisis de eventos correctivos históricos. Este diseño cierra las brechas identificadas mediante estructura adaptable a recursos y capacidades disponibles en la empresa.

El desarrollo se estructura en cinco componentes secuenciales que construyen progresivamente el modelo propuesto. La selección metodológica evalúa alternativas de modelado según restricciones del contexto organizacional, justificando el enfoque normativo-prescriptivo adoptado. El establecimiento de criterios técnicos define umbrales cuantitativos fundamentados en normativas ISO aplicables a cada técnica predictiva. El diseño del protocolo normativo especifica el flujo de información desde recepción de informes hasta retroalimentación al plan preventivo. La matriz prescriptiva determina acciones concretas, plazos y prioridades según el nivel de severidad detectado. La validación mediante entrevistas semiestructuradas con personal del departamento de mantenimiento de la empresa refina los componentes según viabilidad operacional real, completando el diseño del modelo de integración. La Figura 16 resume los componentes del modelo de integración diseñado.

Figura 16

Resumen gráfico de la Fase 2: Diseño del modelo de integración.



Nota: La Figura 16 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

5.2.1. Selección del modelo de integración

La Fase 1 identificó cinco brechas operativas donde las técnicas predictivas operan desconectadas del plan de mantenimiento, generando falta de retroalimentación que impide ajustar el mantenimiento según la condición real del equipo. La Fase 2 aborda estas brechas mediante el diseño de un modelo que formalice la integración, estableciendo protocolos para transformar hallazgos predictivos en ajustes documentados del plan preventivo.

Para diseñar este modelo de integración, se requiere seleccionar una estructura metodológica apropiada. La literatura técnica identifica cuatro alternativas principales: Dinámica de sistemas, machine learning, BPMN y enfoque normativo-prescriptivo. La selección fundamentada requiere evaluar restricciones del contexto específico de la empresa.

5.2.1.1. Contexto y restricciones

El modelo debe cumplir requisitos específicos: primero, demostrar relación causa-efecto donde la integración formal mejora los indicadores de desempeño; segundo, ser validado sin

implementación completa mediante aplicación retrospectiva a casos históricos; tercero, mantener simplicidad operativa comprensible para personal técnico actual sin capacitación extensiva.

Adicionalmente, el modelo no debe requerir software especializado, debe establecer correlaciones respaldadas por causalidad técnica explícita y debe alinearse con requisitos de las normas ISO 13374-2 para procesamiento de datos de condición, ISO 14224 para gestión de datos de confiabilidad e ISO 10816-3 para evaluación de vibraciones. Bajo estas restricciones y requisitos, se evaluaron las alternativas de modelado disponibles en la literatura técnica.

5.2.1.2. Evaluación y justificación de los modelos de integración

La evaluación de alternativas considerando las restricciones establecidas determinó que el enfoque Normativo-Prescriptivo, cumple todos los requisitos sin las limitaciones de software especializado, conjuntos de datos extensos o falta de transparencia causal de las otras alternativas.

Se justifica por tres ventajas comparativas frente a las alternativas evaluadas. Primero, el modelo combina capacidad de demostrar el impacto mediante análisis retrospectivo con simplicidad operativa, superando la limitación del modelo de Dinámica de Sistemas que requiere software especializado y del modelo BPMN que carece de capacidad cuantitativa.

Segundo, establece causalidad técnica explícita mediante principios físicos de degradación mecánica, superando la opacidad del modelo de machine learning que opera como caja negra. Tercero, mantiene transparencia metodológica, donde cada decisión es rastreable a criterios técnicos definidos, garantizando reproducibilidad y transferibilidad a otras organizaciones.

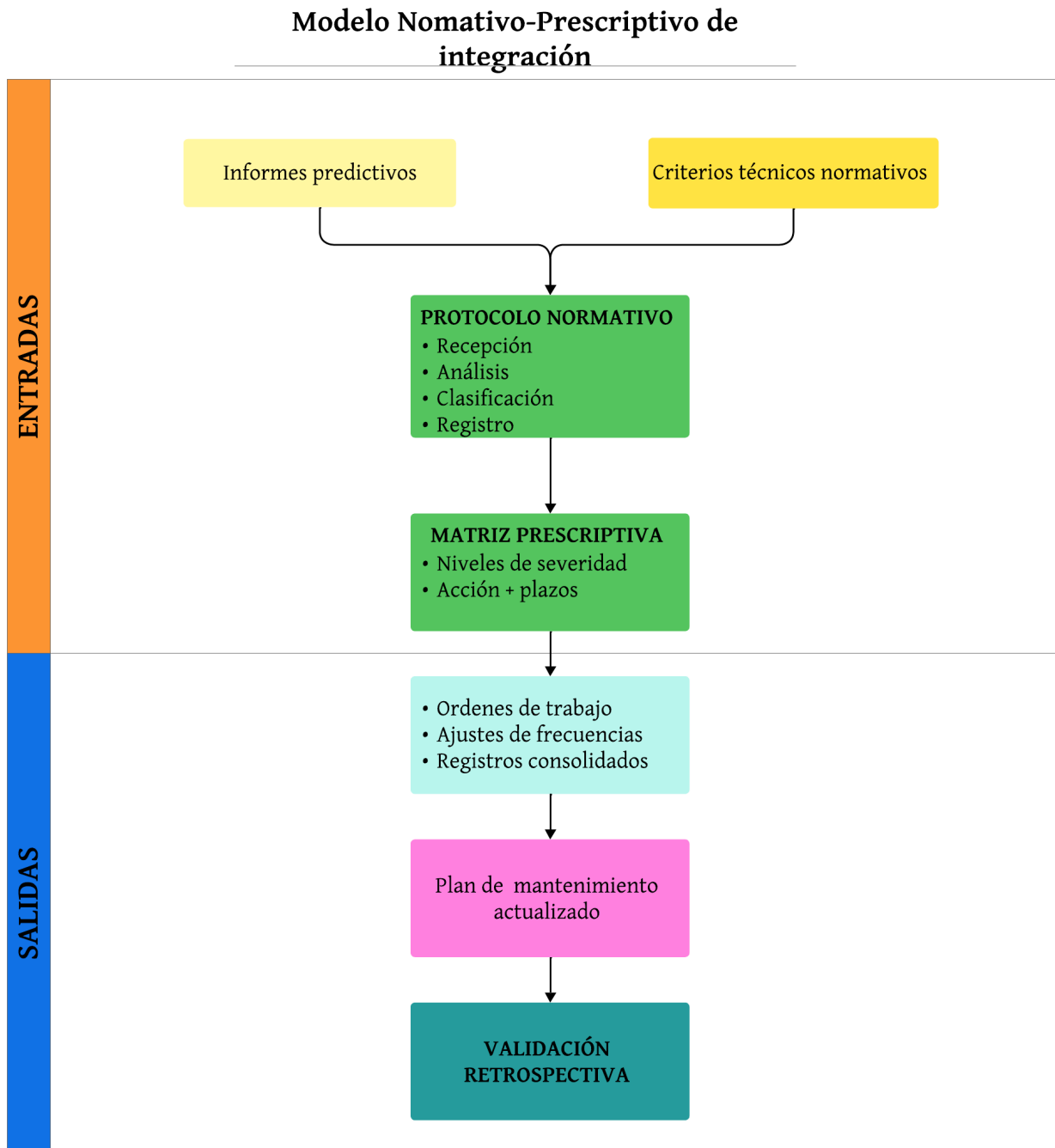
Esta selección satisface requisitos académicos de rigurosidad metodológica y requisitos industriales de aplicación práctica, conduciendo al diseño del modelo específico que opera la integración predictivo-preventivo.

5.2.1.3. Modelo seleccionado

El modelo Normativo-Prescriptivo de Integración con Validación Retrospectiva estructura la integración mediante tres componentes interconectados que procesan información predictiva y generan decisiones de mantenimiento documentadas. La Figura 17 representa esquemáticamente la arquitectura del modelo y el flujo de información entre sus componentes.

Figura 17

Arquitectura del modelo Normativo-Prescriptivo de integración.



Nota: En la Figura 17, presenta el flujo de información desde criterios técnicos e informes predictivos, procesamiento mediante protocolo y matriz, generación de acciones documentadas, y retroalimentación al plan de mantenimiento.

El modelo se clasifica según cinco dimensiones: abstracto-co-conceptual, por representar conceptos sin ecuaciones complejas; normativo-prescriptivo, por definir cómo debe funcionar el proceso y qué acciones tomar; determinista, por basar decisiones en reglas definidas; caja blanca, por hacer rastreable cada decisión a criterios explícitos; y semiempírico, por combinar principios técnicos con datos históricos (Lazakis, Raptodimos, y Varelas, 2018).

La estructura del modelo integra tres componentes siguiendo la arquitectura ISO 13374-2 para procesamiento de datos de condición:

- **Protocolo Normativo:** Establece el flujo formal de información desde la recepción del informe predictivo hasta el ajuste documentado del plan de mantenimiento, definiendo etapas secuenciales que incluyen recepción, análisis, clasificación de severidad, generación de acción, registro formal, seguimiento de efectividad y retroalimentación para ajuste de frecuencias.
- **Matriz Prescriptiva:** Vincula niveles de severidad con acciones específicas, plazos de ejecución y tipos de registro en sistema de gestión, utilizando umbrales de ISO 10816-3 para parámetros de vibraciones e ISO 18434-1 para parámetros termográficos.
- **Validación Retrospectiva:** Aplica el protocolo y matriz prescriptiva a eventos correctivos históricos para identificar oportunidades perdidas donde hallazgos predictivos no generaron acciones preventivas documentadas. Esta validación demuestra efectividad potencial del modelo mediante análisis de casos reales sin requerir implementación práctica completa, calculando indicadores de mejora atribuibles a la integración formal.

El modelo Normativo-Prescriptivo requiere identificar y establecer criterios técnicos normativos que definan umbrales cuantitativos para clasificar severidad de hallazgos. Estos criterios se fundamentan en normativas ISO aplicables a cada técnica predictiva y constituyen la base objetiva para decisiones posteriores de la matriz prescriptiva. Sin criterios técnicos explícitos, el modelo carecería de fundamento científico para vincular condiciones detectadas con acciones de mantenimiento.

5.2.2. Establecimiento de criterios técnicos de decisión

Un criterio técnico es un valor límite derivado de normativas internacionales o estándares industriales que establece el punto donde una condición operacional aceptable transita hacia una que demanda intervención de mantenimiento.

La presente sección establece los criterios técnicos de decisión para cada una de las tres técnicas predictivas aplicadas al mezclador industrial: vibraciones mecánicas, termografía infrarroja y análisis tribológico de aceite lubricante. Cada técnica requiere parámetros específicos derivados de normativas internacionales o estándares de fabricante, los cuales definen rangos de severidad y valores límite de alerta. Finalmente, se consolidan los criterios normativos establecidos, preparando su posterior integración en la clasificación unificada de severidad del modelo.

Los criterios presentados provienen de dos fuentes documentadas: las normativas internacionales ISO que cada proveedor externo contratado por la empresa aplica, y las clasificaciones operacionales que dichos proveedores establecen en sus informes técnicos. Se documenta estos criterios sin modificar umbrales ni escalas, extrayéndolos de informes técnicos históricos proporcionados y de las normativas citadas por los proveedores. Esta fundamentación normativa garantiza la trazabilidad técnica del modelo y su alineación con prácticas reconocidas internacionalmente en ingeniería de mantenimiento.

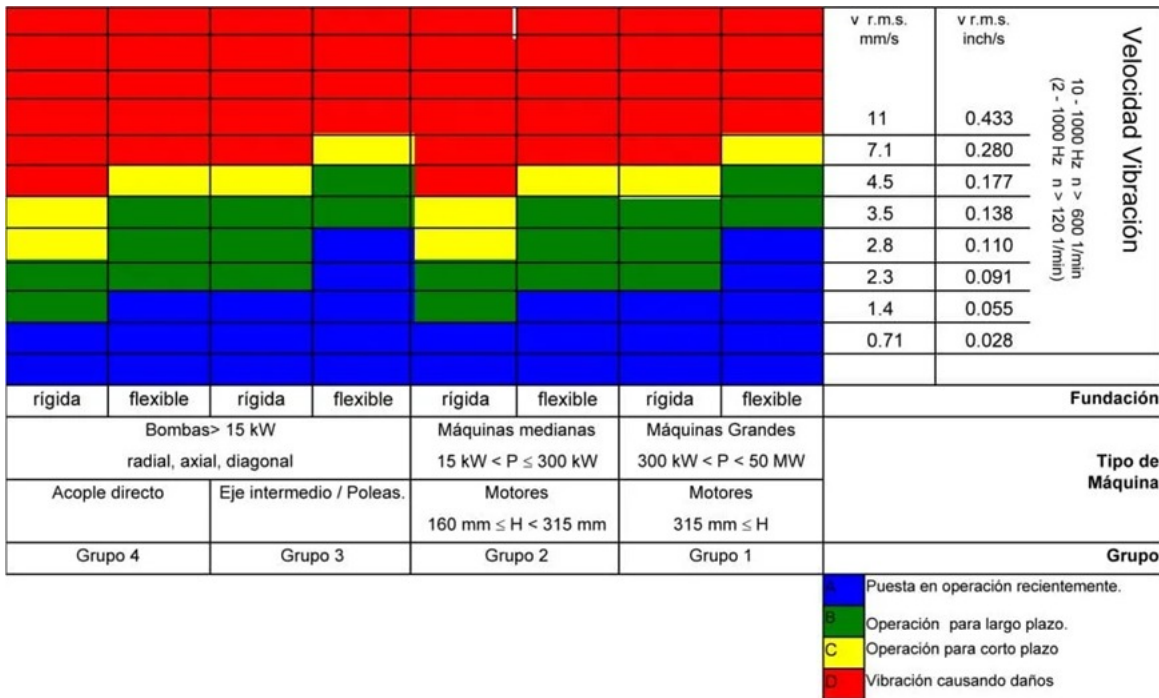
5.2.2.1. Criterios de análisis de vibraciones según ISO 10816-3

Los criterios vibratoriales aplicados a equipos rotativos del mezclador industrial se fundamentan en la norma ISO 10816-3, que establece límites de vibración expresados en velocidad RMS (mm/s) mediante un sistema de zonas de severidad diferenciadas cromáticamente. Esta norma proporciona el marco normativo internacional para evaluar el estado mecánico de maquinaria industrial con potencias superiores a 15 kW, clasificando la severidad vibratoria según características técnicas específicas del equipo: potencia nominal del motor, tipo de fundación (rígida o flexible) y altura del eje desde la base de montaje.

La estructura de evaluación normativa se organiza mediante cuatro zonas que establecen límites progresivos de severidad. La Figura 18 presenta la matriz de clasificación según tipo de máquina y condiciones de montaje:

Figura 18

Zonas de severidad vibratoria según ISO 10816-3.



Nota: En la Figura 18, presenta la estructura de zonas ISO 10816-3 para diferentes categorías de maquinaria según potencia y tipo de fundación.

La estructura normativa define valores límite diferenciados según categoría de máquina y tipo de montaje. La Tabla 18 consolida los rangos de velocidad RMS para las categorías aplicables al mezclador industrial:

Tabla 18

Rangos de velocidad RMS según zonas de severidad ISO 10816-3.

Zona	Código cromático	Máquinas medianas 15-300 kW (fundación rígida)	Máquinas grandes >300 kW (fundación rígida)	Interpretación operacional
A	Azul	< 1.4 mm/s	< 2.3 mm/s	Condición de máquinas nuevas, operación sin restricciones.

La Tabla 18 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 18.

B	Verde	1.4 - 2.8 mm/s	2.3 - 4.5 mm/s	Aceptable para operación continua prolongada.
C	Amarillo	2.8 - 4.5 mm/s	4.5 - 11.2 mm/s	Insatisfactoria, requiere planificación de mantenimiento.
D	Rojo	> 4.5 mm/s	>11.2 mm/s	Severidad causa daños, restricciones inmediatas.

Nota: La Tabla 18 presenta los valores límite de velocidad RMS según ISO 10816-3 para equipos montados sobre fundaciones rígidas.

Estos rangos establecen el marco cuantitativo normativo, donde el límite específico aplicable depende de las características técnicas del equipo evaluado. Los equipos del mezclador industrial incluyen motorreductores de 160 kW (categoría mediana) y el motor reductor extrusora de descarga de aproximadamente 1500 kW (categoría grande), determinando los umbrales correspondientes según la tabla presentada.

Complementariamente, la norma establece criterios de aceleración diferenciados por velocidad rotacional para detectar anomalías mecánicas de alta frecuencia que preceden incrementos en velocidad global. Estos parámetros identifican desbalanceamientos, desalineaciones y holguras mecánicas en etapas iniciales de degradación. La Tabla 19 consolida los umbrales normativos según rangos operacionales:

Tabla 19

Criterios de severidad por aceleración según velocidad rotacional.

Velocidad rotacional	Bueno	Regular	Excedido
1500-3600 rpm	≤ 1.5 g	1.5 - 3 g	> 5 g
900-1500 rpm	≤ 1 g	1 - 2 g	> 4 g
250-900 rpm	≤ 0.8 g	0.8 - 1.5 g	> 3 g
< 250 rpm	≤ 0.5 g	0.5 - 1 g	> 2 g

Nota: La Tabla 19, presenta los umbrales RMS de aceleración establecidos según normativa para detección de anomalías de alta frecuencia en función de velocidad operacional.

Los equipos del mezclador industrial operan predominantemente en rangos de 1500-2000 RPM, aplicándose los criterios de las dos primeras categorías para evaluaciones vibratorias. Estos umbrales proporcionan sensibilidad diagnóstica superior para fallas incipientes antes de manifestarse en velocidad RMS global.

La técnica de envolvente espectral complementa los criterios anteriores mediante evaluación específica de rodamientos a través de demodulación de señales de alta frecuencia. Esta metodología detecta impactos repetitivos característicos de defectos en pistas internas, pistas externas, elementos rodantes y jaulas, generando alertas tempranas de degradación. La Tabla 20 presenta los criterios normativos establecidos:

Tabla 20

Criterios de severidad por envolvente espectral.

Condición	Rango de valores	Interpretación diagnóstica
Bien	0-5 gE	Rodamiento sin indicios de degradación
Regular	5-15 gE	Indicios iniciales de desgaste, monitorear tendencia
Mal	> 15 gE	Degradación avanzada, planificar reemplazo

Nota: La Tabla20, presenta la técnica de envolvente aplicada según normativa para detección temprana de defectos en elementos rodantes.

Esta técnica proporciona diagnóstico específico sobre componentes críticos de falla en equipos rotativos, complementando los parámetros de velocidad y aceleración mediante análisis de alta frecuencia que anticipa deterioros antes de reflejarse en parámetros globales.

El proveedor traduce estos criterios normativos mediante una clasificación de cuatro niveles de prioridad que vincula mediciones instrumentales con acciones específicas de mantenimiento. La Tabla 21 consolida esta taxonomía aplicada en evaluaciones técnicas:

Tabla 21*Clasificación operacional de prioridades de mantenimiento.*

Código	Denominación	Características operacionales	Acción requerida
P4	NORMAL	Condición aceptada para operación sin restricciones en largo plazo	Monitoreo según frecuencia establecida
P3	MODERADO	Zona tolerable con indicios de fallas potenciales a mediano plazo	Monitoreo periódico de tendencia
P2	SEVERO	Condición insatisfactoria para operación continua de largo plazo	Planificar mantenimiento en ventana adecuada
P1	CRÍTICO	Severidad suficiente para causar daños en la maquinaria	Atención inmediata

Nota: La Tabla 21, presenta la clasificación aplicada para traducir criterios ISO 10816-3 en decisiones ejecutables por personal técnico.

Esta estructura establece el vínculo directo entre mediciones instrumentales, normativas y protocolos de intervención. Los niveles P3 y P2 demandan análisis de tendencia temporal para determinar el momento óptimo de intervención, mientras que P1 requiere acciones inmediatas según criticidad del activo. Los criterios de vibraciones establecidos conforman el primer componente del marco técnico de decisión, requiriendo complementarse con criterios termográficos para componentes eléctricos y criterios tribológicos para sistemas de lubricación.

5.2.2.2. Criterios termográficos según ISO 18434-1

Los criterios termográficos aplicados a componentes eléctricos del mezclador industrial se fundamentan en la norma ISO 18434-1, que establece lineamientos para inspección termográfica infrarroja no invasiva orientada a detectar anomalías térmicas indicativas de degradación. Esta técnica evalúa el gradiente térmico (ΔT) expresado en grados Celsius, definido como la diferencia entre la temperatura del punto anómalo y la temperatura de referencia de un componente equivalente operando en condiciones normales. La detección temprana de puntos calientes permite identificar conexiones deficientes, desbalances de carga y deterioro de aislamiento antes de que evolucionen hacia fallas catastróficas en sistemas eléctricos.

La metodología normativa establece umbrales de severidad diferenciados según el nivel de tensión del componente evaluado, reconociendo que equipos de alta tensión operan bajo condiciones más exigentes que demandan criterios más restrictivos para garantizar seguridad

operacional. La Tabla 22 presenta los umbrales de gradiente térmico para componentes de baja tensión:

Tabla 22

Criterios de severidad termográfica para componentes de baja tensión.

Clasificación	Rango de ΔT (°C)	Acción requerida
LEVE	1-9	Observación
MEDIO	10-29	Programable
SEVERO	30-49	En primera parada
CRÍTICO	50-69	Lo más pronto
EXTREMO	≥ 70	Inmediata

Nota: La Tabla 22, presenta los umbrales aplicados según ISO 18434-1 para componentes de baja tensión en tableros de control y sistemas auxiliares.

Estos umbrales establecen la severidad para componentes eléctricos que operan en sistemas de baja tensión, abarcando tableros de control, conexiones de motores y sistemas auxiliares del mezclador industrial. La clasificación LEVE (1 – 9°C) identifica anomalías incipientes que requieren monitoreo sin intervención inmediata, mientras que la clasificación EXTREMO (≥ 70 °C) demanda acción correctiva inmediata por riesgo de falla inminente.

Para componentes de alta tensión, la normativa establece criterios más restrictivos debido a las mayores consecuencias operacionales y de seguridad asociadas con fallas en estos sistemas. La Tabla 23 presenta los umbrales diferenciados:

Tabla 23

Criterios de severidad termográfica para componentes de alta tensión.

Clasificación	Rango de ΔT (°C)	Acción requerida
LEVE	1-5	Observación
MEDIO	6-14	Programable
SEVERO	15-29	En primera parada
CRÍTICO	30-64	Lo más pronto
EXTREMO	≥ 65	Inmediata

Nota: La Tabla 23, presenta los umbrales aplicados según ISO 18434-1 para componentes de alta tensión con requisitos de seguridad más restrictivos.

Los umbrales de alta tensión reducen los rangos permisibles, reconociendo que incrementos térmicos menores representan mayor riesgo en estos sistemas. Un gradiente de 15 °Cs en alta tensión (SEVERO) demanda la misma prioridad que 30 °C en baja tensión, reflejando la criticidad diferenciada de estos componentes según su nivel de operación eléctrica.

El proveedor traduce estos criterios normativos en acciones operacionales específicas mediante cinco niveles de severidad que establecen prioridades temporales de intervención. Esta clasificación vincula directamente los rangos ΔT con protocolos ejecutables por personal técnico, estableciendo el segundo componente del marco normativo de decisión. Los criterios termográficos complementan los criterios de vibraciones previamente definidos para equipos rotativos, conformando la base técnica multiparamétrica que requiere completarse con criterios tribológicos de análisis de aceite lubricante para sistemas de transmisión y reducción.

5.2.2.3. Criterios tribológicos según análisis de aceite lubricante

Los criterios tribológicos aplicados a sistemas lubricados del mezclador industrial se fundamentan en el análisis físico-químico de aceite lubricante, técnica que evalúa la condición del fluido y detecta patrones de desgaste metálico mediante espectroscopia de elementos. Esta metodología se aplica a dos tipos de sistemas: aceites para engranajes industriales (ISO 460 y 220) en reductores y sistemas de transmisión, y aceites hidráulicos (ISO 46) en la unidad hidráulica principal. La técnica identifica partículas de desgaste disueltas en el lubricante, cuantifica contaminación externa y evalúa degradación química del aceite, proporcionando diagnóstico temprano sobre condición de engranajes, rodamientos, cojinetes y componentes hidráulicos antes de manifestarse como fallas funcionales.

El laboratorio establece criterios de evaluación mediante tres niveles de clasificación diferenciados según concentración de elementos medidos en partes por millón (ppm) y parámetros físico-químicos del lubricante. El nivel NORMAL indica condición aceptable para operación continua, el nivel Precaución señala indicios de degradación que requieren monitoreo intensificado, y el nivel Anormal demanda intervención correctiva por riesgo de falla progresiva.

La evaluación tribológica se estructura en cuatro categorías de parámetros que caracterizan integralmente la condición del sistema lubricado. La primera categoría evalúa propiedades físicas del lubricante mediante viscosidad cinemática a 40 °C expresada en centistokes (cSt), parámetro que indica capacidad de mantener película lubricante protectora entre superficies

en contacto. La Tabla 24 presenta los criterios de viscosidad para aceites de engranajes industriales:

Tabla 24

Criterios de viscosidad cinemática.

Grado de aceite	Viscosidad nominal (cSt)	Rango aceptable (cSt)	Interpretación
ISO 460	460	391-529	Viscosidad dentro de especificación $\pm 15\%$
ISO 220	220	187-253	Viscosidad dentro de especificación $\pm 15\%$
ISO 46	46	39.1-52.9	Viscosidad dentro de especificación $\pm 15\%$

Nota: La Tabla 24, presenta los límites establecidos por laboratorio basados en desviación $\pm 15\%$ del grado nominal ISO del lubricante.

Estos rangos garantizan que el aceite mantiene propiedades de lubricación adecuadas. Viscosidades inferiores al límite reducen espesor de película protectora, incrementando contacto metal-metal, mientras que viscosidades superiores aumentan fricción interna y temperatura operacional.

La segunda categoría cuantifica la degradación química del lubricante mediante oxidación expresada en unidades de absorbancia por centímetro (Abs/cm), parámetro que mide formación de compuestos ácidos por exposición a temperatura y oxígeno. La Tabla 25 presenta los umbrales de degradación:

Tabla 25

Criterios de degradación química.

Parámetro	Condición normal	Precaución	Anormal	Interpretación
Oxidación (Abs/cm)	< 18	≥ 18	≥ 22	Formación de compuestos ácidos por exposición térmica
Humedad	NEGATIVO	-	POSITIVO	Presencia de agua libre en lubricante

Nota: La Tabla 25, presenta los límites de oxidación establecidos por el laboratorio para aceites minerales de engranajes industriales.

La oxidación acelerada indica deterioro químico que reduce la capacidad antidesgaste del lubricante y genera productos ácidos corrosivos. La presencia de humedad compromete

propiedades lubricantes y acelera la corrosión de componentes metálicos.

La tercera categoría detecta contaminación externa mediante cuantificación de elementos no metálicos y elementos traza expresados en ppm. La Tabla 26 consolida los umbrales de contaminación:

Tabla 26

Criterios de contaminación para aceites de engranajes (ISO 460/220).

Elemento	Origen típico	Precaución (ppm)	Anormal (ppm)
Si (Silicio)	Polvo ambiental, sellos	≥ 45	≥ 60
Na (Sodio)	Refrigerante, agua	≥ 25	≥ 40
V (Vanadio)	Combustible, aditivos	≥ 30	≥ 50
Ni (Níquel)	Contaminación externa	–	≥ 20

Nota: La Tabla 26, presenta los límites establecidos por el laboratorio según rangos generales para aceites de engranajes industriales.

Para sistemas hidráulicos, los criterios de contaminación se ajustan considerando la mayor sensibilidad de estos sistemas a partículas sólidas. La Tabla 27 consolida los umbrales aplicables:

Tabla 27

Criterios de contaminación para aceites hidráulicos (ISO 46).

Elemento	Origen típico	Precaución (ppm)	Anormal (ppm)
Si (Silicio)	Polvo ambiental, sellos	≥ 30	≥ 45
Na (Sodio)	Refrigerante, agua	≥ 25	≥ 40
V (Vanadio)	Combustible, aditivos	≥ 30	≥ 50
Ni (Níquel)	Contaminación externa	–	≥ 20

Nota: La Tabla 27, presenta los límites establecidos por el laboratorio para sistemas hidráulicos industriales.

Los criterios hidráulicos establecen límites más restrictivos para silicio debido a la sensibilidad de componentes hidráulicos a contaminación por partículas sólidas, que pueden obstruir válvulas y dañar bombas de precisión. La cuarta categoría cuantifica desgaste metálico de

componentes internos mediante análisis espectroscópico de partículas disueltas. La Tabla 28 presenta los umbrales para aceites de engranajes:

Tabla 28

Criterios de desgaste metálico para aceites de engranajes (ISO 460/220).

Elemento	Componentes fuente	Precaución (ppm)	Anormal (ppm)
Fe (Hierro)	Engranajes, ejes, rodamientos	≥ 200	≥ 300
Cr (Cromo)	Rodamientos, anillos endurecidos	≥ 15	≥ 20
Al (Aluminio)	Carcasas, componentes aleados	≥ 30	≥ 41
Cu (Cobre)	Bronces, cojinetes, sincronizadores	≥ 80	≥ 91
Pb (Plomo)	Aleaciones de cojinetes	≥ 50	≥ 80
Sn (Estaño)	Revestimientos antifricción	≥ 15	≥ 20

Nota: La Tabla 28, presenta los límites establecidos por el laboratorio para aceites de engranajes industriales.

Los sistemas hidráulicos requieren criterios de desgaste más estrictos debido a tolerancias más ajustadas en bombas y válvulas. La Tabla 29 presenta los umbrales específicos:

Tabla 29

Criterios de desgaste metálico para aceites hidráulicos (ISO 46).

Elemento	Componentes fuente	Precaución (ppm)	Anormal (ppm)
Fe (Hierro)	Engranajes, ejes, rodamientos	≥ 50	≥ 80
Cr (Cromo)	Vástagos cromados, válvulas	≥ 15	≥ 20
Al (Aluminio)	Bombas de aluminio, pistones	≥ 15	≥ 21
Cu (Cobre)	Válvulas, conexiones	≥ 51	≥ 80
Pb (Plomo)	Aleaciones de cojinetes	≥ 27	≥ 50
Sn (Estaño)	Revestimientos	≥ 15	≥ 20

Nota: La Tabla 29, presenta los límites establecidos por el laboratorio para sistemas hidráulicos industriales.

Los umbrales hidráulicos son significativamente menores para hierro, aluminio, cobre y plomo, reflejando que incrementos menores de partículas metálicas representan mayor riesgo en sistemas de alta precisión donde tolerancias reducidas amplifican el impacto del desgaste.

El laboratorio reconoce que estos límites constituyen rangos generales aplicables a maquinaria industrial, recomendando comparar resultados con especificaciones del fabricante del equipo cuando estén disponibles. La evaluación considera también tendencia histórica de cada parámetro, donde incrementos significativos entre muestreos consecutivos pueden indicar degradación acelerada incluso dentro de rangos aceptables.

Los criterios tribológicos establecidos complementan los criterios de vibraciones para componentes rotativos y los criterios termográficos para sistemas eléctricos, completando el marco técnico multiparamétrico de decisión que fundamenta la matriz prescriptiva del modelo de integración.

5.2.2.4. Síntesis de criterios técnicos normativos

Los criterios establecidos conforman el marco técnico de referencia que permite clasificar la severidad de hallazgos detectados mediante las tres técnicas predictivas aplicadas al mezclador industrial. Cada técnica evalúa aspectos diferenciados del estado del equipo mediante parámetros específicos y escalas de clasificación propias, reflejando la naturaleza particular de los fenómenos físicos que detecta. La Tabla 30 consolida los criterios normativos establecidos:

Tabla 30

Criterios operacionales para aplicar las métricas de evaluación documental.

Técnica predictiva	Parámetro principal	Unidad de medida	Niveles de clasificación	Fundamentación técnica
Análisis de vibraciones	Velocidad RMS	mm/s	4 niveles (P4-P1): NORMAL, MODERADO, SEVERO, CRÍTICO	ISO 10816-3 para equipos rotativos > 15 kW.
	Aceleración RMS	g	3 niveles: Bueno, Regular, Excedido	Criterios normativos por velocidad rotacional.
	Envolvente espectral	gE	3 niveles: Bien, Regular, Mal	Metodología normativa para rodamientos.
Termografía infrarroja	Gradiente térmico (ΔT)	°C	5 niveles: LEVE, MEDIO, SEVERO, CRÍTICO, EXTREMO	ISO 18434-1 diferenciado por nivel de tensión.

La Tabla 30 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 30.

Análisis tribológico	Viscosidad cinemática	cSt	Rango aceptable $\pm 15\%$ del grado nominal	Criterios del laboratorio para aceites industriales.
	Oxidación	Abs/cm	3 niveles: Normal, Precaución, Anormal	Criterios del laboratorio para degradación química.
	Contaminación (engranajes ISO 460/220)	ppm	3 niveles: Normal, Precaución, Anormal	Criterios del laboratorio para aceites de engranajes.
	Contaminación (hidráulico ISO 46)	ppm	3 niveles: Normal, Precaución, Anormal	Criterios del laboratorio para aceites hidráulicos.
	Desgaste metálico (engranajes ISO 460/220)	ppm	3 niveles: Normal, Precaución, Anormal	Criterios del laboratorio para aceites de engranajes.
	Desgaste metálico (hidráulico ISO 46)	ppm	3 niveles: Normal, Precaución, Anormal	Criterios del laboratorio para aceites hidráulicos.

Nota: En la Tabla 30 se presentan los criterios establecidos según normativas técnicas aplicables y estándares de evaluación del laboratorio contratado.

La síntesis evidencia que cada técnica predictiva emplea escalas de clasificación diferenciadas según la naturaleza de los parámetros evaluados. El análisis de vibraciones utiliza cuatro niveles de prioridad para velocidad RMS global y tres niveles para parámetros complementarios de aceleración y envolvente espectral, permitiendo diagnóstico progresivo de condición mecánica. La termografía infrarroja establece cinco niveles de severidad térmica diferenciados por tipo de componente eléctrico, proporcionando gradación detallada entre condiciones aceptables y críticas. El análisis tribológico aplica tres niveles de clasificación consistentes para múltiples parámetros físico-químicos del lubricante, con límites diferenciados según el tipo de sistema lubricado, facilitando la evaluación integral de reductores, sistemas de transmisión y componentes hidráulicos.

Estas diferencias reflejan la complementariedad de las técnicas predictivas, donde cada una detecta modos de fallos específicos mediante fenómenos físicos distintos. El análisis de vibraciones identifica degradación mecánica en componentes rotativos, la termografía detecta anomalías térmicas en sistemas eléctricos y el análisis tribológico cuantifica desgaste y contaminación en sistemas lubricados, tanto de engranajes como hidráulicos. Los criterios establecidos proporcionan umbrales cuantitativos objetivos que transforman mediciones instrumentales en clasificaciones de severidad técnicamente fundamentadas.

Los criterios técnicos establecidos definen los umbrales cuantitativos que permiten clasificar

la severidad de hallazgos detectados por cada técnica predictiva. Estos umbrales requieren ahora procedimientos formales que especifiquen cómo procesar la información de los informes predictivos y vincularla con el plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial.

5.2.3. Diseño del Protocolo Normativo de Integración

Los criterios técnicos establecidos definen umbrales cuantitativos para clasificar severidad de hallazgos predictivos, pero requieren procedimientos formales que especifiquen cómo aplicarlos operativamente. El protocolo normativo establece el flujo de procesamiento de información desde recepción de informes hasta retroalimentación al plan preventivo, vinculando criterios normativos con decisiones ejecutables.

El protocolo se estructura en cuatro componentes: flujo de información predictivo-preventivo, procedimiento para clasificar hallazgos aplicando los criterios técnicos, reglas para ajustar frecuencias preventivas según tendencias detectadas y formato de registro que documenta el ciclo completo desde detección hasta cierre de acciones.

5.2.3.1. Flujo de información predictivo-preventivo

El flujo de información define la secuencia operativa que vincula hallazgos detectados por técnicas predictivas con acciones de mantenimiento ejecutables. Este proceso mejora el esquema actual mediante incorporación de análisis técnico normalizado, registro consolidado de hallazgos y retroalimentación formal al plan preventivo.

El proceso inicia con la recepción de informes técnicos generados por proveedores externos, entregados en formato PDF físico al planificador. Posteriormente, el planificador analiza cada hallazgo reportado aplicando los criterios normativos previamente establecidos: compara valores medidos como velocidad RMS, gradiente térmico, concentración de elementos metálicos, etc., contra umbrales definidos para determinar el nivel de severidad. Este análisis clasifica hallazgos vibratorios en cuatro niveles (NORMAL a CRÍTICO), hallazgos térmicos en cinco niveles (LEVE a EXTREMO) y hallazgos tribológicos en tres niveles (Normal a Anormal). Simultáneamente, el planificador identifica el subsistema afectado vinculando el componente reportado con la taxonomía del mezclador industrial.

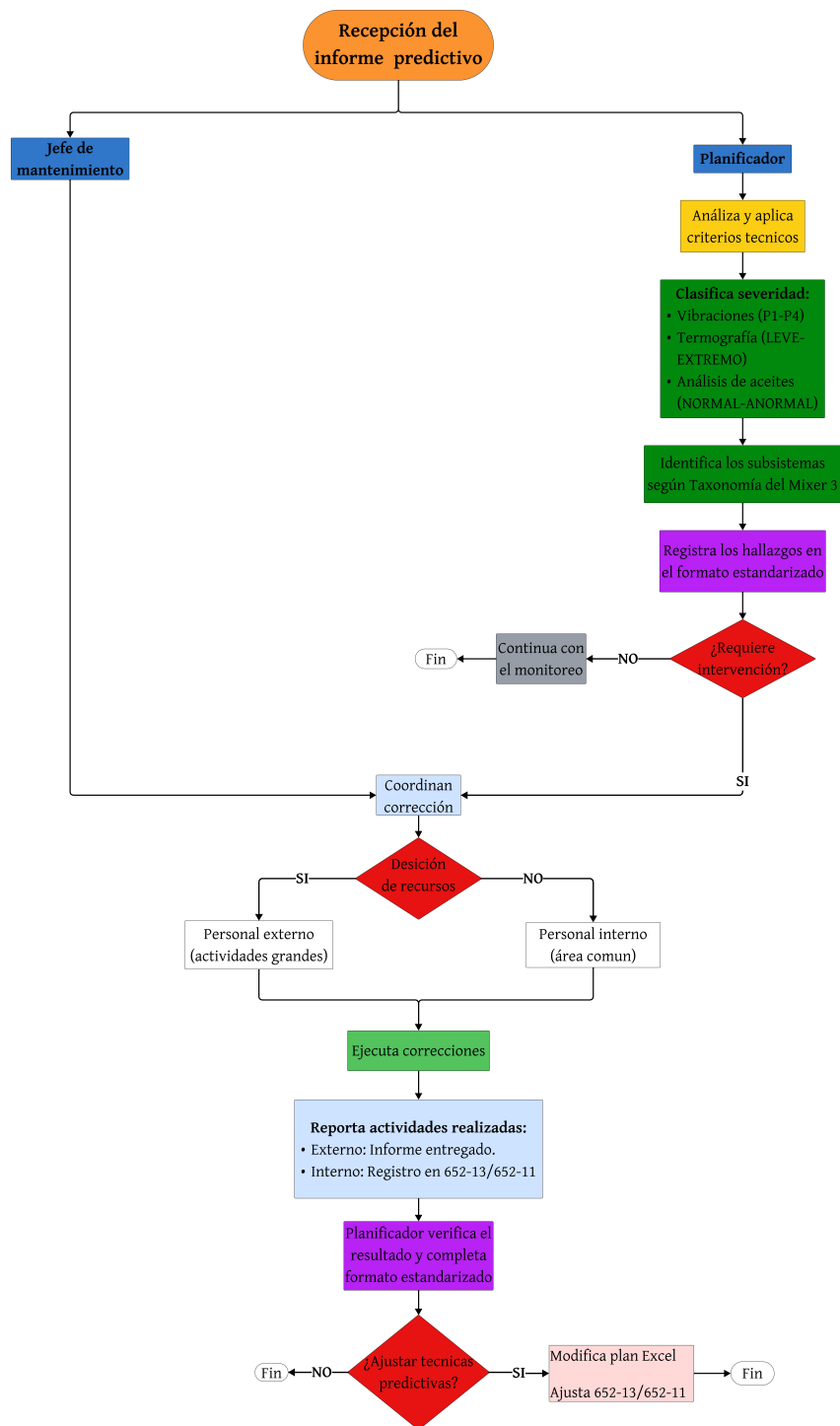
El planificador registra todos los hallazgos detectados en formato consolidado para la técnica correspondiente, independientemente de severidad, garantizando trazabilidad de condiciones que requieren monitoreo sin acción inmediata.

Luego evalúa si cada hallazgo demanda intervención: niveles superiores de severidad requieren coordinación con los jefes de mantenimiento para determinar recursos necesarios como el personal interno o externo y plazos de ejecución. Los técnicos o personal externo ejecutan la corrección registrando actividades realizadas en órdenes de trabajo según códigos establecidos por el departamento de mantenimiento: ya sea para vibraciones, termografía o aceite.

En la siguiente inspección programada, el planificador verifica la efectividad de las acciones ejecutadas, completa el formato consolidado documentando resultados obtenidos y evalúa si las frecuencias del plan preventivo requieren ajuste según tendencias observadas. La Figura 19 representa gráficamente este flujo mejorado.

Figura 19

Diagrama de flujo de información predictivo-preventivo.



Nota: En la Figura 19, se presenta el diagrama de flujo de información predictivo-preventivo.

5.2.3.2. Procedimiento de análisis de hallazgos

El análisis de hallazgos traduce información reportada en informes técnicos mediante aplicación de criterios normativos establecidos. El planificador ejecuta este procedimiento al recibir cada informe, extrayendo parámetros medidos, comparándolos contra umbrales definidos, clasificando severidad y vinculando el hallazgo al subsistema afectado. La Tabla 31 estructura este procedimiento para las tres técnicas predictivas:

Tabla 31

Procedimiento de análisis por técnica predictiva.

Paso	Análisis vibracional	Termografía infrarroja	Análisis tribológico
1. Extraer parámetros del informe	- Velocidad RMS (mm/s) - Aceleración (g) - Envolvente espectral (gE)	- Gradiente térmico ΔT (°C) - Nivel de tensión del componente	- Grado ISO del aceite - Viscosidad (cSt) - Oxidación (Abs/cm) - Concentración elementos (ppm)
2. Consultar criterios normativos	- Zonas A-D velocidad - Rangos aceleración - Rangos envolventes - Clasificación P4-P1	- Rangos ΔT según nivel de tensión - Clasificación LEVE-EXTREMO	- Rangos viscosidad - Límites oxidación - Límites contaminación - Límites desgaste metálico
3. Clasificar severidad	- P4 (NORMAL) - P3 (MODERADO) - P2 (SEVERO) - P1 (CRÍTICO)	- LEVE - MEDIO - SEVERO - CRÍTICO - EXTREMO	- Normal - Precaución - Anormal
4. Vincular subsistema	Identificar componente inspeccionado y vincularlo con taxonomía del mezclador industrial.	Identificar tablero eléctrico reportado y vincularlo con subsistema.	Identificar equipo lubricado y vincularlo con sistema correspondiente.

Nota: La Tabla 31, presenta el procedimiento ejecutado por planificador para cada informe recibido, aplicando criterios normativos.

Este procedimiento estandariza la interpretación de informes técnicos, garantizando aplicación consistente de criterios normativos independientemente del analista. Los hallazgos clasificados mediante este procedimiento alimentan las decisiones sobre ajuste de frecuencias preventivas.

5.2.3.3. Criterios de ajuste de frecuencia de inspección

Los hallazgos clasificados orientan decisiones sobre modificación de frecuencias de inspección. El mantenimiento predictivo permite ajustar intervalos según condición real del equipo, superando limitaciones del mantenimiento preventivo basado en tiempo fijo. Cuando hallazgos revelan degradación progresiva, incrementar frecuencia anticipa fallas mediante monitoreo intensificado. Cuando resultados consistentemente normales indican estabilidad operacional, reducir frecuencia optimiza recursos sin comprometer confiabilidad. Este ajuste dinámico constituye el fundamento del mantenimiento basado en condición. La evaluación de tres resultados consecutivos permite identificar tendencias reales, diferenciándolas de variaciones puntuales propias de condiciones operacionales.

El planificador evalúa ajuste considerando tendencia de los últimos tres resultados documentados para el subsistema evaluado. La Tabla 32 establece los criterios de decisión aplicados por el departamento:

Tabla 32

Criterios para ajuste de frecuencias de inspección.

Situación detectada	Técnica	Código	Cambio de frecuencia	Ejemplo
Dos hallazgos consecutivos en niveles de alerta o superiores: - Vibraciones: P3, P2 o P1 - Termografía: MEDIO, SEVERO, CRÍTICO o EXTREMO - Aceite: Precaución o Anormal	Vibraciones	-	Semestral → Trimestral	Prioridad P3 detectada en septiembre 2024 y marzo 2025
	Termografía	-	Anual → Semestral	Nivel MEDIO detectado en julio 2024 y julio 2025
	Aceite	-	Anual → Semestral	Precaución detectada en noviembre 2024 y noviembre 2025
Tendencia ascendente en tres inspecciones consecutivas	Vibraciones	-	Semestral → Trimestral	Velocidad RMS: 2.1 mm/s → 2.8 mm/s → 3.4 mm/s
	Termografía	-	Anual → Semestral	Gradiente térmico: 6°C → 9°C → 12°C
	Aceite	-	Anual → Semestral	Oxidación: 10 Abs/cm → 14 Abs/cm → 17 Abs/cm
Hallazgo en nivel crítico: - Vibraciones: P1 o P2 - Termografía: SEVERO, CRÍTICO o EXTREMO - Aceite: Anormal	Vibraciones	-	Semestral → Trimestral	Prioridad P2 detectada
	Termografía	-	Anual → Trimestral	Gradiente 35°C clasificado SEVERO
	Aceite	-	Anual → Trimestral	Hierro 320 ppm clasificado Anormal

La Tabla 32 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 32.

Tres inspecciones consecutivas en condición normal:	Vibraciones	-	Trimestral → Semestral	Tres inspecciones consecutivas con P4
- Vibraciones: P4	Termografía	-	Semestral → Anual	Tres inspecciones consecutivas con LEVE
- Termografía: LEVE	Aceite	-	Semestral → Anual	Tres inspecciones consecutivas Normal
- Aceite: Normal				

Nota: En la Tabla 32 se presentan los ajustes que se implementan modificando frecuencia en el plan de mantenimiento Excel. Reducciones requieren validación del jefe de mantenimiento.

La decisión de reducir frecuencias requiere validación adicional del jefe de mantenimiento, considerando criticidad operacional del subsistema, mientras que incrementos son implementados directamente por el planificador. Los ajustes ejecutados se documentan en el formato de retroalimentación.

5.2.3.4. Protocolo de retroalimentación

Los ajustes de frecuencias requieren documentación que cierre el ciclo desde detección hasta implementación de acciones. El protocolo establece tres formatos consolidados de retroalimentación, uno para cada técnica predictiva, que registran todos los hallazgos detectados en una inspección y su seguimiento posterior.

Los formatos consolidados se estructuran para capturar información de múltiples hallazgos simultáneamente, facilitando al planificador registrar condición completa del equipo en cada inspección. El Anexo D presenta las tres plantillas diseñadas: formato para análisis de vibraciones, formato para termografía infrarroja y formato para análisis tribológico de aceite lubricante.

El planificador debe completar el formato al recibir cada informe predictivo, registrando fecha de inspección, subsistemas evaluados, parámetros medidos y severidad clasificada para cada hallazgo detectado. Los hallazgos que requieren intervención se marcan para seguimiento, mientras que hallazgos en niveles normales quedan documentados para análisis de tendencias. Cuando técnicos o personal externo ejecutan correcciones, registran actividades en órdenes de trabajo correspondientes. En la siguiente inspección, el planificador verificará la efectividad de acciones ejecutadas, completando el formato con resultados obtenidos y documentando ajustes de frecuencia implementados según criterios establecidos. El formato completado se archiva físicamente junto al registro de la tarea preventiva correspondiente.

Este protocolo vincula formalmente hallazgos predictivos con plan preventivo mediante documentación trazable, operando los criterios técnicos definidos. El protocolo normativo establecido prepara la base para el diseño de la matriz prescriptiva que especifica acciones concretas según el nivel de severidad detectado.

5.2.4. Diseño de la Matriz Prescriptiva de Decisión

El protocolo normativo establecido define el flujo operativo desde detección de hallazgos hasta retroalimentación al plan preventivo, pero requiere especificar acciones concretas según severidad detectada. La matriz prescriptiva constituye el componente de decisión del modelo, vinculando clasificaciones técnicas con intervenciones específicas, plazos de ejecución y registros documentales.

La matriz se estructura en tres componentes secuenciales. Primero, establece clasificación unificada de severidad que integra las escalas diferenciadas de cada técnica predictiva en niveles comparables. Segundo, prescribe acciones específicas para cada nivel de severidad, diferenciando entre monitoreo intensificado, mantenimiento programado e intervención inmediata. Tercero, define plazos operacionales que traducen clasificación de severidad en ventanas temporales ejecutables por personal de mantenimiento. Esta estructura opera los criterios técnicos mediante decisiones accionables.

5.2.4.1. Clasificación de niveles de severidad

Las escalas diferenciadas de cada técnica predictiva requieren integración en clasificación unificada que permita prescribir acciones consistentes independientemente de la técnica que detectó el hallazgo. La clasificación se estructura en cuatro niveles adoptando el marco de ISO 10816-3, norma que define explícitamente cuatro zonas de severidad (A-B-C-D) con interpretaciones operacionales diferenciadas, mientras que ISO 18434-1 establece cinco niveles termográficos y los criterios del laboratorio definen tres niveles tribológicos. La estructura de cuatro zonas ISO captura la gradación necesaria entre monitoreo rutinario, monitoreo intensificado, intervención programada e intervención inmediata, permitiendo mapear las escalas de cinco y tres niveles sin perder estados operacionales críticos ni crear distinciones artificiales innecesarias.

La correspondencia entre escalas se establece según equivalencia de urgencia operacional: hallazgos que demandan la misma ventana temporal de respuesta se agrupan en un nivel

común. La zona C de ISO 10816-3 define condición insatisfactoria, donde el equipo puede operar por tiempo limitado hasta planificar mantenimiento, estableciendo un estado intermedio entre monitoreo intensificado en la zona B y acción inmediata en la zona D. La Tabla 33 consolida las equivalencias establecidas:

Tabla 33

Clasificación unificada de niveles de severidad.

Nivel unificado	Denominación	Análisis de vibraciones	Termografía infrarroja	Análisis tribológico	Interpretación operacional
1	NORMAL	P4	LEVE	Normal	Operación sin restricciones, monitoreo según frecuencia establecida.
2	MODERADO	P3	MEDIO	Precaución	Indicios degradación, intensificar frecuencia monitoreo.
3	ALTO	P2	SEVERO	Anormal	Intervención programada en próxima ventana mantenimiento
4	CRÍTICO	P1	CRÍTICO, EXTREMO	–	Intervención inmediata, riesgo daño progresivo.

Nota: La Tabla 33, presenta la clasificación basada en estructura ISO 10816-3 y equivalencia de urgencia temporal de respuesta.

La distinción entre nivel ALTO y CRÍTICO captura diferencia operacional entre intervención que puede programarse coordinando recursos (días/semanas) versus intervención que demanda ejecución con máxima prioridad (horas/día). Los niveles termográficos CRÍTICO y EXTREMO convergen en nivel CRÍTICO unificado porque ambos representan gradientes térmicos donde componentes eléctricos operan con riesgo de falla inminente, sin diferencia práctica en urgencia de respuesta. La ausencia de nivel CRÍTICO en clasificación tribológica refleja que el análisis de aceite detecta degradación progresiva, pero no proporciona señales de falla inminente que demanden detención inmediata del equipo.

Esta clasificación permite comparar severidad entre hallazgos simultáneos de múltiples técnicas y prescribir acciones mediante matriz única aplicable a todos los subsistemas del mezclador industrial. Los cuatro niveles establecidos constituyen el criterio de decisión para definir intervenciones específicas según severidad detectada.

5.2.4.2. Definición de acciones prescriptivas por nivel

Los cuatro niveles de severidad establecidos requieren acciones de mantenimiento diferenciadas que respondan proporcionalmente al riesgo detectado. Las acciones prescriptivas vinculan clasificación de severidad con mecanismos operativos del protocolo normativo: procedimiento de análisis de la Tabla 31, ajuste de frecuencias de la Tabla 32, formatos de retroalimentación del Anexo D y flujo de información de la Figura 15. La Tabla 34 presenta las acciones específicas para cada nivel unificado.

Tabla 34

Acciones prescriptivas por nivel de severidad.

Nivel	Registro Anexo B	Ajuste frecuencia	Coordinación jefaturas	Orden de trabajo	Verificación
NORMAL	Planificador registra hallazgo en formato correspondiente (D1/D2/D3)	No requiere	No requiere	No genera OT	Siguiente inspección programada
MODERADO	Planificador registra hallazgo y documenta evaluación	Planificador aplica tabla de criterios para ajuste de frecuencias de inspección. Si cumple criterios: semestral→trimestral o anual→semestral	No requiere	No genera OT	Siguiente inspección programada.
ALTO	Planificador registra hallazgo, evaluación y recursos definidos.	Planificador implementa ajuste según tabla de criterios para ajuste de frecuencias de inspección en plan Excel.	Planificador coordina con el jefe del departamento y jefe mantenimiento. Definen recursos y plazo.	Planificador genera OT (vibraciones) o (termografía/aceite). Técnicos ejecutan y registran.	Siguiente inspección: planificador verifica efectividad y completa Anexo D.
CRÍTICO	Planificador registra hallazgo con prioridad urgente.	Planificador implementa inmediatamente: semestral→trimestral o anual→trimestral.	Coordinación prioritaria con el jefe del departamento y jefe mantenimiento. Asignan recursos inmediatos.	OT prioritaria. Ejecución con prioridad sobre actividades programadas.	Verificación anticipada en plazo reducido. Planificador completa Anexo D.

Nota: La Tabla 34, presenta las acciones ejecutadas por planificador según flujo Figura 15. Jefaturas: jefe de mantenimiento del departamento y jefe de mantenimiento (nivel supervisión).

Las acciones prescritas operan la integración predictivo-preventivo mediante cuatro componentes: registro documental, ajuste dinámico de frecuencias, coordinación de recursos y ejecución rastreable. La intensidad escala desde monitoreo pasivo en nivel NORMAL hasta intervención correctiva urgente en nivel CRÍTICO, garantizando respuesta proporcional al riesgo detectado. La definición de plazos específicos complementa estas acciones establecien-

do ventanas temporales de ejecución que aseguran oportunidad operativa según severidad clasificada.

5.2.4.3. Especificación de plazos y prioridades

Las acciones prescriptivas definidas requieren plazos de ejecución que garanticen respuesta oportuna según riesgo detectado. La norma ISO 17359 establece que las decisiones de mantenimiento predictivo dependen del nivel de confianza en el diagnóstico y la severidad clasificada, variando desde monitoreo en intervalos normales hasta acciones correctivas inmediatas. Los plazos de respuesta se estructuran considerando tres factores: severidad del hallazgo, criticidad operacional del subsistema afectado y disponibilidad de recursos para intervención.

El establecimiento de plazos diferenciados permite priorizar recursos de mantenimiento según urgencia operativa. Hallazgos en niveles inferiores de severidad permiten programación de acciones en ventanas de parada planificada, optimizando uso de recursos sin comprometer operación. Hallazgos en niveles críticos requieren respuesta inmediata para prevenir daño al equipo o parada no planificada. La Tabla 35 establece los plazos de ejecución por nivel de severidad.

Tabla 35

Plazos de ejecución y prioridades por nivel de severidad.

Nivel	Plazo para coordinación	Plazo para ejecución OT	Prioridad	Programación	Fundamento
NORMAL	No aplica	No genera OT	Rutinaria	Siguiente inspección según frecuencia establecida (semestral, anual).	Monitoreo en intervalos normales según ISO 17359. Condición estable no requiere intervención.
MODERADO	No aplica	No genera OT	Media	Ajuste frecuencia implementado en siguiente ciclo de inspección.	Aumento de monitoreo sin intervención correctiva. Evaluación continua de tendencia.
ALTO	Máximo 5 días hábiles desde recepción informe	Máximo 15 días hábiles desde coordinación aprobada.	Alta	Planificación en próxima ventana de parada programada o mantenimiento preventivo del subsistema.	Acción correctiva planificada según ISO 17359. Permite preparación de recursos y minimiza impacto operacional.
CRÍTICO	Máximo 24 horas desde recepción informe.	Máximo 72 horas desde coordinación aprobada.	Urgente	Ejecución inmediata, independiente de programación preventiva.	Respuesta inmediata para prevenir daño según ISO 17359. Riesgo de falla funcional inminente.

Nota: La Tabla 35, presenta los plazos definidos según ISO 17359 sobre decisiones de mantenimiento predictivo. Los días hábiles se calculan según la operación de la empresa. Ventanas de parada programada coordinadas con jefe de producción para minimizar impacto operativo.

Los plazos establecidos operan la matriz prescriptiva, vinculando severidad clasificada

con urgencia de respuesta. El nivel NORMAL mantiene monitoreo rutinario sin modificar programación establecida. El nivel MODERADO intensifica la frecuencia de inspección manteniendo un enfoque preventivo. Los niveles ALTO y CRÍTICO activan mecanismos de corrección diferenciados por urgencia: planificación programada versus respuesta inmediata.

La priorización permite gestión eficiente de recursos de mantenimiento limitados, asignando atención inmediata a condiciones de mayor riesgo mientras mantiene vigilancia sobre condiciones estables. Los plazos definidos se integran al flujo operativo de la Figura 15, donde el planificador ejecuta coordinación con jefaturas dentro de ventanas temporales establecidas y verifica cumplimiento en formato de retroalimentación del Anexo D.

La matriz prescriptiva establece acciones diferenciadas, plazos operacionales y prioridades según severidad clasificada, completando el diseño del modelo normativo-prescriptivo de integración propuesto. Este modelo combina protocolo normativo que define flujo de información, criterios técnicos que clasifican hallazgos y matriz prescriptiva que especifica intervenciones ejecutables.

La matriz prescriptiva completa el diseño del modelo de integración propuesto, estableciendo acciones diferenciadas, plazos operacionales y prioridades según severidad clasificada. El componente de Validación Retrospectiva mencionado en el modelo requiere ahora diseño metodológico que especifique cómo evaluar la efectividad del modelo mediante aplicación a eventos históricos.

5.2.5. Diseño de la evaluación retrospectiva del modelo

El componente de Validación Retrospectiva del modelo aplica el protocolo normativo y matriz prescriptiva a eventos correctivos históricos del mezclador industrial. Los eventos correctivos representan fallas que ocurrieron sin integración formal, donde hallazgos predictivos previos no generaron acciones preventivas documentadas. Cuando existe informe predictivo generado antes de la falla correctiva, constituye una oportunidad perdida de intervención. Aplicar el modelo retrospectivamente simula el escenario hipotético donde esa oportunidad se habría aprovechado mediante integración formal, cuantificando la diferencia temporal entre respuesta real y respuesta prescrita por el modelo. Esta evaluación demuestra efectividad potencial calculando indicadores de mejora atribuibles a la integración.

El diseño metodológico especifica cuatro aspectos: selección de eventos históricos que constituyen la muestra de evaluación, procedimiento para aplicar retrospectivamente el modelo a estos eventos, definición de indicadores cuantitativos que miden efectividad y diseño de representación gráfica comparativa que evidencia mejora obtenida. Esta metodología permite validar el modelo sin implementación práctica completa, cumpliendo el requisito establecido en el contexto del proyecto.

5.2.5.1. Selección de eventos históricos

La evaluación retrospectiva se aplica a una muestra de eventos correctivos seleccionados mediante criterios específicos. La identificación y listado de eventos seleccionados se presenta en Fase 4, donde se ejecuta la evaluación. Esta sección establece únicamente la metodología de selección.

El muestreo intencional permite demostrar efectividad del modelo, enfocándose en eventos de mayor impacto operacional sin requerir análisis exhaustivo de todos los correctivos registrados. Los eventos seleccionados deben cumplir tres criterios simultáneos:

1. **Disponibilidad de información predictiva previa:** Existe informe de vibraciones, termografía o aceite generado por Predictiva antes de la falla correctiva.
2. **Criticidad operacional:** El evento generó parada no planificada del mezclador industrial o degradación significativa de producción, registrado en SAP PM con tipo de actividad correctiva.
3. **Documentación completa:** El evento cuenta con orden de trabajo cerrada que especifica fecha de falla, componente afectado, causa raíz y tiempo de reparación.

Estos criterios garantizan la viabilidad de la evaluación: sin informe predictivo previo resulta imposible aplicar el modelo retrospectivamente, sin criticidad operacional no se demuestra impacto significativo del modelo y, sin documentación completa, no se pueden calcular indicadores comparativos entre escenario real e hipotético.

La muestra objetivo comprende de 5 a 8 eventos que cumplan simultáneamente estos criterios, priorizando aquellos con mayor tiempo de parada o mayor frecuencia de recurrencia. Esta cantidad permite análisis comparativo significativo sin complejidad operativa excesiva,

cumpliendo el requisito de validación sin implementación completa del modelo. Los eventos identificados según estos criterios constituyen la base para aplicar el procedimiento de evaluación retrospectiva.

5.2.5.2. Procedimiento de aplicación retrospectiva

Los eventos seleccionados según criterios establecidos requieren aplicación del modelo para simular el escenario hipotético donde existía integración formal. El procedimiento aplica secuencialmente los componentes diseñados del modelo a información histórica documentada, comparando la gestión real del evento contra la gestión que habría resultado con el modelo operando.

Para cada evento seleccionado, se ejecutan cuatro pasos:

- **Paso 1. Identificación del hallazgo predictivo:** Se localiza el informe predictivo generado antes del evento correctivo, extrayendo fecha de inspección, componente evaluado y parámetros medidos (velocidad RMS, gradiente térmico o concentración de elementos metálicos según técnica aplicada).
- **Paso 2. Clasificación de severidad:** Se aplica la Tabla 31 al informe histórico, comparando valores medidos contra los criterios normativos, para determinar el nivel de severidad (P4-P1 para vibraciones, LEVE-EXTREMO para termografía, Normal-Anormal para aceite). Posteriormente, se aplica la Tabla 33 para traducir a clasificación unificada (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO).
- **Paso 3. Determinación de acción prescrita:** Se aplica la Tabla 34 según el nivel de severidad unificado, para identificar la acción que el modelo habría prescrito (registro, ajuste de frecuencia, coordinación, orden de trabajo). La Tabla 35 establece plazo hipotético para ejecutar la intervención preventiva.
- **Paso 4. Cálculo comparativo:** Se registra fecha real de falla correctiva y se calcula fecha hipotética de intervención preventiva sumando plazos de Tabla 35 a fecha de inspección predictiva. La diferencia temporal cuantifica oportunidad perdida por ausencia de integración formal.

Este procedimiento genera datos comparativos para cada evento: escenario real (días transcurridos hasta falla) versus escenario hipotético (días hasta intervención preventiva)

prescrita). Estos datos alimentan el cálculo de indicadores de efectividad que cuantifican la mejora atribuible al modelo.

5.2.5.3. Indicadores de efectividad del modelo

El procedimiento de aplicación retrospectiva genera datos comparativos que requieren métricas específicas para cuantificar la efectividad del modelo propuesto. Estos indicadores no corresponden a indicadores operacionales que la empresa utiliza actualmente, sino que miden específicamente el cierre de las brechas identificadas en Fase 1 mediante la integración formal entre técnicas predictivas y plan de mantenimiento.

La Fase 1 identificó cinco brechas operativas. Los tres indicadores definidos miden directamente el cierre de las brechas de mayor impacto operacional: la reducción de tiempo cuantifica aceleración de respuesta al transformar hallazgos en acciones, el porcentaje de eventos prevenibles mide capacidad del modelo para evitar fallas mediante intervención anticipada, y los días acumulados recuperables agregan beneficio operacional total atribuible a la integración formal. La Tabla 36 presenta los indicadores de efectividad.

Tabla 36

Indicadores para evaluación de efectividad del modelo.

Indicador	Brecha que mide	Fórmula	Interpretación
Reducción promedio de tiempo de respuesta	Integración sistémica: 'hallazgos no se convierten en tareas preventivas'	$\frac{\text{Promedio}[(\text{Días reales} - \text{Días hipotéticos})]}{\text{Promedio}[\text{Días reales}]} \times 100$	Cuantifica aceleración de respuesta con modelo. Valor positivo indica que modelo reduce tiempo hasta intervención. (1)
Porcentaje de eventos prevenibles	Documentales + Integración sistémica: 'ausencia de retroalimentación'	$\left(\frac{\text{Eventos prevenibles}}{\text{Total eventos evaluados}} \right) \times 100$	Mide capacidad preventiva del modelo. Evento prevenible = fecha hipotética intervención < fecha real falla. (2)
Días acumulados recuperables	Frecuencia y monitoreo: 'frecuencias fijas independientes de condición real'	$\Sigma(\text{Días reales} - \text{Días hipotéticos})$ Para eventos con diferencia positiva	Beneficio agregado en días. Representa tiempo productivo recuperable con integración formal. (3)

Nota: La Tabla 36, presenta los indicadores fundamentados en las brechas de la Fase 1. Calculables con eventos SAP PM e informes Predictiva históricos.

Estos tres indicadores cuantifican el cierre de las brechas de mayor impacto identificadas

en el diagnóstico, cumpliendo el requisito de validación retrospectiva sin implementación completa. Los valores calculados se presentan mediante representación gráfica comparativa.

5.2.5.4. Representación gráfica comparativa

Los indicadores calculados requieren representación visual que evidencie mejora atribuible al modelo mediante comparación directa entre escenarios. La representación gráfica sintetiza resultados cuantitativos en formato comprensible que facilita la comunicación de efectividad del modelo a personal técnico y gerencial.

Se propone gráfica de líneas comparativas con la siguiente estructura:

Eje horizontal (X): Eventos correctivos evaluados, ordenados cronológicamente por fecha de falla real.

Eje vertical (Y): Días transcurridos desde inspección predictiva hasta intervención.

Línea roja (escenario real): Representa días transcurridos desde inspección predictiva hasta falla correctiva real para cada evento. Se calcula como diferencia entre fecha de falla en SAP PM y fecha de inspección en informe predictivo.

Línea verde (escenario hipotético): Representa días que habrían transcurrido hasta la intervención preventiva prescrita por el modelo. Se calcula sumando plazo de Tabla 35 a fecha de inspección.

Interpretación: Distancia vertical entre líneas cuantifica días ganados por evento. Línea verde consistentemente por debajo de línea roja demuestra que modelo acelera respuesta. Eventos donde líneas se cruzan indican casos no prevenibles por limitaciones técnicas de detección.

Esta representación gráfica complementa los indicadores numéricos de la Tabla 36, proporcionando evidencia visual de efectividad del modelo. El diseño metodológico completo de evaluación retrospectiva prepara la base para la validación del modelo con personal técnico que confirme la viabilidad operativa de los componentes diseñados.

5.2.6. Validación del modelo mediante entrevistas semiestructuradas

El modelo normativo-prescriptivo diseñado integra criterios técnicos, protocolo de información y matriz de decisión fundamentados en normativas ISO y literatura técnica. La propuesta requiere validación que evalúe coherencia técnica, factibilidad operativa y completitud antes de presentarla como solución aplicable para la empresa. La validación identifica ajustes necesarios considerando recursos disponibles, estructura organizacional y capacidades del personal que ejecutaría el modelo.

5.2.6.1. Diseño del protocolo de validación

La validación se ejecuta mediante entrevistas semiestructuradas, técnica cualitativa que combina preguntas cuantitativas con escala Likert (1-5) y preguntas abiertas para capturar sugerencias específicas de ajuste. Este método permite evaluar la viabilidad operativa del modelo propuesto desde la perspectiva de quienes lo ejecutarían, identificando aspectos técnicos o procedimentales que requieren refinamiento.

El protocolo estructura la validación en tres dimensiones evaluativas:

1. La coherencia técnica verifica que criterios normativos, clasificación unificada de severidad y umbrales definidos resulten apropiados para equipos del mezclador industrial.
2. La factibilidad operativa analiza si el protocolo de información, matriz prescriptiva y plazos establecidos son ejecutables con recursos y estructura organizacional disponibles.
3. La completitud identifica componentes faltantes o aspectos no contemplados que comprometerían la efectividad del modelo.

El instrumento de validación se presenta en el Anexo E, con preguntas estructuradas por dimensión evaluativa que permiten cuantificar el nivel de acuerdo mediante la escala Likert y capturar retroalimentación cualitativa sobre ajustes necesarios. El mismo instrumento se aplica a los cuatro participantes, garantizando consistencia en la evaluación de dimensiones críticas del modelo propuesto.

5.2.6.2. Selección de participantes

La selección representa la cadena de decisión del departamento de mantenimiento, capturando perspectivas estratégica, táctica y operativa necesarias para validar la viabilidad

integral del modelo. Los cuatro participantes seleccionados se involucran directamente con la gestión del mezclador industrial y ejecutarían componentes del modelo propuesto según roles definidos en el protocolo normativo. La Tabla 37 presenta la composición:

Tabla 37

Participantes para validación del modelo.

Cargo	Criterios de selección	Perspectiva de validación
Jefe mantenimiento del departamento	- Autoridad decisional sobre plan preventivo - Conocimiento de técnicas predictivas - Gestión de recursos departamento	Viabilidad estratégica y restricciones organizacionales
2 jefes mantenimiento (supervisión)	- Mínimo 5 años en el departamento - Coordinación de correctivos mayores - Conocimiento fallas recurrentes mezclador industrial	Coherencia técnica de criterios y protocolo
Planificador/Programador	- Gestión de programaciones preventivas - Manejo de frecuencias actuales - Ejecución de procedimientos operativos	Factibilidad de implementación operativa

Nota: La Tabla 37, presenta el panel equilibrado entre niveles estratégico, táctico y operativo.

La composición garantiza validación desde perspectivas complementarias: autorización de recursos y cambios organizacionales, verificación de correctitud técnica de umbrales y flujo, y confirmación de capacidad operativa de ejecutar procedimientos con infraestructura disponible.

5.2.6.3. Ejecución de entrevistas

Las entrevistas se ejecutan individualmente con cada participante, utilizando las tablas de clasificación unificada de severidad, acciones prescriptivas por nivel, plazos de ejecución y prioridades, junto con el diagrama de flujo de información predictivo-preventivo. Este material permite al participante visualizar componentes del modelo mientras responde el instrumento del Anexo E.

Cada entrevista inicia con explicación del propósito de validación, continúa con presentación de componentes mediante tablas impresas, prosigue con aplicación del instrumento estructurado y finaliza capturando retroalimentación cualitativa sobre ajustes necesarios. La duración aproximada es de 45 minutos por participante, ejecutándose en ubicaciones del departamento de mantenimiento para facilitar acceso a documentación técnica si el participante

requiere consultar información adicional durante la validación.

5.2.6.4. Análisis de resultados de validación

Las entrevistas ejecutadas generan respuestas cuantitativas mediante escala Likert y retroalimentación cualitativa mediante comentarios abiertos. El procesamiento cuantitativo consolida respuestas calculando promedio aritmético por dimensión y por pregunta individual, identificando consenso cuando el promedio alcanza ≥ 4.0 aceptación moderada entre 3.0-3.9 y divergencia < 3.0 . La Tabla 38 presenta resultados consolidados.

Tabla 38

Resultados consolidados de validación del modelo mediante entrevistas a expertos.

Dimensión	Pregunta	Promedio	Interpretación
Coherencia técnica	P1: Umbrales normativos	4.25	Consenso
	P2: Clasificación severidad	4.75	Consenso fuerte
	P3: Procedimiento análisis	4.75	Consenso fuerte
	P4: Criterios selección eventos	4.25	Consenso
	Promedio dimensión	4.50	Consenso fuerte
Factibilidad operativa	P5: Flujo información	4.25	Consenso
	P6: Acciones prescriptivas	4.25	Consenso
	P7: Plazos establecidos	3.00	Aceptación moderada
	P8: Aplicación retrospectiva	3.25	Aceptación moderada
	Promedio dimensión	3.69	Aceptación moderada
Completitud	P9: Cobertura aspectos	4.50	Consenso fuerte
	P10: Formatos retroalimentación	4.25	Consenso
	P11: Indicadores efectividad	4.00	Consenso
	P12: Ausencia omisiones críticas	4.50	Consenso fuerte
	Promedio dimensión	4.31	Consenso fuerte
Promedio general	P4-P12	4.17	Consenso

Nota: La Tabla 38, presenta la escala de Likert 1-5 donde 5=Totalmente de acuerdo, 4=De acuerdo, 3=Ni de acuerdo ni en desacuerdo, 2=En desacuerdo, 1=Totalmente en desacuerdo. Consenso ≥ 4.0 , Aceptación moderada 3.0-3.9, Divergencia < 3.0 .

La coherencia técnica y completitud del modelo obtienen consenso fuerte con promedios de 4.50 y 4.31, respectivamente, validando los criterios normativos, clasificación de severidad,

procedimiento de análisis y cobertura de componentes. La factibilidad operativa alcanza aceptación moderada con 3.69, donde el flujo de información y acciones prescriptivas presentan consenso, mientras los plazos establecidos y aplicación retrospectiva requieren refinamiento según capacidad operacional real y disponibilidad de datos históricos. El procesamiento cualitativo complementa estos resultados mediante categorización de comentarios abiertos presentada en la Tabla 39.

Tabla 39

Categorización de comentarios cualitativos según tipo.

Tipo	Componente	Comentarios representativos
Validación directa	Criterios técnicos	- Unificar escalas facilita toma de decisiones
	Procedimiento análisis	- Evitaría interrupciones subjetivas. - Respaldo técnico acciones correctivas.
Contexto organizacional	Sistema información	- SAP se está desarrollando
	Datos históricos	- Por ahora no se cuenta con muchos informes
Refinamientos propuestos	Plazos operacionales	- Se debería aumentar tiempos, mínimo 3 días. - Crítico debe evaluarse inmediato
	Protocolo normativo	- Debería tener análisis-ejecución-acción-nuevos análisis que determinen efectividad corrección.
	Plan preventivo	- Plan mantenimiento debe ajustarse condiciones propias cada máquina mediante RCM, generar modelo dinámico.
Recursos implementación	Personal y capacitación	- Personal y capacitación. - Completar personal salido.
	Digitalización	- Tener digitalizado formatos - Registros organizados - Documentado

Nota: La Tabla 39, presenta los comentarios extraídos literalmente de entrevistas completadas por cuatro participantes con experiencia entre 1.5 y 18 años.

El promedio general de 4.17 valida el diseño propuesto, identificando tres categorías de componentes según el nivel de refinamiento requerido. Los criterios técnicos normativos, clasificación de severidad y procedimiento de análisis se mantienen sin modificación por validación directa recibida. Los plazos operacionales y formatos de retroalimentación requieren ajustes menores, adaptándolos a la capacidad operacional disponible en la empresa. El protocolo normativo demanda ampliación, incorporando verificación de efectividad posterior a

correcciones ejecutadas, mientras el plan preventivo requiere adaptabilidad mediante criterios RCM según condiciones específicas de cada equipo.

La validación confirma viabilidad técnica y operativa del modelo propuesto, reconociendo su naturaleza propositiva que permite adaptación contextual. La empresa puede adoptar la estructura diseñada ajustando componentes operacionales como plazos o frecuencias según recursos disponibles y prioridades estratégicas, manteniendo la lógica fundamental de integración formal entre hallazgos predictivos y plan preventivo. Los refinamientos identificados orientan ajustes que optimizan aplicabilidad sin comprometer coherencia técnica del modelo diseñado.

5.2.6.5. Refinamiento del modelo

La validación mediante entrevistas identificó tres categorías de componentes según el nivel de ajuste requerido: componentes validados que mantienen su diseño original, componentes que requieren ajustes operacionales menores y componentes que demandan refinamiento sustancial. El refinamiento se presenta siguiendo la secuencia de diseño del modelo: criterios técnicos normativos, protocolo de integración, matriz prescriptiva y metodología de evaluación retrospectiva.

5.2.6.5.1. Criterios técnicos normativos

Los criterios técnicos normativos se mantienen sin modificación. Los umbrales de velocidad RMS según ISO 10816-3, gradientes térmicos según ISO 18434-1 y concentraciones de elementos metálicos según laboratorio externo obtuvieron promedio de 4.25 en validación, confirmando su aplicabilidad técnica para clasificar condición de equipos del mezclador industrial. La clasificación unificada de severidad en cuatro niveles alcanzó promedio de 4.75, validando su capacidad para diferenciar urgencia de intervención según hallazgo detectado. El procedimiento de análisis por técnica predictiva obtuvo igualmente 4.75, siendo reconocido como respaldo técnico que evita interrupciones subjetivas en la interpretación de informes.

La retroalimentación cualitativa confirma esta validación señalando que unificar escalas facilita la toma de decisiones y que el procedimiento constituye respaldo técnico de acciones correctivas. La única observación registrada indica que los umbrales normativos son necesarios, aunque no siempre reflejan la condición real del equipo, reconociendo la limitación inherente a técnicas predictivas sin cuestionar la apropiación de criterios establecidos. Los criterios

técnicos validados alimentan el protocolo normativo que traduce hallazgos clasificados en acciones ejecutables de mantenimiento.

5.2.6.5.2. Protocolo normativo de integración

El protocolo normativo requiere explicitar procedimiento de verificación de efectividad posterior a correcciones ejecutadas. La retroalimentación señala que el flujo debe incluir análisis-ejecución-acción-nuevos análisis que detdeterminen la efectividad de la corrección implementada. El flujo diseñado en la Figura 19 ya incorpora una etapa donde el planificador verifica el resultado y completa el formato estandarizado, pero no especifica cómo ejecutar esta verificación.

El procedimiento de verificación explicita tres acciones que el planificador ejecuta en la inspección posterior a la corrección. Primero, localiza los parámetros medidos en inspección previa donde se detectó la anomalía, extrayendo valores registrados en formato de retroalimentación antes de la intervención. Segundo, compara estos valores contra parámetros actuales reportados en el nuevo informe predictivo, aplicando nuevamente criterios normativos para determinar si la severidad disminuyó, se mantiene o aumentó. Tercero, documenta resultado de esta comparación en formato de retroalimentación, registrando el parámetro verificado y la fecha de verificación. Este procedimiento operacionaliza el bloque de verificación ya presente en la Figura 19, cerrando el ciclo desde detección hasta confirmación documentada de efectividad.

Los formatos de retroalimentación del Anexo D requieren ajuste menor, incorporando una columna de “Fecha siguiente inspección” que documenta cuándo se ejecutó la verificación. La columna existente “Resultado siguiente inspección” permite registrar parámetro verificado y compararlo contra valor original detectado antes de la intervención. La retroalimentación sobre digitalización se incorpora mediante nota indicando que la empresa puede implementar versión digital según desarrollo de SAP PM, manteniendo formato físico como alternativa operativa inmediata.

El protocolo refinado explicita el procedimiento de verificación, documentando la efectividad de correcciones mediante comparación de parámetros en inspecciones sucesivas. Este cierre del ciclo opera la integración continua entre hallazgos predictivos y acciones correctivas, completando el flujo de información que alimenta la matriz prescriptiva donde se definen plazos operacionales según severidad detectada.

5.2.6.5.3. Matriz prescriptiva de decisión

La matriz prescriptiva requiere ajuste de plazos operacionales para nivel ALTO según retroalimentación de validación. Los niveles NORMAL, MODERADO y CRÍTICO se mantienen sin modificación, habiendo alcanzado consenso en validación. El nivel ALTO obtuvo promedio de 3.00 en evaluación de plazos, señalando necesidad de extensión temporal, considerando disponibilidad de personal y complejidad de intervenciones.

La retroalimentación indica que los plazos propuestos originalmente resultan ajustados para la capacidad operacional disponible. El comentario señala que se deberían aumentar tiempos con mínimo de tres días adicionales, mientras otro participante indica que personal disponible limita ejecución de acciones en ventanas cortas. El nivel CRÍTICO mantiene plazos originales, validándose el principio de respuesta inmediata ante riesgo de daño progresivo, confirmado explícitamente mediante comentario que crítico debe evaluarse inmediato, independiente del personal. La Tabla 40 presenta plazos refinados incorporando esta retroalimentación operacional.

Tabla 40

Plazos operacionales refinados según validación.

Nivel	Plazo para coordinación	Plazo para ejecución OT	Modificación aplicada	Fundamentación
NORMAL	No aplica	No genera OT	Sin cambios	Validado, monitoreo rutinario
MODERADO	No aplica	No genera OT	Sin cambios	Validado, ajuste frecuencia
ALTO	Máximo 7 días hábiles desde recepción informe.	Máximo 20 días hábiles desde coordinación aprobada.	Extendido desde 5 y 15 días	Retroalimentación disponibilidad personal
CRÍTICO	Máximo 24 horas desde recepción informe.	Máximo 72 horas desde coordinación aprobada.	Sin cambios	Validado, urgencia técnica

Nota: La Tabla 40, presenta los plazos que constituyen los valores recomendados basados en validación con expertos operacionales. La empresa puede ajustarlos según capacidad real y experiencia operativa durante implementación.

Los plazos establecidos constituyen propuesta fundamentada en criticidad técnica y validación operacional, pero la empresa conserva flexibilidad para modificarlos según recursos disponibles, prioridades estratégicas y resultados obtenidos durante la aplicación del modelo. Esta adaptabilidad reconoce que plazos óptimos pueden variar según contexto organizacional específico, permitiendo ajuste sin comprometer estructura lógica del modelo donde mayor

severidad demanda menor ventana temporal de respuesta. Los plazos refinados operacionalizan la matriz prescriptiva, completando el diseño que vincula severidad clasificada con acciones ejecutables, preparando base para metodología de evaluación retrospectiva que valida efectividad del modelo mediante análisis de eventos históricos.

5.2.6.5.4. Evaluación retrospectiva

La metodología de evaluación retrospectiva diseñada se mantiene sin modificación. Los criterios de selección de eventos históricos, procedimiento de aplicación retrospectiva e indicadores de efectividad obtuvieron promedio de 4.25 en validación, confirmando apropiación metodológica para demostrar efectividad del modelo mediante análisis de casos reales. La única observación registrada señala limitación contextual sobre disponibilidad de datos históricos, indicando que SAP PM se encuentra en desarrollo y que por ahora no se cuenta con muchos informes predictivos previos a eventos correctivos.

Esta observación no constituye deficiencia metodológica del diseño, sino restricción operacional temporal que afecta la cantidad de eventos evaluables. El procedimiento diseñado permanece válido, aplicándose a eventos donde exista informe predictivo previo documentado, independientemente del tamaño muestral disponible. Los tres indicadores definidos permiten cuantificar la efectividad del modelo con eventos disponibles, cumpliendo el objetivo de validación retrospectiva sin requerir implementación práctica completa. La metodología validada prepara base para ejecución de evaluación retrospectiva que se presenta en Fase 4, donde se identifican eventos específicos cumpliendo criterios establecidos y se calculan indicadores diseñados.

El diseño validado de evaluación retrospectiva completa los cuatro componentes del modelo propuesto, estableciendo criterios técnicos normativos, protocolo de integración con verificación de efectividad, matriz prescriptiva con plazos operacionales refinados y metodología para demostrar efectividad mediante análisis de casos históricos. Estos componentes operan integrados, transformando hallazgos predictivos en acciones documentadas de mantenimiento, cerrando las brechas identificadas mediante estructura adaptable a contexto organizacional específico.

5.2.6.5.5. Carácter propositivo y adaptabilidad del modelo

El modelo diseñado constituye una propuesta normativo-prescriptiva flexible según contexto organizacional específico. La empresa puede adoptar el marco ajustando componentes

operacionales según recursos disponibles, prioridades estratégicas y capacidades instaladas, manteniendo la lógica fundamental de integración formal entre hallazgos predictivos y plan de mantenimiento preventivo.

Los plazos establecidos en la Tabla 40 representan valores recomendados basados en criticidad técnica y validación con expertos operacionales. La organización puede modificar estas ventanas temporales según experiencia acumulada durante la aplicación, ajustando coordinación y ejecución de acciones a capacidad real sin comprometer el principio donde mayor severidad demanda menor tiempo de respuesta. Los criterios de ajuste de frecuencia de la Tabla 32 constituyen lineamientos generales que admiten refinamiento según historial específico de cada subsistema, permitiendo incrementar o reducir intervalos de inspección según patrones de degradación observados. Los umbrales normativos establecidos se basan en estándares ISO aplicados por proveedores externos actuales, pero si la empresa modifica proveedores o adopta normativas diferentes, puede actualizar valores manteniendo estructura lógica de clasificación en cuatro niveles de severidad.

Esta flexibilidad garantiza portabilidad, permitiendo aplicación en otras organizaciones industriales con técnicas predictivas y planes preventivos que requieran integración formal. Otras empresas pueden implementar la arquitectura diseñada ajustando criterios técnicos a normativas aplicables en su contexto, plazos a capacidades operacionales disponibles y frecuencias a criticidad específica de sus equipos, sin modificar componentes fundamentales: clasificación de severidad, protocolo de información con verificación de efectividad, matriz prescriptiva vinculando severidad con acciones y evaluación retrospectiva demostrando efectividad mediante casos históricos.

El modelo refinado integra validación técnica de expertos operacionales con adaptabilidad contextual necesaria para aplicación práctica. Los componentes diseñados mantienen coherencia técnica validada, incorporando ajustes que optimizan factibilidad operativa según realidad de la empresa. La Fase 2 concluye habiendo diseñado un modelo de integración técnicamente fundamentado, operativamente validado y estructuralmente adaptable, compuesto por criterios técnicos normativos, protocolo de información con verificación de efectividad y matriz prescriptiva con plazos diferenciados. Este diseño conceptual requiere traducción a herramientas operativas ejecutables, objetivo que aborda la siguiente fase mediante el desarrollo de procedimientos operativos estándar y formatos de retroalimentación normalizada.

5.3. Elaborar procedimientos específicos y herramientas prácticas que faciliten la implementación del modelo de integración propuesto.

El modelo diseñado estableció criterios técnicos normativos, protocolo de información, clasificación unificada de severidad y matriz prescriptiva que responden a las brechas identificadas en Fase 1. Este diseño conceptual define qué componentes integran el modelo y cómo se relacionan entre sí, pero requiere traducción a herramientas operativas que permitan al personal técnico de la empresa ejecutarlo sin ambigüedades.

La presente fase estructura esta traducción mediante tres componentes. Los procedimientos operativos estándar especifican secuencias de actividades para gestión de hallazgos vibratorios, termográficos y tribológicos, ajuste de frecuencias de inspección y verificación de efectividad de acciones correctivas. Los formatos y plantillas estructuran el registro documental mediante instructivos de llenado y ejemplos aplicados con casos reales del mezclador industrial. La validación preliminar de usabilidad verifica aplicabilidad práctica mediante sesiones con el planificador, identificando dificultades operativas y refinando instrucciones antes de la validación teórica formal. La Figura 20 presenta los procedimientos y formatos desarrollados para operacionalizar el modelo.

Figura 20

Resumen gráfico de la Fase 3: Procedimientos operativos.



Nota: La Figura 20 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

5.3.1. Procedimientos operativos

Los procedimientos operativos estándar cierran la brecha entre diseño conceptual e implementación práctica, proporcionando instrucciones paso a paso que garantizan ejecución consistente independientemente del personal operador.

Para lograr esta consistencia, cada procedimiento se estructura mediante cuatro componentes secuenciales. La preparación identifica documentos, herramientas e información requerida antes de iniciar. La ejecución detalla pasos específicos aplicando criterios y tablas de la Fase 2 para clasificar hallazgos y determinar acciones. La verificación confirma coherencia técnica de la clasificación y factibilidad operativa de acciones prescritas. La documentación especifica qué registrar, dónde archivar y cómo establecer trazabilidad con sistemas de gestión existentes.

Siguiendo esta estructura común, se desarrollan cinco procedimientos diferenciados por tipo de actividad. Los tres primeros especifican gestión de hallazgos para cada técnica predictiva:

análisis de vibraciones aplicando criterios ISO 10816-3, termografía infrarroja según ISO 18434-1 y análisis tribológico mediante parámetros físico-químicos del lubricante. El cuarto procedimiento establece ajuste dinámico de frecuencias de inspección según tendencias y recurrencia de hallazgos. El quinto procedimiento detalla la verificación de efectividad de acciones correctivas ejecutadas mediante comparación de parámetros en inspecciones sucesivas. A continuación, se presenta cada procedimiento con su formato normalizado.

5.3.1.1. Procedimiento para gestión de hallazgos vibratorios

El análisis de vibraciones constituye la técnica predictiva principal aplicada al mezclador industrial para detectar degradación mecánica en componentes rotativos mediante medición de velocidad RMS, aceleración y envolvente espectral. En el diseño del modelo se establecieron criterios normativos ISO 10816-3 que definen umbrales cuantitativos para clasificar severidad vibratoria en cuatro zonas diferenciadas según características del equipo. El presente procedimiento especifica cómo aplicar estos criterios para traducir valores medidos en informes técnicos a decisiones ejecutables de mantenimiento, estableciendo secuencia operativa desde recepción del informe hasta registro documentado en plan preventivo.

El procedimiento aplica el formato estandarizado que guía al planificador desde la recepción del informe hasta la documentación final.

Código: POE-MIXER-VIBR-001

Versión: Versión: 1.0

Fecha: diciembre 2024

Área: Departamento de Mantenimiento

Equipo: Mezclador industrial

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para procesar informes de análisis de vibraciones del mezclador industrial, clasificar hallazgos según criterios normativos ISO 10816-3, determinar acciones según severidad detectada y documentar el ciclo completo desde detección hasta retroalimentación al plan de mantenimiento preventivo.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica a:

- Informes de análisis de vibraciones recibidos del proveedor externo.
- Componentes rotativos del mezclador industrial: motores eléctricos, reductores, sistema de transmisión y acoplamientos.
- Parámetros evaluados: velocidad RMS, aceleración y envolvente espectral.
- Parámetros evaluados: velocidad RMS, aceleración y envolvente espectral.
- Clasificación en cuatro niveles: NORMAL, MODERADO, ALTO y CRÍTICO.

Este procedimiento NO incluye:

- Ejecución de mediciones vibratorias (responsabilidad proveedor externo).
- Análisis espectral detallado (responsabilidad proveedor externo).
- Ejecución de intervenciones correctivas (responsabilidad jefaturas mantenimiento).

3. RESPONSABLES

La ejecución del procedimiento involucra cuatro roles diferenciados que cubren el ciclo completo, desde análisis técnico hasta verificación de resultados. El planificador ejecuta clasificación y documentación, las jefaturas autorizan recursos e intervenciones, y el proveedor externo realiza mediciones y verificaciones. La Tabla 41 detalla las responsabilidades específicas por cargo:

Tabla 41

Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos vibratorios.

Cargo	Responsabilidad
Planificador	<ul style="list-style-type: none">- Recibir y procesar informe predictivo.- Aplicar criterios técnicos de clasificación.- Determinar severidad unificada y acción prescrita.- Completar Formato de retroalimentación.- Coordinar con jefaturas según plazo establecido.- Generar orden de trabajo cuando aplica.

La Tabla 41 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 41.

Jefe de mantenimiento del departamento	<ul style="list-style-type: none"> - Autorizar ajustes de frecuencias. - Aprobar órdenes de trabajo correctivas. - Asignar recursos para niveles ALTO y CRÍTICO.
Jefe de mantenimiento (supervisión)	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinar intervenciones urgentes. - Supervisar ejecución de acciones correctivas. - Reportar resultados al planificador.
Proveedor externo	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar mediciones según programación. - Entregar informe técnico. - Ejecutar inspecciones de verificación.

Nota: La Tabla 41 presenta las responsabilidades definidas según organigrama departamental y flujo de información establecido en el diseño del modelo.

Esta distribución de responsabilidades establece la cadena de ejecución desde el análisis técnico inicial hasta la verificación de resultados, asegurando que cada rol conoce sus funciones específicas dentro del ciclo de gestión del hallazgo vibratorio.

4. DEFINICIONES

La interpretación técnica del procedimiento requiere comprensión de términos especializados del análisis vibratorio y clasificación de severidad. Las siguientes definiciones establecen vocabulario común para ejecutar el procedimiento consistentemente:

- **Velocidad RMS:** Valor eficaz de velocidad vibratoria medido en milímetros por segundo [mm/s], parámetro principal para evaluar severidad según ISO 10816-3. Representa la energía vibratoria total del componente.
- **Aceleración vibratoria:** Magnitud que cuantifica cambios en movimiento vibratorio, expresada en gravedades (g). Indicador sensible a impactos y defectos en elementos rodantes.
- **Envolvente espectral:** Técnica que aísla componentes de alta frecuencia asociadas a defectos incipientes en rodamientos. Detecta patrones de falla antes de manifestarse en velocidad RMS.
- **Zona de severidad ISO 10816-3:** Clasificación en cuatro rangos (A, B, C, D) según velocidad RMS, tipo de máquina, potencia nominal y condiciones de montaje.

- **Severidad unificada:** Clasificación en cuatro niveles (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO) que integra zona ISO 10816-3, facilitando decisiones consistentes de mantenimiento.

Estas definiciones permiten al planificador interpretar correctamente valores medidos, aplicar criterios normativos y comunicar hallazgos sin ambigüedades técnicas.

5. DESARROLLO

El desarrollo especifica secuencia operativa completa desde recepción del informe hasta registro documentado. Se estructura en cuatro etapas: preparación, ejecución, verificación y documentación. La preparación identifica información requerida. La ejecución aplica criterios técnicos de clasificación. La verificación valida la coherencia de resultados. La documentación establece trazabilidad formal. Cada etapa contiene pasos numerados secuencialmente que el planificador ejecuta sin omisiones.

5.1. Preparación

La preparación asegura disponibilidad de información completa antes de iniciar clasificación técnica. El planificador verifica contenido del informe predictivo, identifica subsistema evaluado y confirma datos suficientes para aplicar criterios normativos.

Paso 1: Recibir informe predictivo

El planificador recibe informe de análisis de vibraciones del proveedor Predictiva vía correo electrónico. El informe contiene identificación del equipo, fecha de medición, puntos monitoreados, valores medidos (velocidad RMS, aceleración, envolvente) y recomendaciones técnicas.

Paso 2: Verificar completitud

El planificador verifica que el informe incluye:

- Identificación del punto de medición
- Fecha de inspección
- Valores de al menos un parámetro vibratorio
- Condición operativa durante medición

Si la información está incompleta, contacta al proveedor solicitando aclaración. Si es suficiente, continúa con el paso 3.

Paso 3: Identificar subsistema evaluado

El planificador identifica el subsistema del mezclador industrial evaluado:

- Motores eléctricos: 1V, 1H, 1A.
- Reductores: izquierdo, derecho.
- Sistema de transmisión: acoples, ejes.
- Sistema hidráulico: bomba, motor

Esta identificación permite aplicar criterios técnicos específicos en ejecución.

5.2. Ejecución

La ejecución aplica criterios técnicos normativos para clasificar la severidad del hallazgo vibratorio. El planificador compara valores medidos contra umbrales ISO 10816-3, traduce la zona detectada al código unificado P4-P1 y determina la acción prescrita consultando la matriz de severidad.

Paso 4: Aplicar criterios de velocidad RMS

El planificador localiza la tabla de rangos de velocidad RMS según ISO 10816-3, identifica la fila correspondiente a la potencia del equipo evaluado (mediana menor a 300 kW o grande mayor o igual a 300 kW) y compara la velocidad medida contra las cuatro zonas establecidas. Los rangos establecen:

- Zona A: $< 1.4\text{mm/s}$ (máquinas medianas) o $< 2.3\text{mm/s}$ (máquinas grandes)
- Zona B: $1.4\text{-}2.8\text{ mm/s}$ (medianas) o $2.3\text{-}4.5\text{ mm/s}$ (grandes)
- Zona C: $2.8\text{-}4.5\text{ mm/s}$ (medianas) o $4.5\text{-}11.2\text{ mm/s}$ (grandes)
- • Zona D: $> 4.5\text{mm/s}$ (medianas) o $> 11.2\text{mm/s}$ (grandes)

Los equipos del mezclador industrial incluyen motorreductores de 160 kW (categoría mediana) y equipos de mayor potencia (categoría grande).

Paso 5: Aplicar criterios de aceleración

Si el informe reporta aceleración, el planificador localiza la tabla de criterios por aceleración, identifica el rango según velocidad rotacional del equipo y clasifica el

valor medido. Si el informe no reporta aceleración, continúa con el paso 6.

Paso 6: Aplicar criterios de envolvente

Si el informe reporta envolvente espectral, el planificador localiza la tabla de criterios por envolvente y clasifica el valor medido según rangos establecidos. Si el informe no reporta envolvente, continúa con el paso 7.

Paso 7: Clasificar severidad unificada

El planificador aplica la tabla de clasificación unificada de niveles de severidad, traduciendo prioridad vibratoria (P4-P1) a severidad unificada:

- P4 → NORMAL
- P3 → MODERADO
- P2 → ALTO
- P1 → CRÍTICO

Paso 8: Determinar acción prescrita

El planificador consulta la tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad, identificando acción según clasificación:

- NORMAL: Continuar monitoreo, sin acción adicional.
- MODERADO: Registrar en Formato D1, evaluar ajuste de frecuencia.
- ALTO: Completar Formato D1, coordinar con jefaturas, generar orden de trabajo.
- CRÍTICO: Coordinación inmediata, generar orden prioritaria.

Paso 9: Determinar plazo de ejecución

El planificador consulta la tabla de plazos de ejecución refinados según la validación de los expertos, estableciendo ventanas temporales:

- NORMAL: Sin plazo específico
- MODERADO: Implementar ajuste en el siguiente ciclo.
- ALTO: Coordinación en 7 días, ejecución en 20 días.
- CRÍTICO: Coordinación 24 horas, ejecución 72 horas.

El planificador calcula fecha límite desde recepción del informe.

5.3. Verificación

La verificación confirma coherencia técnica de la clasificación ejecutada y factibilidad operativa de acciones prescritas antes de documentar formalmente. El planificador revisa consistencia entre valores medidos, zona asignada, severidad unificada y acción determinada, corrigiendo inconsistencias detectadas. Posteriormente, evalúa disponibilidad de recursos y capacidades para ejecutar intervención en plazo establecido.

Paso 10: Validar consistencia

El planificador verifica coherencia de la clasificación mediante tres comprobaciones:

- ¿La zona ISO 10816-3 es consistente con el valor medido?
- ¿La severidad unificada refleja apropiadamente el riesgo técnico?
- ¿La acción prescrita es proporcional al nivel de severidad?

Si detecta inconsistencia, revisa pasos 4-9 y corrige. Si es consistente, procede al paso 11.

Paso 11: Confirmar factibilidad

El planificador evalúa factibilidad mediante tres criterios: disponibilidad de recursos para intervención en plazo, capacidad del proveedor para intensificar frecuencia si requerido y alcance de capacidades departamentales.

Si es factible, procede a la documentación. Si presenta restricciones, coordina con el jefe de mantenimiento del departamento, ajustando plazo sin comprometer seguridad. El nivel CRÍTICO no admite extensión de plazo.

5.4. Documentación

La documentación registra formalmente el hallazgo procesado, genera órdenes de trabajo cuando la severidad requiere intervención y establece trazabilidad con sistemas de gestión. El planificador completa formato de retroalimentación consolidando clasificación ejecutada y genera orden de trabajo según nivel determinado.

Paso 12: Completar Formato D1

El planificador completa el Formato D1 del Anexo F registrando fecha de inspección y subsistema evaluado, parámetro vibratorio con valor medido y criterio aplicado, severidad unificada y acción prescrita, plazo de ejecución y responsable. La sección de seguimiento incluye campos para fecha de intervención y resultado obtenido, completándose posteriormente tras ejecutar acción correctiva.

Paso 13: Generar orden de trabajo cuando aplica

Si severidad es ALTO, el planificador coordina con jefaturas en máximo 7 días hábiles y genera orden de trabajo con plazo de ejecución de 20 días hábiles. Si severidad es CRÍTICO, coordina en 24 horas y genera orden prioritaria con ejecución en 72 horas. El código de orden se registra en formato para seguimiento posterior. Si la severidad es NORMAL o MODERADA, no genera orden de trabajo.

6. REGISTROS

El procedimiento genera registros que documentan la gestión del hallazgo vibratorio y establecen trazabilidad con acciones ejecutadas. La Tabla 42 detalla registros generados, responsable de archivo y tiempo de retención:

Tabla 42

Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos vibratorios.

Registro	Responsable	Retención
Formato D1 (Anexo F)	Planificador	5 años
Orden de trabajo	Planificador	Indefinido
Informe predictivo original	Planificador	5 años

Nota: La Tabla 42, presenta la retención según requisitos ISO 14224 para históricos de mantenimiento.

Los tres registros establecen trazabilidad completa: el Formato D1 documenta clasificación y decisiones del hallazgo, la orden de trabajo correctiva se genera en SAP PM cuando severidad requiere intervención y el informe original preserva evidencia técnica del pro-

veedor. Los formatos físicos se archivan en la carpeta designada dentro del departamento.

7. ANEXOS

El procedimiento referencia documentos que establecen criterios técnicos, matriz prescriptiva y formatos de retroalimentación. Los siguientes anexos constituyen base técnica para la ejecución:

- Tabla de rangos de velocidad RMS según zonas de severidad ISO 10816-3.
- Tabla de criterios de severidad por aceleración según velocidad rotacional.
- Tabla de criterios de severidad por envolvente espectral.
- Tabla de clasificación operacional de prioridades de mantenimiento.
- Tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.
- Tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad.
- Tabla de plazos de ejecución refinados según validación de expertos.
- Formato D1 (Anexo F): Retroalimentación de análisis de vibraciones.

El siguiente procedimiento especifica la gestión de hallazgos termográficos, complementando el análisis vibratorio mediante detección de anomalías térmicas en componentes eléctricos y mecánicos.

5.3.1.2. Procedimiento para gestión de hallazgos termográficos

La termografía infrarroja detecta anomalías térmicas en componentes eléctricos y mecánicos del mezclador industrial mediante medición de gradientes de temperatura que indican sobrecalentamiento, desgaste o desbalance energético. La Fase 2 estableció criterios normativos ISO 18434-1 que definen umbrales cuantitativos para clasificar severidad térmica en cinco niveles diferenciados, según tipo de componente evaluado, que posteriormente se traducen a la clasificación unificada de cuatro niveles. El presente procedimiento especifica cómo aplicar estos criterios para traducir valores medidos en informes técnicos a decisiones ejecutables de mantenimiento, estableciendo secuencia operativa desde recepción del informe hasta registro documentado.

El procedimiento aplica la estructura estandarizada, adaptando criterios específicos de gradientes térmicos según el nivel de tensión del componente evaluado.

Código: POE-MIXER-TERM-002

Versión: 1.0

Fecha: Diciembre 2024

Área: Departamento de Mantenimiento

Equipo: Mezclador industrial

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para procesar informes de termografía infrarroja del mezclador industrial, clasificar hallazgos según criterios normativos ISO 18434-1, determinar acciones según severidad detectada y documentar el ciclo completo desde detección hasta retroalimentación al plan de mantenimiento preventivo.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica a:

- Informes de termografía infrarroja recibidos del proveedor externo.
- Componentes eléctricos y mecánicos del mezclador industrial: motores, tableros, conexiones, rodamientos.
- Parámetros evaluados: temperatura absoluta, gradiente térmico, patrón de distribución.
- Clasificación en cuatro niveles: NORMAL, MODERADO, ALTO y CRÍTICO.

Este procedimiento NO incluye:

- Ejecución de inspecciones termográficas (responsabilidad proveedor externo)
- Ejecución de intervenciones correctivas (responsabilidad jefaturas mantenimiento).

3. RESPONSABLES

El ciclo de gestión del hallazgo termográfico involucra los mismos cuatro roles establecidos en el procedimiento vibratorio, con responsabilidades análogas adaptadas a la técnica térmica. La Tabla 43 especifica las funciones por cargo:

Tabla 43

Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos termográficos.

Cargo	Responsabilidad
Planificador	<ul style="list-style-type: none"> - Recibir y procesar informe predictivo. -Aplicar criterios técnicos de clasificación. - Determinar severidad unificada y acción prescrita. - Completar Formato de retroalimentación. - Coordinar con jefaturas según plazo establecido. - Generar orden de trabajo cuando aplica.
Jefe de mantenimiento del departamento	<ul style="list-style-type: none"> - Autorizar ajustes de frecuencias. - Aprobar órdenes de trabajo correctivas. - Asignar recursos para niveles ALTO y CRÍTICO.
Jefe de mantenimiento (supervisión)	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinar intervenciones urgentes. - Supervisar ejecución de acciones correctivas. - Reportar resultados al planificador.
Proveedor externo	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar mediciones según programación. - Entregar informe técnico. - Ejecutar inspecciones de verificación.

Nota: La Tabla 43, presenta las responsabilidades definidas según organigrama departamental y flujo de información establecido en Fase 2.

La cadena de responsabilidades mantiene coherencia con el procedimiento vibratorio, asegurando trazabilidad desde detección térmica hasta verificación de efectividad.

4. DEFINICIONES

La interpretación técnica del procedimiento requiere comprensión de términos especializados del análisis termográfico y clasificación de severidad. Las siguientes definiciones establecen vocabulario común para ejecutar el procedimiento consistentemente:

- **Temperatura absoluta:** Valor medido directamente en superficie del componente expresado en grados Celsius (°C). Indica el nivel térmico operacional del elemento evaluado.
- **Gradiente térmico ΔT :** Diferencia de temperatura entre componente evaluado y

componente similar operando en condiciones normales, expresada en grados Celsius (°C). Indicador principal para detectar anomalías térmicas según ISO 18434-1.

- **Patrón de distribución térmica:** Configuración espacial de temperatura en superficie del componente. Patrones uniformes indican operación normal; patrones localizados indican anomalías.
- **Punto caliente (hot spot):** Zona localizada con temperatura significativamente superior a la del entorno circundante. Indica concentración anormal de calor asociada a resistencia eléctrica, fricción o desbalance.
- **Severidad unificada:** Clasificación en cuatro niveles (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO) que integra gradiente térmico con criticidad del componente, facilitando decisiones consistentes de mantenimiento.

Este vocabulario técnico permite interpretar gradientes térmicos, identificar patrones anómalos y clasificar severidad según criterios ISO 18434-1.

5. DESARROLLO

El desarrollo especifica secuencia operativa completa, desde recepción del informe hasta registro documentado. Se estructura en cuatro etapas: preparación, ejecución, verificación y documentación. La preparación identifica información requerida. La ejecución aplica criterios técnicos de clasificación. La verificación valida la coherencia de resultados. La documentación establece trazabilidad formal. Cada etapa contiene pasos enumerados secuencialmente que el planificador ejecuta sin omisiones.

5.1. Preparación

La preparación asegura disponibilidad de información completa antes de iniciar clasificación técnica. El planificador verifica contenido del informe termográfico, identifica componente evaluado y confirma datos suficientes para aplicar criterios normativos.

Paso 1: Recibir informe predictivo

El planificador recibe informe de termografía infrarroja del proveedor vía correo electrónico. El informe contiene identificación del equipo, fecha de inspección,

componentes evaluados, valores de temperatura absoluta y gradientes térmicos medidos, imágenes termográficas y recomendaciones técnicas.

Paso 2: Verificar completitud

El planificador verifica que el informe incluye identificación del componente evaluado, fecha de inspección, valores de temperatura absoluta y gradiente térmico, imagen termográfica del punto evaluado. Si la información está incompleta, contacta al proveedor solicitando aclaración. Si es suficiente, continúa con el paso 3.

Paso 3: Identificar subsistema evaluado

El planificador identifica el componente del mezclador industrial evaluado: motores eléctricos, tableros eléctricos, conexiones eléctricas, rodamientos o sistema hidráulico. Esta identificación permite aplicar criterios técnicos específicos en ejecución.

5.2. Ejecución

La ejecución aplica criterios técnicos normativos establecidos en el diseño del modelo para clasificar la severidad del hallazgo termográfico. El planificador compara gradiente térmico medido contra umbrales ISO 18434-1 según nivel de tensión del componente y determina nivel de severidad unificado. Posteriormente, identifica acción prescrita según la matriz del diseño del modelo y establece plazo de ejecución. Esta secuencia traduce parámetros térmicos en decisiones ejecutables de mantenimiento.

Paso 4: Aplicar criterios de gradiente térmico

El planificador consulta tabla de criterios de severidad termográfica según nivel de tensión del componente evaluado. Para componentes de baja tensión (tableros de control, conexiones de motores), aplica rangos: LEVE (1-9 °C), MEDIO (10-29 °C), SEVERO (30-49 °C), CRÍTICO (50-69 °C), EXTREMO (≥ 70 °C). Para componentes de alta tensión, aplica rangos restrictivos: LEVE (1-5 °C), MEDIO (6-14 °C), SEVERO (15-29 °C), CRÍTICO (30-64 °C), EXTREMO (≥ 65 °C).

Paso 5: Clasificar severidad unificada

El planificador aplica tabla de clasificación unificada de niveles de severidad, traduciendo clasificación termográfica a severidad unificada: LEVE corresponde a

NORMAL, MEDIO a MODERADO, SEVERO a ALTO, CRÍTICO y EXTREMO, ambos a CRÍTICO.

Paso 6: Determinar acción prescrita

El planificador consulta tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad, identificando acción según clasificación: NORMAL requiere continuar monitoreo sin acción adicional; MODERADO, registrar en el Formato D2 y evaluar ajuste de frecuencia; ALTO, completar el Formato D2 coordinando con jefaturas y generar orden de trabajo; CRÍTICO requiere coordinación inmediata y orden prioritaria.

Paso 7: Determinar plazo de ejecución

El planificador consulta tabla de plazos de ejecución refinados según validación de expertos, estableciendo ventanas temporales: NORMAL; sin plazo específico, MODERADO; implementar ajuste en siguiente ciclo, ALTO; coordinación 7 días y ejecución 20 días, CRÍTICO; coordinación 24 horas y ejecución 72 horas. El planificador calcula fecha límite desde recepción del informe.

5.3. Verificación

La verificación confirma coherencia técnica de la clasificación ejecutada y factibilidad operativa de acciones prescritas antes de documentar formalmente. El planificador revisa consistencia entre gradiente térmico medido, nivel de tensión del componente, severidad unificada y acción determinada, corrigiendo inconsistencias detectadas. Posteriormente, evalúa disponibilidad de recursos y capacidades para ejecutar intervención en plazo establecido.

Paso 8: Validar consistencia

El planificador verifica coherencia de la clasificación mediante tres comprobaciones: ¿El gradiente térmico es consistente con el nivel de tensión aplicado?, ¿La severidad unificada refleja apropiadamente el riesgo técnico?, ¿La acción prescrita es proporcional al nivel de severidad? Si detecta inconsistencia, revisa pasos 4-7 y corrige. Si es consistente, procede al paso 9.

Paso 9: Confirmar factibilidad

El planificador evalúa la factibilidad de la acción mediante tres criterios: ¿Existen recursos para ejecutar intervención en plazo establecido? ¿El proveedor puede intensificar frecuencia si es requerido? ¿La intervención está dentro de las capacidades del departamento?

Si es factible, procede a la documentación. Si presenta restricciones, coordina con el jefe de mantenimiento del departamento para ajustar plazo, documentando justificación técnica. El nivel CRÍTICO no admite extensión de plazo.

5.4. Documentación

La documentación registra formalmente el hallazgo procesado, genera órdenes de trabajo cuando la severidad requiere intervención y establece trazabilidad con sistemas de gestión. El planificador completa formato de retroalimentación consolidando clasificación ejecutada y genera orden de trabajo según nivel determinado.

Paso 10: Completar Formato D2

El planificador completa el Formato D2 del Anexo F registrando fecha de inspección y componente evaluado, gradiente térmico medido y criterio aplicado, severidad unificada y acción prescrita, plazo de ejecución y responsable. La sección de seguimiento incluye campos para fecha de intervención y resultado obtenido, completándose posteriormente tras ejecutar acción correctiva.

Paso 11: Generar orden de trabajo cuando aplica

Si severidad es ALTO, el planificador coordina con jefaturas en máximo 7 días hábiles y genera orden de trabajo con plazo de ejecución de 20 días hábiles. Si severidad es CRÍTICO, coordina en 24 horas y genera orden prioritaria con ejecución en 72 horas. El código de orden se registra en formato estableciendo trazabilidad. Si la severidad es NORMAL o MODERADA, no genera orden de trabajo.

6. REGISTROS

El procedimiento genera registros que documentan la gestión del hallazgo termográfico y establecen trazabilidad con acciones ejecutadas. La Tabla 44 detalla registros generados, responsable de archivo y tiempo de retención:

Tabla 44

Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos termográficos.

Registro	Responsable	Retención
Formato D2 (Anexo F)	Planificador	5 años
Orden de trabajo	Planificador	Indefinido
Informe predictivo original	Planificador	5 años

Nota: La Tabla 44, presenta la retención según requisitos ISO 14224 para históricos de mantenimiento.

El Formato D2 documenta el hallazgo térmico completo, la orden correctiva vincula intervenciones con SAP PM y el informe original respalda la clasificación ejecutada.

7. ANEXOS

El procedimiento referencia documentos que establecen criterios técnicos, matriz prescriptiva y formatos de retroalimentación. Los siguientes anexos constituyen base técnica para la ejecución:

- Tabla de criterios de severidad termográfica para componentes de baja tensión.
- Tabla de criterios de severidad termográfica para componentes de alta tensión.
- Tabla de clasificación operacional de prioridades de mantenimiento.
- Tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.
- Tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad.
- Tabla de plazos de ejecución refinados según validación de expertos.
- Formato D2 (Anexo F): Retroalimentación de termografía infrarroja.

El tercer procedimiento aborda análisis tribológico, completando el diagnóstico predictivo mediante evaluación de degradación y contaminación en lubricantes de sistemas hidráulicos y reductores.

5.3.1.3. Procedimiento para gestión de hallazgos de análisis tribológico

El análisis tribológico de aceite lubricante detecta degradación química y contaminación mecánica en sistemas hidráulicos y de transmisión del mezclador industrial mediante

evaluación de parámetros físico-químicos del lubricante. La Fase 2 estableció criterios de laboratorio que definen umbrales cuantitativos para clasificar la condición del aceite en tres niveles diferenciados según viscosidad, oxidación y concentración de elementos metálicos. El presente procedimiento especifica cómo aplicar estos criterios para traducir valores medidos en informes técnicos a decisiones ejecutables de mantenimiento, estableciendo secuencia operativa desde recepción del informe hasta registro documentado.

El procedimiento aplica la estructura estandarizada, incorporando criterios específicos de laboratorio para viscosidad, oxidación y elementos metálicos según el tipo de sistema lubricado.

Código: POE-MIXER-TRIB-003

Versión: 1.0

Fecha: Diciembre 2024

Área: Departamento de Mantenimiento

Equipo: Mezclador industrial

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para procesar informes de análisis tribológico del mezclador industrial, clasificar hallazgos según criterios de laboratorio, determinar acciones según severidad detectada y documentar el ciclo completo desde detección hasta retroalimentación al plan de mantenimiento preventivo.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica a:

- Informes de análisis tribológico recibidos del proveedor externo.
- Sistemas lubricados del mezclador industrial: sistema hidráulico, reductores.
- Parámetros evaluados: viscosidad cinemática, oxidación, concentración de elementos metálicos.
- Clasificación en cuatro niveles: NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO.

Este procedimiento NO incluye:

- Ejecución de muestreo de aceite (responsabilidad proveedor externo).
- Análisis de laboratorio (responsabilidad proveedor externo).
- Ejecución de intervenciones correctivas (responsabilidad jefaturas mantenimiento).

3. RESPONSABLES

Los cuatro roles del ciclo de gestión se mantienen consistentes con procedimientos anteriores, adaptando responsabilidades a la técnica tribológica. La Tabla 45 detalla funciones específicas:

Tabla 45

Responsabilidades por cargo en procedimiento de gestión de hallazgos tribológicos.

Cargo	Responsabilidad
Planificador	<ul style="list-style-type: none"> - Recibir y procesar informe predictivo. - Aplicar criterios técnicos de clasificación. - Determinar severidad unificada y acción prescrita. - Completar Formato de retroalimentación. - Coordinar con jefaturas según plazo establecido. - Generar orden de trabajo cuando aplica.
Jefe de mantenimiento del departamento	<ul style="list-style-type: none"> - Autorizar ajustes de frecuencias. - Aprobar órdenes de trabajo correctivas. - Asignar recursos para niveles ALTO y CRÍTICO.
Jefe de mantenimiento (supervisión)	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinar intervenciones urgentes. - Supervisar ejecución de acciones correctivas. - Reportar resultados al planificador.
Proveedor externo	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar mediciones según programación. - Entregar informe de laboratorio. - Ejecutar análisis de verificación.

Nota: La Tabla 45, presenta las responsabilidades definidas según organigrama departamental y flujo de información establecido en Fase 2.

Esta estructura de responsabilidades cierra el conjunto de técnicas predictivas con roles consistentes que facilitan la coordinación interdepartamental.

4. DEFINICIONES

La interpretación técnica del procedimiento requiere comprensión de términos especializados del análisis tribológico y clasificación de severidad. Las siguientes definiciones establecen vocabulario común para ejecutar el procedimiento consistentemente:

- **Viscosidad cinemática:** Resistencia del aceite al flujo medida en centistokes [cSt]. Parámetro fundamental que indica capacidad lubricante y grado de degradación térmica.
- **Oxidación:** Degradación química del aceite por reacción con oxígeno, medida en absorbancia por centímetro [Abs/cm]. Indicador de envejecimiento del lubricante.
- **Concentración de elementos metálicos:** Cantidad de partículas metálicas suspendidas en aceite, expresada en partes por millón [ppm]. Indicador de desgaste mecánico de componentes.
- **Contaminación:** Presencia de agua, partículas sólidas o productos de degradación que comprometen la función lubricante del aceite.
- **Severidad unificada:** Clasificación en cuatro niveles (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO) que integra evaluación físico-química del aceite, facilitando decisiones consistentes de mantenimiento.

Este vocabulario técnico permite evaluar la condición del lubricante, identificar degradación o contaminación y determinar acciones según parámetros físico-químicos.

5. DESARROLLO

El desarrollo especifica secuencia operativa completa desde recepción del informe hasta registro documentado. Se estructura en cuatro etapas: preparación, ejecución, verificación y documentación. La preparación identifica información requerida. La ejecución aplica criterios técnicos de clasificación. La verificación valida la coherencia de resultados. La documentación establece trazabilidad formal. Cada etapa contiene pasos enumerados secuencialmente que el planificador ejecuta sin omisiones.

5.1. Preparación

La preparación asegura disponibilidad de información completa antes de iniciar clasificación técnica. El planificador verifica contenido del informe de laboratorio, identifica sistema lubricado evaluado y confirma datos suficientes para aplicar criterios normativos.

Paso 1: Recibir informe predictivo

El planificador recibe informe de análisis tribológico del proveedor vía correo electrónico. El informe contiene identificación del equipo, fecha de muestreo, grado ISO del aceite, viscosidad cinemática medida, oxidación, concentración de elementos metálicos y diagnóstico de laboratorio.

Paso 2: Verificar completitud

El planificador verifica que el informe incluye identificación del sistema lubricado, fecha de muestreo, grado ISO del aceite, viscosidad cinemática en (cSt), oxidación en (Abs/cm), concentración de elementos metálicos en ppm. Si la información está incompleta, contacta al proveedor solicitando aclaración. Si es suficiente, continúa con el paso 3.

Paso 3: Identificar subsistema evaluado

El planificador identifica el sistema lubricado del mezclador industrial evaluado: unidad hidráulica principal (ISO 46), reductores (ISO 220, ISO 460) o sistema de transmisión. Esta identificación permite aplicar criterios técnicos específicos en ejecución.

5.2. Ejecución

La ejecución aplica criterios del laboratorio establecidos para clasificar severidad del hallazgo tribológico. El planificador compara parámetros físico-químicos medidos contra umbrales establecidos, determina nivel de severidad unificado y establece acción prescrita con plazo de ejecución. Esta secuencia traduce parámetros de aceite en decisiones ejecutables de mantenimiento.

Paso 4: Aplicar criterios físico-químicos

El planificador evalúa tres categorías de parámetros. Para viscosidad, consulta tabla de criterios de viscosidad cinemática, verificando que el valor medido esté dentro de rango $\pm 15\%$ del grado nominal ISO del aceite. Para oxidación, verifica límites: Normal (< 18 Abs/cm), Precaución (≥ 18 Abs/cm), Anormal (≥ 22 Abs/cm). Para elementos metálicos, consulta tabla de concentración según tipo de sistema: engranajes o hidráulico, verificando límites de hierro, cobre, cromo, aluminio, plomo y estaño expresados en ppm.

Paso 5: Clasificar severidad unificada

El planificador aplica tabla de clasificación unificada de niveles de severidad, traduciendo clasificación tribológica a severidad unificada: Normal corresponde a NORMAL, Precaución a MODERADO, Anormal a ALTO. El análisis tribológico no genera nivel CRÍTICO según la tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.

Paso 6: Determinar acción prescrita

El planificador consulta tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad, identificando acción según clasificación: NORMAL, requiere continuar monitoreo sin acción adicional; MODERADO, registrar en Formato D3 y evaluar ajuste de frecuencia; ALTO, completar Formato D3 coordinando con jefaturas y generar orden de trabajo.

Paso 7: Determinar plazo de ejecución

El planificador consulta tabla de plazos de ejecución refinados según validación de expertos, estableciendo ventanas temporales: NORMAL, sin plazo específico; MODERADO, implementar ajuste en siguiente ciclo; ALTO, coordinación 7 días y ejecución 20 días. El planificador calcula fecha límite desde recepción del informe.

5.3. Verificación

La verificación confirma coherencia técnica de la clasificación ejecutada y factibilidad operativa de acciones prescritas antes de documentar formalmente. El planificador revisa consistencia entre parámetros medidos, criterios aplicados, severidad unificada y acción determinada, corrigiendo inconsistencias detectadas. Posteriormente, evalúa disponibilidad de recursos y capacidades para ejecutar intervención en plazo establecido.

Paso 8: Validar consistencia

El planificador verifica coherencia de la clasificación mediante tres comprobaciones: ¿Los parámetros físico-químicos son consistentes con los criterios aplicados?, ¿La severidad unificada refleja apropiadamente el riesgo técnico?, ¿La acción prescrita es proporcional al nivel de severidad? Si detecta inconsistencia, revisa pasos 4-7 y

corrige. Si es consistente, procede a paso 9.

Paso 9: Confirmar factibilidad

El planificador evalúa la factibilidad de la acción mediante tres criterios: ¿Existen recursos para ejecutar intervención en plazo establecido? ¿El proveedor puede intensificar la frecuencia si es requerido? ¿La intervención está dentro de las capacidades del departamento?

Si es factible, procede a la documentación. Si presenta restricciones, coordina con el jefe de mantenimiento del departamento para ajustar el plazo, documentando con la justificación técnica.

5.4. Documentación

La documentación registra formalmente el hallazgo procesado, genera órdenes de trabajo cuando la severidad requiere intervención y establece trazabilidad con sistemas de gestión. El planificador completa formato de retroalimentación consolidando clasificación ejecutada y genera orden de trabajo según nivel determinado.

Paso 10: Completar Formato D3

El planificador completa el Formato D3 del Anexo F registrando fecha de muestreo y sistema evaluado, parámetros físico-químicos medidos y criterios aplicados, severidad unificada y acción prescrita, plazo de ejecución y responsable. La sección de seguimiento incluye campos para fecha de intervención y resultado obtenido, completándose posteriormente tras ejecutar acción correctiva.

Paso 11: Generar orden de trabajo cuando aplica

Si severidad es ALTO, el planificador coordina con jefaturas en máximo 7 días hábiles y genera orden de trabajo código con plazo de ejecución de 20 días hábiles. El código de orden se registra en formato estableciendo trazabilidad. Si la severidad es NORMAL o MODERADA, no genera orden de trabajo.

6. REGISTROS

El procedimiento genera registros que documentan la gestión del hallazgo tribológico y establecen trazabilidad con acciones ejecutadas. La Tabla 46 detalla registros generados, responsable de archivo y tiempo de retención:

Tabla 46

Registros generados por procedimiento de gestión de hallazgos tribológicos.

Registro	Responsable	Retención
Formato D3 (Anexo F)	Planificador	5 años
Orden de trabajo	Planificador	Indefinido
Informe predictivo original	Planificador	5 años

Nota: La Tabla 46, presenta la retención según requisitos ISO 14224 para históricos de mantenimiento.

El Formato D3 documenta parámetros físico-químicos y clasificación del lubricante, mientras el informe de laboratorio preserva análisis detallado del proveedor.

7. ANEXOS

El procedimiento referencia documentos que establecen criterios técnicos, matriz prescriptiva y formatos de retroalimentación. Los siguientes anexos constituyen base técnica para la ejecución:

- Tabla de criterios de viscosidad cinemática.
- Tabla de criterios de degradación química.
- Tabla de criterios de contaminación del lubricante.
- Tabla de criterios de desgaste metálico.
- Tabla de clasificación operacional de prioridades de mantenimiento.
- Tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.
- Tabla de acciones prescriptivas por nivel de severidad.
- Tabla de plazos de ejecución refinados según validación de expertos.
- Formato D3 (Anexo F): Retroalimentación del análisis tribológico.

Los tres procedimientos anteriores gestionan hallazgos por técnica predictiva. El cuarto procedimiento establece cómo ajustar frecuencias de inspección según tendencias detectadas en hallazgos consecutivos.

5.3.1.4. Procedimiento para el ajuste de frecuencia

El ajuste dinámico de frecuencias de inspección permite optimizar recursos de mantenimiento adaptando intervalos según condición real del mezclador industrial. La Fase 2 estableció criterios para modificar frecuencias de inspección basándose en tendencias de hallazgos y niveles de severidad detectados, superando limitaciones del mantenimiento preventivo basado en tiempo fijo. El presente procedimiento especifica cómo evaluar resultados históricos, determinar necesidad de ajuste y modificar frecuencias en plan de mantenimiento, estableciendo secuencia operativa desde análisis de tendencias hasta actualización documentada.

El procedimiento aplica la estructura estandarizada, incorporando criterios específicos para evaluar tendencias y determinar modificaciones de frecuencia en el plan de mantenimiento.

Código: POE-MIXER-AJST-004

Versión: 1.0

Fecha: Diciembre 2024

Área: Departamento de Mantenimiento

Equipo: Mezclador industrial

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para evaluar tendencias de hallazgos predictivos del mezclador industrial, determinar necesidad de ajustar frecuencias de inspección según criterios establecidos y modificar plan de mantenimiento documentando cambios ejecutados.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica a:

- Tres técnicas predictivas: análisis de vibraciones, termografía infrarroja, análisis tribológico.
- Ajustes de frecuencia: semestral a trimestral, anual a semestral, anual a trimestral.

- Reducciones de frecuencia: trimestral a semestral, semestral a anual
- Plan de mantenimiento Excel.

Este procedimiento NO incluye:

- Modificación de frecuencias por cambios operacionales (responsabilidad jefaturas).
- Ajustes de tareas preventivas no predictivas (responsabilidad de planificador con aprobación de jefatura).
- Implementación de nuevas técnicas predictivas (responsabilidad gerencia).

3. RESPONSABLES

La ejecución del procedimiento involucra tres roles diferenciados según responsabilidades específicas en el ciclo de evaluación y ajuste de frecuencias. La Tabla 47 detalla cargo y funciones asignadas en cada etapa del procedimiento:

Tabla 47

Responsabilidades por cargo en procedimiento de ajuste de frecuencias.

Cargo	Responsabilidad
Planificador	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar tendencias de hallazgos. - Aplicar criterios de ajuste de frecuencia. - Implementar incrementos directamente. - Solicitar validación para reducciones. - Modificar plan de mantenimiento Excel. - Documentar ajustes en formatos D1/D2/D3.
Jefe de mantenimiento del departamento	<ul style="list-style-type: none"> - Validar reducciones de frecuencia. - Aprobar modificaciones al plan de mantenimiento. - Confirmar criticidad operacional del subsistema.
Proveedor externo	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar inspecciones según frecuencia ajustada. - Entregar informes según nueva programación.

Nota: La Tabla 47, presenta las responsabilidades definidas según organigrama departamental y la tabla de acciones prescriptivas.

La distribución establece que el planificador ejecuta incrementos directamente, mientras que las reducciones requieren validación adicional, considerando la criticidad operacional del subsistema.

4. DEFINICIONES

La interpretación técnica del procedimiento requiere comprensión de términos especializados para evaluación de tendencias y ajuste de frecuencias. Las siguientes definiciones establecen vocabulario común para ejecutar el procedimiento consistentemente:

- **Tendencia de hallazgos:** Patrón observable mediante análisis de tres inspecciones consecutivas que indica degradación progresiva, estabilidad operacional o mejora de condición.
- **Hallazgo consecutivo:** Detección del mismo nivel de severidad o superior en dos inspecciones sucesivas del mismo subsistema, indicando persistencia de condición anormal.
- **Frecuencia de inspección:** Intervalo temporal entre inspecciones predictivas programadas, expresado en meses. Frecuencias establecidas: trimestral (3 meses), semestral (6 meses), anual (12 meses).
- **Incremento de frecuencia:** Reducción del intervalo temporal entre inspecciones para intensificar el monitoreo. Ejemplos: anual a semestral, semestral a trimestral.
- **Reducción de frecuencia:** Extensión del intervalo temporal entre inspecciones cuando condición estable permite optimizar recursos. Ejemplos: trimestral a semestral, semestral a anual.
- **Condición estable:** Subsistema que presenta tres inspecciones consecutivas en nivel NORMAL (vibraciones P4, termografía LEVE, aceite Normal) sin tendencia de degradación.

Estas definiciones permiten al planificador evaluar tendencias correctamente, aplicar criterios de ajuste y documentar modificaciones sin ambigüedades técnicas.

5. DESARROLLO

El desarrollo especifica secuencia operativa completa, desde evaluación de hallazgos históricos hasta modificación documentada en plan de mantenimiento. Se estructura en cuatro etapas: preparación, ejecución, verificación y documentación. La preparación identifica hallazgos registrados. La ejecución aplica criterios de ajuste de frecuencias establecidos en Fase 2. La verificación valida coherencia de ajuste. La documentación

modifica plan Excel y registra cambio. Cada etapa contiene pasos enumerados secuencialmente que el planificador ejecuta sin omisiones.

5.1. Preparación

La preparación asegura disponibilidad de registros históricos completos antes de evaluar necesidad de ajuste. El planificador localiza formatos de retroalimentación, extrae hallazgos previos del subsistema y confirma datos suficientes para aplicar criterios.

Paso 1: Localizar formatos de retroalimentación

El planificador localiza formatos D1, D2 o D3 (ANEXO F) del subsistema evaluado archivados en carpeta “Mantenimiento predictivo mezclador industrial”. Los formatos contienen hallazgos registrados en inspecciones previas con fecha, severidad clasificada y parámetros medidos.

Paso 2: Extraer hallazgos históricos

El planificador extrae las últimas tres inspecciones documentadas del subsistema, registrando fecha de inspección, severidad clasificada y parámetro medido para cada una. Si existen menos de tres inspecciones documentadas, no procede la evaluación de tendencias.

Paso 3: Identificar frecuencia actual

El planificador consulta plan de mantenimiento Excel, localizando tarea predictiva del subsistema y extrayendo frecuencia programada actual: trimestral, semestral o anual.

5.2. Ejecución

La ejecución aplica criterios de ajuste de frecuencias establecidos en Fase 2, para determinar necesidad de ajustar frecuencia. El planificador evalúa cuatro situaciones que activan modificación y determina nuevo intervalo según código de tarea.

Paso 4: Evaluar situación 1 - Dos hallazgos consecutivos

El planificador verifica si las dos inspecciones más recientes presentan niveles de alerta o superiores. Para vibraciones: P3, P2 o P1. Para termografía: MEDIO, SEVERO, CRÍTICO o EXTREMO. Para aceite: Precaución o Anormal. Si cumple, incrementa frecuencia: vibraciones de semestral a trimestral, termografía de anual a semestral, aceite de anual a semestral. Si no cumple, continúa al paso 5.

Paso 5: Evaluar situación 2 - Tendencia ascendente

El planificador verifica si parámetro medido muestra incremento progresivo en tres inspecciones consecutivas. Para vibraciones, evalúa velocidad RMS; para termografía, gradiente térmico; para aceite, oxidación. Si el incremento es consistente, incrementa la frecuencia según el paso 4. Si no presenta tendencia, continúa al paso 6.

Paso 6: Evaluar situación 3 - Nivel crítico

El planificador verifica si la inspección más reciente presenta nivel crítico. Para vibraciones: P1 o P2. Para termografía: SEVERO, CRÍTICO o EXTREMO. Para aceite: Anormal. Si cumple, incrementa frecuencia directamente a trimestral. Si no cumple, continúa al paso 7.

Paso 7: Evaluar situación 4 - Condición estable

El planificador verifica si tres inspecciones consecutivas presentan condición normal. Para vibraciones: P4. Para termografía: LEVE. Para aceite: Normal. Si cumple, propone reducción de frecuencia: de trimestral a semestral, de semestral a anual. Si no cumple, no modifica frecuencia.

5.3. Verificación

La verificación confirma coherencia del ajuste determinado y valida autorización requerida antes de modificar plan. El planificador revisa consistencia entre situación detectada, criterio aplicado y cambio de frecuencia propuesto. Posteriormente, confirma nivel de autorización según tipo de ajuste.

Paso 8: Validar consistencia del ajuste

El planificador verifica coherencia mediante tres comprobaciones: ¿La situación detectada corresponde a criterios de ajuste de frecuencias? ¿El cambio de frecuencia

es proporcional a severidad o tendencia? ¿El código de tarea y nueva frecuencia son correctos? Si detecta inconsistencia, revisa pasos 4-7 y corrige. Si es consistente, procede al paso 9.

Paso 9: Confirmar autorización

Si el ajuste es incremento de frecuencia (situaciones 1, 2 o 3), el planificador implementa directamente sin aprobación adicional. Si el ajuste es reducción de frecuencia (situación 4), el planificador solicita validación al jefe de mantenimiento del departamento, quien evalúa criticidad operacional del subsistema. Si jefe aprueba, procede a documentación. Si jefe rechaza, mantiene frecuencia actual y registra decisión.

5.4. Documentación

La documentación modifica plan de mantenimiento Excel registrando nueva frecuencia y establece trazabilidad del ajuste ejecutado. El planificador actualiza frecuencia en tarea predictiva y documenta cambio en formato de retroalimentación.

Paso 10: Modificar plan de mantenimiento Excel

El planificador abre archivo plan de mantenimiento Excel, localiza tarea predictiva del subsistema (para vibraciones o para termografía/aceite), modifica campo frecuencia registrando nuevo intervalo: trimestral (3 meses), semestral (6 meses) o anual (12 meses). Guarda archivo con control de cambios registrando fecha y responsable.

Paso 11: Documentar ajuste en formato

El planificador completa la sección de ajuste de frecuencia en formato D1, D2 o D3 registrando fecha de ajuste, frecuencia anterior, frecuencia nueva, situación que activó cambio (1, 2, 3 o 4) y aprobación del jefe si corresponde. El registro establece trazabilidad entre hallazgos detectados y modificación implementada.

6. REGISTROS

El procedimiento genera registros que documentan el ajuste de frecuencia ejecutado y establecen trazabilidad con el plan de mantenimiento. La Tabla 48 detalla registros

generados, responsable de archivo y tiempo de retención:

Tabla 48

Registros generados por procedimiento de ajuste de frecuencias.

Registro	Responsable	Retención
Formato D1/D2/D3 (sección ajuste frecuencia)	Planificador	5 años
Plan de mantenimiento Excel	Planificador	Indefinido
Aprobación del jefe (solo reducciones)	Planificador	5 años

Nota: La Tabla 48, presenta la retención según requisitos ISO 14224 para históricos de mantenimiento.

El registro en formatos D1/D2/D3 documenta justificación del ajuste, el plan Excel refleja la nueva frecuencia operativa y la aprobación del jefe respalda reducciones cuando aplica.

7. ANEXOS

El procedimiento referencia documentos que establecen criterios de ajuste y formatos de retroalimentación. Los siguientes anexos constituyen base técnica para la ejecución:

- Tabla de criterios para ajuste de frecuencias de inspección.
- Tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.
- Plan de mantenimiento Excel.
- Formato D1 (Anexo F): Retroalimentación análisis vibraciones.
- Formato D2 (Anexo F): Retroalimentación de termografía infrarroja.
- Formato D3 (Anexo F): Retroalimentación de análisis tribológico.

El quinto procedimiento verifica efectividad de acciones correctivas. Esta verificación compara parámetros medidos en inspecciones sucesivas del equipo.

5.3.1.5. Procedimiento para la verificación de efectividad

La verificación de efectividad cierra el ciclo de integración, confirmando que acciones correctivas ejecutadas resolvieron anomalía detectada. La Fase 2 estableció procedimiento de verificación mediante comparación de parámetros en inspecciones sucesivas, determinando

si la severidad disminuyó, se mantuvo o aumentó después de la intervención. El presente procedimiento especifica cómo localizar valores históricos, comparar contra nueva medición y documentar resultado de verificación, estableciendo secuencia operativa desde inspección posterior hasta registro de efectividad.

El procedimiento aplica la estructura estandarizada, especificando criterios para comparar parámetros antes y después de la intervención correctiva.

Código: POE-MIXER-VERIF-005

Versión: 1.0

Fecha: Diciembre 2024

Área: Departamento de Mantenimiento

Equipo: Mezclador industrial

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para verificar efectividad de acciones correctivas ejecutadas en el mezclador industrial, comparando parámetros medidos antes y después de intervención, determinar resultado de acción y documentar cierre del ciclo en formatos de retroalimentación.

2. ALCANCE

Este procedimiento aplica a:

- Verificaciones posteriores a acciones correctivas de nivel ALTO y CRÍTICO.
- Tres técnicas predictivas: vibraciones, termografía, aceite
- Formatos D1, D2, D3 con sección seguimiento completada.
- Inspecciones de verificación programadas según plazos.

Este procedimiento NO incluye:

- Verificación de mantenimiento preventivo rutinario (responsabilidad ejecución normal).
- Análisis de fallas complejas (responsabilidad ingeniería de confiabilidad).

- Decisiones sobre intervenciones adicionales (responsabilidad de jefaturas).

3. RESPONSABLES

La ejecución del procedimiento involucra dos roles diferenciados según responsabilidades específicas en el ciclo de verificación. La Tabla 49 detalla cargo y funciones asignadas en cada etapa del procedimiento:

Tabla 49

Responsabilidades por cargo en procedimiento de verificación de efectividad.

Cargo	Responsabilidad
Planificador	<ul style="list-style-type: none"> - Recibir informe de inspección posterior. - Localizar parámetros históricos pre-intervención. - Comparar valores antes y después. - Aplicar criterios normativos a nueva medición. - Determinar resultado de verificación. - Documentar efectividad en formatos D1/D2/D3.
Proveedor externo	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar inspección de verificación. - Medir parámetros del subsistema intervenido. - Entregar informe según nueva programación.

Nota: La Tabla 49, presenta las responsabilidades definidas según tabla de acciones prescriptivas y procedimiento de verificación.

La distribución establece que el planificador ejecuta análisis comparativo y documenta resultado mientras el proveedor externo realiza medición técnica.

4. DEFINICIONES

La interpretación técnica del procedimiento requiere comprensión de términos especializados para verificación de efectividad. Las siguientes definiciones establecen vocabulario común para ejecutar el procedimiento consistentemente:

- **Inspección posterior:** Inspección predictiva programada después de ejecutar acción correctiva, permitiendo medir parámetros del subsistema intervenido para determinar efectividad.

- **Parámetros históricos preintervención:** Valores medidos en inspección donde se detectó anomalía original, registrados en formato de retroalimentación antes de ejecutar corrección.
- **Comparación antes-después:** Proceso de contrastar parámetros históricos preintervención contra parámetros actuales de inspección posterior, aplicando criterios normativos a ambos valores.
- **Resultado de verificación:** Determinación de efectividad clasificada en tres categorías: severidad disminuyó (acción efectiva), severidad se mantiene (acción parcialmente efectiva), severidad aumentó (acción no efectiva).
- **Efectividad de acción:** Confirmación documentada de que acción correctiva ejecutada resolvió anomalía detectada, evidenciada por reducción de severidad en inspección posterior.

Estas definiciones permiten al planificador ejecutar verificación correctamente, determinar efectividad y documentar resultado sin ambigüedades técnicas.

5. DESARROLLO

El desarrollo especifica secuencia operativa completa, desde recepción de informe posterior hasta registro de efectividad. Se estructura en cuatro etapas: preparación, ejecución, verificación y documentación. La preparación localiza valores históricos. La ejecución compara parámetros antes y después. La verificación valida el resultado. La documentación registra efectividad. Cada etapa contiene pasos enumerados secuencialmente que el planificador ejecuta sin omisiones.

5.1. Preparación

La preparación asegura disponibilidad de información completa para ejecutar comparación. El planificador localiza formato de retroalimentación con hallazgo original, extrae valores históricos y recibe informe de inspección posterior.

Paso 1: Localizar formato de retroalimentación original

El planificador localiza formato D1, D2 o D3 donde registró hallazgo que requirió acción correctiva, archivado en carpeta “Mantenimiento predictivo del mezclador

industrial”. El formato contiene fecha de detección, subsistema afectado, parámetros medidos y severidad clasificada antes de intervención.

Paso 2: Extraer parámetros históricos preintervención

El planificador extrae valores registrados en formato: velocidad RMS para vibraciones, gradiente térmico para termografía, viscosidad u oxidación para aceite. Registra fecha de inspección original y severidad clasificada pre-intervención.

Paso 3: Recibir informe de inspección posterior

El planificador recibe informe predictivo de inspección posterior a la corrección, enviado por proveedor Predictiva vía correo electrónico. Verifica qué informe incluye medición del subsistema intervenido con los mismos parámetros evaluados en inspección original.

5.2. Ejecución

La ejecución compara parámetros históricos contra nueva medición aplicando criterios normativos. El planificador extrae valores actuales, clasifica severidad postintervención y determina resultado comparativo.

Paso 4: Extraer parámetros de inspección posterior

El planificador extrae del informe posterior los parámetros medidos en subsistema intervenido: velocidad RMS para vibraciones, gradiente térmico para termografía, viscosidad u oxidación para aceite. Verifica qué parámetro corresponde al evaluado en inspección original.

Paso 5: Aplicar criterios normativos a nueva medición

El planificador aplica criterios técnicos de Fase 2 al valor actual medido. Para vibraciones, consulta la tabla de rangos ISO 10816-3 clasificando P4-P1. Para termografía, consulta la tabla de criterios según tensión, clasificando LEVE-EXTREMO. Para aceite, consulta la tabla de límites de laboratorio clasificando Normal-Anormal. Traduce a severidad unificada según tabla de clasificación unificada de niveles de severidad: NORMAL, MODERADO, ALTO o CRÍTICO.

Paso 6: Comparar severidad antes y después

El planificador compara severidad preintervención contra severidad postintervención. Registra si la severidad disminuyó, se mantuvo igual o aumentó.

Paso 7: Determinar resultado de verificación

El planificador determina efectividad: si severidad disminuyó, acción es efectiva; si severidad se mantiene, acción es parcialmente efectiva; si severidad aumentó, acción no es efectiva.

5.3. Verificación

La verificación confirma coherencia de la comparación ejecutada antes de documentar. El planificador revisa consistencia entre valores extraídos, criterios aplicados y resultado determinado.

Paso 8: Validar consistencia de la comparación

El planificador verifica coherencia mediante tres comprobaciones: ¿Los parámetros extraídos corresponden al mismo subsistema y técnica?, ¿Los criterios normativos aplicados son consistentes con la técnica evaluada?, ¿La comparación antes-después utiliza la misma unidad de medida? Si detecta inconsistencia, revisa pasos 4-7 y corrige. Si es consistente, procede al paso 9.

Paso 9: Confirmar coherencia del resultado

El planificador confirma que el resultado de verificación refleja apropiadamente evidencia: si la severidad disminuyó, el resultado es efectivo; si la severidad se mantiene, el resultado es parcialmente efectivo; si la severidad aumentó, el resultado es no efectivo. Si el resultado es coherente, procede a documentación.

5.4. Documentación

La documentación registra resultado de verificación en formato de retroalimentación estableciendo trazabilidad del cierre del ciclo. El planificador completa columna de seguimiento con parámetros postintervención y archiva formato.

Paso 10: Completar columna resultado siguiente inspección

El planificador completa la columna “Resultado siguiente inspección” en formato D1, D2 o D3, registrando fecha de inspección posterior, parámetro medido postintervención, severidad clasificada postintervención y resultado de verificación: efectiva, parcialmente efectiva o no efectiva.

Paso 11: Archivar formato con ciclo cerrado

El planificador archiva formato completado en carpeta “Mantenimiento predictivo mezclador industrial” con ciclo cerrado documentado desde detección hasta verificación de efectividad.

6. REGISTROS

El procedimiento genera registros que documentan verificación de efectividad ejecutada y establecen trazabilidad del cierre del ciclo. La Tabla 50 detalla registros generados, responsable de archivo y tiempo de retención:

Tabla 50

Registros generados por procedimiento de verificación de efectividad.

Registro	Responsable	Retención
Formato D1/D2/D3 (sección seguimiento completada)	Planificador	5 años
Informe predictivo posterior	Planificador	5 años

Nota: La Tabla 50, presenta la retención según requisitos ISO 14224 para históricos de mantenimiento.

El Formato D1/D2/D3 con sección seguimiento completada documenta el cierre del ciclo, mientras el informe posterior evidencia la condición del equipo tras intervención.

7. ANEXOS

El procedimiento referencia documentos de Fase 2 que establecen criterios técnicos para clasificación y formatos de retroalimentación. Los siguientes anexos constituyen base técnica para la ejecución:

- Tabla de criterios técnicos de vibraciones (Tablas velocidad RMS, aceleración, envolvente ISO 10816-3).

- Tabla de criterios técnicos de termografía (Tabla de gradientes térmicos ISO 18434-1).
- Tabla de criterios técnicos tribológicos (Tablas de viscosidad, oxidación, elementos metálicos).
- Tabla de clasificación unificada de niveles de severidad.
- Tabla de procedimiento de análisis por técnica predictiva.
- Formato D1 (Anexo F): Retroalimentación de análisis de vibraciones.
- Formato D2 (Anexo F): Retroalimentación de termografía infrarroja.
- Formato D3 (Anexo F): Retroalimentación del análisis tribológico.

Los cinco procedimientos operativos desarrollados materializan el modelo de integración mediante instrucciones ejecutables para cada actividad del ciclo predictivo-preventivo. Estos procedimientos requieren formatos normalizados que documenten hallazgos, clasificaciones y acciones prescritas con trazabilidad completa.

5.3.2. Formatos y plantillas

Se desarrolla tres formatos consolidados diferenciados por técnica predictiva: Formato D1 para hallazgos vibratorios, Formato D2 para anomalías termográficas y Formato D3 para resultados tribológicos. Los tres comparten arquitectura normalizada con cinco secciones: identificación del evento, parámetros medidos con criterios aplicados, clasificación con acción prescrita, ajuste de frecuencia y seguimiento de verificación. El planificador completa cada formato extrayendo información del informe predictivo, aplicando criterios de Fase 2 y registrando decisiones con plazos establecidos.

La presentación incluye instructivos que especifican qué registrar en cada campo y dónde obtener la información, seguidos de ejemplos aplicados con casos reales del mezclador industrial.

5.3.2.1. Instructivos de llenado

Los instructivos especifican qué información registrar en cada campo y de qué fuente obtenerla. A continuación, se presenta el instructivo para cada formato. El Formato D1 documenta hallazgos vibratorios aplicando POE-01. La Tabla 51 detalla qué registrar en cada campo de las cinco secciones y dónde obtener la información:

Tabla 51

Instructivo de llenado Formato D1 - Retroalimentación análisis de vibraciones.

Sección	Campo	Qué registrar	Fuente y procedimiento
SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN	Fecha inspección	Fecha ejecución mediciones vibratorias	Extraer del encabezado informe Predictiva.
	Subsistema evaluado	Componente rotativo del mezclador industrial	Motor eléctrico, reductor, acople, ventilador según informe.
	Punto de medición	Ubicación sensor acelerómetro	Nomenclatura: 1V (vertical), 1H (horizontal), 1A (axial).
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS	Parámetro	Magnitud vibratoria evaluada	Velocidad RMS, Aceleración o Envolvente según disponibilidad.
	Valor medido	Magnitud cuantitativa	Extraer columna tabla valores de vibración.
	Unidad	Unidad de medida	mm/s para velocidad RMS, g para aceleración, gE para envolvente.
	Criterio aplicado	Rango normativo comparado	Zona ISO 10816-3 según potencia del equipo.
	Zona/Clasificación	Clasificación proveedor	P4-P1 según estado informe Predictiva.
SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN	Severidad unificada	Nivel integrado cuatro categorías	Aplicar tabla de clasificación unificada: P4→NORMAL, P3→MODERADO, P2→ALTO, P1→CRÍTICO.
	Acción prescrita	Intervención según severidad	Consultar tabla acciones prescriptivas Fase 2 según nivel determinado.
	Plazo de ejecución	Ventana temporal intervención	Aplicar la tabla de plazos refinados Fase 2.
	Responsable	Cargo ejecutor	Planificador para coordinación, jefaturas para autorización, técnicos para ejecución.
SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA	¿Requiere ajuste?	Necesidad modificación frecuencia	Marcar Sí si: 1. Dos hallazgos consecutivos P3/P2/P1, 2. Tres inspecciones con valores ascendentes, 3. Hallazgo P1 o P2. Marcar No si tres inspecciones consecutivas P4.
	Frecuencia actual	Periodicidad vigente plan	Extraer de plan de mantenimiento Excel la tarea correspondiente.
	Frecuencia nueva	Periodicidad propuesta	Incrementar: Anual→Semestral→Trimestral. Reducir: Trimestral→Semestral→Anual. Dejar vacío si no requiere ajuste.
	Criterio aplicado	Justificación técnica ajuste	Documentar situación específica: "Dos consecutivos P3", "Tendencia 2.1→2.8→3.4 mm/s", "Nivel crítico P2", "Normalización 3 consecutivos P4".
	Aprobado por	Autorización modificación	Jefe mantenimiento obligatorio para reducciones, opcional para incrementos.
SECCIÓN E: SEGUIMIENTO	Fecha de ejecución	Fecha real intervención	Registrar cuando técnicos completan trabajo según orden generada.
	Resultado de verificación	Efectividad acción	Efectiva/Parcialmente efectiva/No efectiva.
	Valor postintervención	Parámetro tras corrección	Extraer del informe predictivo posterior, mismo punto.
	Observaciones	Condiciones relevantes	Registrar anomalías reportadas por proveedor o condiciones especiales equipo.

Nota: La Tabla 51, presenta el formato disponible en Anexo F. Campos completados progresivamente según ciclo detección-intervención-verificación.

El instructivo especifica 19 campos distribuidos en las cinco secciones del formato, garantizando captura secuencial de información desde recepción del informe vibratorio hasta

cierre del ciclo mediante verificación de efectividad. Los campos de secciones A, B y C son obligatorios en el momento de procesar el informe predictivo, mientras los campos de sección D se completan solo si se cumplen criterios de ajuste de frecuencia, y los campos de sección E se completan posteriormente tras ejecutar la intervención correctiva. Esta estructura asegura trazabilidad completa del hallazgo sin generar carga administrativa innecesaria cuando la severidad clasificada es NORMAL. Esta arquitectura de cinco secciones se mantiene consistente en los formatos restantes, adaptándose a los parámetros específicos de cada técnica predictiva.

El instructivo para hallazgos vibratorios establece la estructura base que se replica en las técnicas predictivas restantes. La termografía infrarroja evalúa componentes eléctricos mediante gradientes térmicos diferenciados, requiriendo adaptación de campos a parámetros térmicos y clasificación según nivel de tensión del componente inspeccionado. La Tabla 52 detalla el instructivo específico del formato termográfico normalizado.

Tabla 52

Instructivo de llenado Formato D2 - Retroalimentación termografía infrarroja.

Sección	Campo	Qué registrar	Fuente y procedimiento
SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN	Fecha de inspección	Fecha ejecución inspección termográfica	Extraer del encabezado informe Predictiva.
	Componente evaluado	Elemento eléctrico inspeccionado	Identificar en informe: tablero, motor, conexión, componente específico.
	Nivel tensión	Clasificación sistema eléctrico	Alta tensión o Baja tensión según especificación informe.
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS	Parámetro	Magnitud térmica evaluada	Gradiente térmico ΔT (diferencia temperatura componente vs referencia).
	Valor medido	Magnitud cuantitativa gradiente	Extraer columna ΔT tabla valores térmicos informe.
	Unidad	Unidad de medida	$^{\circ}C$ (grados Celsius).
	Criterio aplicado	Rango normativo comparado	Clasificación LEVE-MODERADO-ALTO-EXTREMO.
	Clasificación	Nivel severidad proveedor	LEVE, MEDIO, SEVERO, CRÍTICO, EXTREMO según informe.
SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN	Severidad unificada	Nivel integrado cuatro categorías	Aplicar tabla clasificación unificada: LEVE \rightarrow NORMAL, MEDIO \rightarrow MODERADO, SEVERO \rightarrow ALTO, CRÍTICO/EXTREMO \rightarrow CRÍTICO.
	Acción prescrita	Intervención según severidad	Consultar tabla acciones prescriptivas Fase 2 según nivel determinado.
	Plazo de ejecución	Ventana temporal intervención	Aplicar tabla plazos refinados Fase 2 según severidad.
	Responsable	Cargo ejecutor	Planificador para coordinación, jefaturas para autorización, técnicos para ejecución.

La Tabla 52 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 52.

SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA	¿Requiere ajuste?	Necesidad modificación frecuencia	Marcar Sí si: 1. Dos hallazgos consecutivos MEDIO o superior, 2. Tres inspecciones gradientes ascendentes, 3. Hallazgo SEVERO/CRÍTICO/EXTREMO. No si tres LEVE consecutivos.
	Frecuencia actual	Periodicidad vigente plan	Extraer de plan de mantenimiento Excel la tarea correspondiente.
	Frecuencia nueva	Periodicidad propuesta	Incrementar: Anual → Semestral → Trimestral. Reducir: Trimestral → Semestral → Anual. Vacío si no aplica.
	Criterio aplicado	Justificación técnica ajuste	Documentar: "Dos consecutivos MEDIO", "Tendencia 6 °C → 9 °C → 12 °C", "Nivel SEVERO $\Delta T=35^{\circ}\text{C}$ ", "Normalización 3 LEVE".
	Aprobado por	Autorización modificación	Jefe mantenimiento obligatorio para reducciones, opcional para incrementos.
SECCIÓN E: SEGUIMIENTO	Fecha de ejecución	Fecha real intervención	Registrar cuando técnicos completan trabajo según orden generada.
	Resultado de verificación	Efectividad acción	Efectiva, Parcialmente efectiva o No efectiva según comparación gradientes.
	Valor postintervención	Gradiente tras corrección	Extraer de informe termográfico posterior, mismo componente evaluado.
	Observaciones	Condiciones relevantes	Registrar anomalías térmicas reportadas o patrones identificados.

Nota: La Tabla 52 presenta el formato normalizado presentado en el Anexo F. La clasificación aplica criterios ISO 18434-1 diferenciados por nivel de tensión.

El instructivo termográfico adapta la estructura base incorporando el campo Nivel de Tensión en sección A, determinante para seleccionar umbrales normativos apropiados en sección B. Esta diferenciación técnica distingue componentes de baja tensión con rangos permisivos de gradiente térmico de componentes de alta tensión, donde rangos restrictivos activan severidades superiores ante menores incrementos de temperatura. Los campos restantes mantienen correspondencia funcional con el formato vibratorio, facilitando el aprendizaje progresivo del planificador al aplicar lógica común entre técnicas predictivas.

La termografía documenta anomalías térmicas aplicando criterios ISO 18434-1 diferenciados por nivel de tensión. El análisis tribológico complementa estas técnicas evaluando degradación y contaminación del lubricante mediante parámetros físico-químicos. La Tabla 53 especifica el instructivo del formato tribológico:

Tabla 53

Instructivo de llenado Formato D3 - Retroalimentación análisis tribológico.

Sección	Campo	Qué registrar	Fuente y procedimiento
SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN	Fecha de inspección	Fecha toma muestra aceite	Extraer del encabezado informe laboratorio.
	Equipo evaluado	Sistema lubricado inspeccionado	Reductor extrusora, reductor calandria, cámara mezclado según informe.
	Grado ISO	Clasificación viscosidad aceite	Extraer especificación técnica: ISO VG 320, ISO VG 460, etc.
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS	Parámetro	Propiedad fisi-coquímica evaluada	Viscosidad, oxidación, contenido agua, elementos metálicos (Fe, Cu, Cr, etc.)
	Valor medido	Magnitud cuantitativa	Extraer tabla resultados laboratorio según parámetro específico.
	Unidad	Unidad de medida	cSt (viscosidad), Abs/cm (oxidación), ppm (metales), %vol (agua).
	Criterio aplicado	Límite normativo comparado	Umbral laboratorio específico según grado aceite y equipo.
SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN	Clasificación	Condición aceite proveedor	Normal, Precaución, Anormal según evaluación laboratorio
	Severidad unificada	Nivel integrado cuatro categorías	Aplicar tabla clasificación unificada: Normal → NORMAL, Anormal → MODERADO-ALTO según magnitud.
	Acción prescrita	Intervención según severidad	Consultar tabla acciones prescriptivas Fase 2 según nivel determinado.
	Plazo de ejecución	Ventana temporal intervención	Aplicar tabla plazos refinados Fase 2 según severidad.
SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA	Responsable	Cargo ejecutor	Planificador para coordinación, jefaturas para autorización, técnicos para ejecución.
	¿Requiere ajuste?	Necesidad modificación frecuencia	Marcar Sí si: 1. Dos consecutivos Precaución/Anormal, 2. Tres análisis parámetros ascendentes, 3. Hallazgo Anormal. No si tres Normal consecutivos.
	Frecuencia actual	Periodicidad vigente plan	Extraer de plan de mantenimiento Excel la tarea correspondiente.
	Frecuencia nueva	Periodicidad propuesta	Incrementar: Anual→Semestral→Trimestral. Reducir: Trimestral→Semestral→Anual. Vacío si no aplica.
	Criterio aplicado	Justificación técnica ajuste	Documentar: 'Dos Precaución', 'Oxidación 10→14→17 Abs/cm', 'Anormal Fe=320 ppm', 'Normalización 3 Normal'.
SECCIÓN E: SEGUIMIENTO	Aprobado por	Autorización modificación	Jefe mantenimiento obligatorio para reducciones, opcional para incrementos.
	Fecha de ejecución	Fecha real intervención	Registrar cuando técnicos completan cambio aceite o corrección ejecutada.
	Resultado de verificación	Efectividad acción	Efectiva, Parcialmente efectiva o No efectiva según comparación parámetros.
	Valor postintervención	Parámetro tras corrección	Extraer de informe laboratorio posterior, mismo sistema evaluado.
	Observaciones	Condiciones relevantes	Registrar tendencias degradación o contaminación identificadas por laboratorio.

Nota: La Tabla 53, presenta el formato normalizado presentado en Anexo F. Análisis tribológico no genera severidad CRÍTICA según matriz prescriptiva.

Los instructivos establecen uniformidad en la captura de información, independientemente de la técnica aplicada, manteniendo una arquitectura común que reduce la probabilidad de error durante el registro documentado. Esta consistencia estructural facilita la aplicación práctica mediante casos reales que demuestran uso operativo de los formatos.

5.3.2.2. Ejemplos aplicados

La aplicación práctica de los instructivos requiere demostración mediante casos reales del mezclador industrial. Los ejemplos utilizan datos documentados en informes predictivos de 2024, permitiendo verificar la información presentada.

Se desarrollan tres ejemplos diferenciados por técnica predictiva. Cada ejemplo presenta el contexto del caso con fecha e identificación del equipo, justifica su selección según relevancia operacional, aplica el procedimiento correspondiente paso a paso y muestra el formato completado. Esta estructura permite al personal de la empresa comprender la aplicación operativa sin ambigüedades.

5.3.2.2.1. Ejemplo 1: Hallazgo vibratorio motor reductor extrusora de descarga

El informe del 09/09/2024 registró anomalía vibratoria en el punto 6H del motor reductor extrusora de descarga del mezclador industrial, detectando velocidad RMS de 4.720 mm/s con clasificación de advertencia por el proveedor externo. El equipo opera con potencia de 1500 kW y prioridad P1 dentro del plan de mantenimiento, constituyendo componente crítico del proceso de extrusión.

Este caso permite demostrar la aplicación completa del procedimiento por tres razones: el equipo cuenta con datos técnicos completos para clasificación normativa, el valor detectado se ubica en zona de transición requiriendo análisis riguroso de severidad, y el hallazgo evidencia la necesidad de traducción entre criterios externos e internos mediante el modelo de integración propuesto.

La evaluación inicia identificando los parámetros medidos: velocidad RMS de 4.720 mm/s, aceleración de 0.235 g y envolvente de 0.301 gE en dirección horizontal. La potencia instalada de 1500 kW clasifica el equipo como máquina grande según ISO 10816-3, aplicando umbrales: Zona A menor a 2.3 mm/s, Zona B de 2.3 a 4.5 mm/s, Zona C de 4.5 a 11.2 mm/s y Zona D

superior a 11.2 mm/s.

La velocidad detectada supera el límite de 4.5 mm/s, ubicándose en Zona C, que indica condición insatisfactoria, requiriendo planificación de mantenimiento. Esta zona traduce a severidad ALTO (P2) del modelo unificado, homogenizando la clasificación del proveedor al lenguaje interno prescriptivo. El nivel ALTO prescribe intervención programada con coordinación en 7 días calendario y ejecución en 20 días hábiles desde detección.

Con la clasificación ejecutada, el planificador completa el Formato D1. La Tabla 54 presenta el registro documentado:

Tabla 54

Formato D1 completado: Hallazgo vibratorio motor extrusora.

FORMATO D1: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS VIBRACIONES				
Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos				
Código: FRM-MIXER-D1 Versión: 1.0 Fecha: Diciembre 2024				
SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN				
Fecha inspección	Subsistema evaluado			Punto de medición
09/09/2024	MOTOR REDUCTOR EXTRUSORA (Prioridad P1)			6H (Horizontal)
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS				
Parámetro	Valor medido	Unidad	Criterio aplicado	Zona/Clasificación
Velocidad RMS	4.720	mm/s	ISO 10816-3 máquina grande (>300 kW)	Zona C
Aceleración	0.235	g	Criterios según velocidad rotacional	Bueno
Envolvente	0.301	gE	Criterio por envolvente espectral 0-5 Bien / 5-15 Regular / >15 Mal	Bueno

La Tabla 54 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 54.

SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN				
Severidad unificada	Acción prescrita	Plazo ejecución	Responsable	Observaciones
P2 - ALTO	Intervención programada	20 días hábiles	Mantenimiento Mecánico	Velocidad RMS en Zona C requiere planificación. Equipo potencia 1500 kW, velocidad salida 20 RPM

SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA				
¿Requiere ajuste?	Frecuencia actual	Frecuencia nueva	Criterio aplicado	Aprobado por
Sí	Semestral	Trimestral	Nivel crítico P2 detectado	Pendiente

SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar postintervención)				
Fecha ejecución	Resultado de verificación	Valor postintervención	Observaciones	
Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	

Nota: La Tabla 54 presenta el formato normalizado aplicado al hallazgo del 09/09/2024.

El formato completado establece severidad ALTA (P2) con intervención programada en 20 días hábiles e incremento de frecuencia de semestral a trimestral. El segundo ejemplo aplica el procedimiento termográfico a un hallazgo de severidad diferente.

5.3.2.2.2. Ejemplo 2: Hallazgo termográfico portafusibles absorbedor de gases

El informe del 02/07/2024 detectó anomalía térmica en el portafusibles del tablero del motor absorbedor de gases del mezclador industrial, registrando gradiente térmico de 15.1 °C con clasificación de severidad media por el proveedor externo. La inspección documentó temperatura máxima de 61.5 °C en el borne anómalo comparada contra 46.4 °C en el componente de referencia, bajo condiciones de temperatura ambiente de 15.0 °C.

Este hallazgo demuestra la evaluación de componentes eléctricos de baja tensión, donde el gradiente térmico indica contacto deficiente en conexiones que generan resistencia eléctrica elevada y disipación de calor. El caso ilustra la traducción entre criterios del proveedor y clasificación unificada del modelo, estableciendo las acciones correctivas correspondientes mediante aplicación del procedimiento operativo normalizado.

La evaluación inicia identificando el nivel de tensión del componente. El portafusibles forma parte del tablero de control del motor absorbente, operando en circuitos de baja tensión que alimentan sistemas auxiliares. Esta clasificación determina los umbrales normativos aplicables según lineamientos ISO 18434-1: gradiente de 1 a 9 °C indica severidad leve, 10 a 29 °C severidad media, 30 a 49 °C severa, 50 a 69 °C crítica y superior a 70 °C extrema para componentes de baja tensión.

El gradiente detectado de 15.1 °C se ubica dentro del rango de 10 a 29 °C, clasificando la anomalía como severidad media. Este nivel indica degradación progresiva del contacto eléctrico que permite planificación de la intervención sin constituir riesgo inmediato de falla catastrófica. La traducción al código unificado del modelo convierte la severidad media en nivel MODERADO (P3), homogenizando la clasificación del proveedor al sistema prescriptivo interno.

El nivel MODERADO activa la prescripción de registro en Formato D2 y evaluación de ajuste de frecuencia, implementando ajuste en el siguiente ciclo de inspección sin plazo numérico específico. La acción específica comprende limpieza de conexiones, mejora del contacto entre conectores y bornes, ajuste del torque de tornillos y verificación del balance de carga en las líneas eléctricas. La frecuencia de inspección anual vigente se mantiene sin modificación dado que el hallazgo no cumple criterios de incremento establecidos.

El planificador completa el Formato D2 con la clasificación ejecutada. La Tabla 55 presenta el registro:

Tabla 55

Formato D2 completado: Hallazgo termográfico portafusibles absorbedor.

FORMATO D2: RETROALIMENTACIÓN TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos

Código: FRM-MIXER-D2 | Versión: 1.0 | Fecha: Diciembre 2024

La Tabla 55 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 55.

SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN				
Fecha de inspección	Componente/Tablero evaluado			Nivel de tensión
02/07/2024	Portafusibles - Tablero Motor Absorbedor de Gases mezclador industrial			Baja tensión
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS				
Parámetro	Valor medido	Unidad	Criterio aplicado	Clasificación
Gradiente térmico ΔT	15.1	°C	ISO 18434-1 baja tensión: MEDIO 10-29 °C	MEDIO
Temperatura máxima (Bx1)	61.5	°C	Componente anómalo	-
Temperatura referencia (Bx2)	46.4	°C	Componente normal	-
SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN				
Severidad unificada	Acción prescrita	Plazo ejecución	Responsable	Observaciones
P3 - MODERADO	Registrar en el Formato C2, evaluar ajuste frecuencia.	Siguiente ciclo	Mantenimiento Eléctrico	ΔT 15.1°C indica contacto deficiente. Limpiar conexiones, ajustar torque tornillos, verificar balance de carga.
SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA				
¿Requiere ajuste?	Frecuencia actual	Frecuencia nueva	Criterio aplicado	Aprobado por
No	Anual	-	Hallazgo MEDIO sin cumplir criterios incremento.	-
SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar postintervención)				
Fecha de ejecución	Resultado de verificación	ΔT Postintervención	Observaciones	
Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	

Nota: La Tabla 55 presenta el formato normalizado aplicado al hallazgo del 02/07/2024. Frecuencia anual mantenida sin ajuste.

El formato registra severidad MODERADA (P3) con intervención programable en el siguiente ciclo de inspección, manteniendo frecuencia anual vigente.

El tercer ejemplo ilustra documentación de condición normal, demostrando que el modelo registra tanto anomalías como estados aceptables.

5.3.2.2.3. Ejemplo 3: Análisis tribológico Unidad Hidráulica Principal

El informe del 14/11/2024 evaluó el aceite hidráulico ISO 46 de la Unidad Hidráulica Principal del mezclador industrial, registrando condición normal en todos los parámetros físico-químicos y de desgaste metálico. El laboratorio documentó viscosidad cinemática de 44.3 cSt dentro del rango aceptable de 39.1 a 52.9 cSt, oxidación de 3.6 Abs/cm muy inferior al límite de precaución de 18 Abs/cm, y concentraciones de elementos metálicos por debajo de umbrales establecidos. Este caso demuestra la documentación de análisis tribológico en condición normal, ilustrando que no todo hallazgo predictivo genera acciones correctivas o ajustes de frecuencia. El registro sistemático de condiciones aceptables permite construir historial de tendencias para detección temprana de degradación futura mediante comparación con línea base establecida.

La evaluación verifica parámetros categorizados según función diagnóstica. La viscosidad de 44.3 cSt confirma mantenimiento de propiedades lubricantes dentro del rango $\pm 15\%$ del grado nominal ISO 46. La oxidación de 3.6 Abs/cm indica estabilidad química del lubricante sin degradación térmica significativa. Los elementos de desgaste metálico presentan concentraciones normales: hierro 5 ppm (límite precaución 50 ppm), cobre 14 ppm (límite 51 ppm), cromo 0 ppm (límite 15 ppm), evidenciando ausencia de desgaste acelerado en bombas, válvulas y cilindros hidráulicos.

La clasificación del laboratorio como condición NORMAL traduce a severidad NORMAL (P4) del modelo unificado, determinando que no requiere acción correctiva inmediata. La evaluación confirma que el lubricante mantiene condiciones aceptables para operación continua, recomendando únicamente seguimiento periódico según frecuencia anual vigente. No se identifica tendencia ascendente ni hallazgo crítico que justifique incremento de frecuencia, manteniendo la periodicidad establecida en el plan de mantenimiento.

El planificador completa el Formato D3 con los resultados del análisis. La Tabla 56 presenta el registro:

Tabla 56*Formato D3 Completado: Análisis tribológico Unidad Hidráulica.*

FORMATO D3: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS TRIBOLÓGICO				
Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos				
Código: FRM-MIXER-D3 Versión: 1.0 Fecha: Diciembre 2024				
SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN				
Fecha inspección	Equipo/Sistema lubricado		Tipo de aceite	
14/11/2024	Unidad Hidráulica Principal mezclador industrial		ISO 46	
SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS				
Parámetro	Valor medido	Unidad	Criterio aplicado	Clasificación
Viscosidad 40°C	44.3	cSt	Rango nominal 39.1-52.9 cSt ($\pm 15\%$ ISO 46)	Normal
Oxidación	3.6	Abs/cm	< 18 Normal, 18-22 Precaución, ≥ 22 Anormal	Normal
Hierro (Fe)	5	ppm	< 50 Normal, 50-80 Precaución, ≥ 80 Anormal	Normal
Cobre (Cu)	14	ppm	< 51 Normal, 51-80 Precaución, ≥ 80 Anormal	Normal
Cromo (Cr)	0	ppm	< 15 Normal, 15-20 Precaución, ≥ 20 Anormal	Normal
SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN				
Severidad unificada	Acción prescrita	Plazo ejecución	Responsable	Observaciones
P4 - NORMAL	Seguimiento periódico	Sin plazo	Planificador Mantenimiento	Lubricante en condiciones aceptables. Mantener monitoreo anual.
SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA				
¿Requiere ajuste?	Frecuencia actual	Frecuencia nueva	Criterio aplicado	Aprobado por
No	Anual	-	Condición Normal sin tendencia ascendente.	-

La Tabla 56 continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 56.

SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar post-intervención)			
Fecha ejecución	Resultado verificación	Valores postcambio	Observaciones
No aplica	No aplica	No aplica	Análisis normal sin intervención requerida.

Nota: La Tabla 56 presenta el formato normalizado aplicado a análisis del 14 de noviembre de 2024. Condición normal mantiene frecuencia anual sin modificaciones.

Los tres ejemplos demuestran la aplicación de los formatos normalizados en escenarios diferenciados: hallazgo vibratorio requiriendo intervención programada e incremento de frecuencia, anomalía termográfica con acción programable manteniendo frecuencia vigente y análisis tribológico normal sin acciones correctivas. Esta diversidad ilustra la versatilidad del modelo de integración para documentar tanto condiciones anómalas como normales, estableciendo el registro sistemático necesario para retroalimentación continua entre técnicas predictivas y plan de mantenimiento preventivo. Esta demostración técnica requiere complementarse con verificación práctica que evalúe si el personal operativo puede ejecutar los procedimientos correctamente, sin dificultad ni ambigüedad.

5.3.3. Validación preliminar de usabilidad

Los ejemplos aplicados demuestran el funcionamiento técnico del sistema documental, mientras que la validación de usabilidad evalúa si el personal operativo puede ejecutar los procedimientos correctamente, sin dificultad ni ambigüedad. Esta validación complementa la evaluación técnica del modelo conceptual realizado en Fase 2 mediante entrevistas a expertos, la cual alcanzó consenso de 4.17 sobre 5.0, centrándose ahora en aspectos prácticos de aplicación operativa.

La validación se estructura mediante sesiones controladas con usuarios representativos del departamento de mantenimiento que aplicarán los procedimientos en condiciones reales. El proceso evalúa comprensibilidad de instrucciones, facilidad de completar formatos documentales y capacidad de tomar decisiones correctas mediante criterios establecidos. Los resultados identifican dificultades operativas, errores de interpretación y necesidades de ajuste documental, generando refinamientos que garantizan aplicabilidad práctica de los procedimientos antes del despliegue formal.

El diseño de validación comprende metodología, criterios de evaluación y estructura de sesiones.

5.3.3.1. Diseño de validación

5.3.3.1.1. Metodología de validación

La validación emplea observación directa de usuarios durante la ejecución de procedimientos, complementada con análisis de tareas para identificar dificultades prácticas. La metodología se fundamenta en técnicas de (Parra y Crespo, 2012), para validación de herramientas documentales en contextos industriales, priorizando evaluación operativa sobre aspectos técnicos conceptuales ya validados.

Las sesiones individuales replican condiciones operacionales reales donde cada participante ejecuta procedimientos completos utilizando datos de informes predictivos provistos, evaluando interpretación correcta de informes técnicos, aplicación de criterios normativos y completado de formatos sin errores críticos mediante lectura autónoma.

5.3.3.1.2. Criterios de evaluación de usabilidad

La evaluación cuantifica tres dimensiones operativas según protocolos industriales establecidos. Estas dimensiones permiten identificar fortalezas del diseño documental y aspectos que requieren refinamiento antes de la implementación formal. La Tabla 57 presenta los criterios aplicados:

Tabla 57

Criterios de evaluación de usabilidad.

Dimensión	Descripción	Métrica de éxito
Facilidad de uso	Conteo de errores críticos y menores durante el completado de formatos.	Mayoría de participantes completan sin errores críticos.
Eficiencia de procesos	Tiempo requerido para ejecutar el procedimiento completo.	Tiempo de ejecución dentro del rango esperado para tareas similares.
Curva de aprendizaje	Número de consultas o aclaraciones solicitadas al evaluador.	Comprensión autónoma tras la lectura del procedimiento.

Nota: La Tabla 57, presenta los criterios adaptados de protocolos de validación industrial. Errores críticos: clasificación severidad incorrecta, cálculo erróneo plazos, registro incompleto parámetros. Errores menores: omisión firmas, fechas o información administrativa.

Las tres dimensiones presentadas permiten evaluar integralmente la usabilidad del sistema documental: la facilidad de uso mediante conteo de errores, la eficiencia mediante tiempos de ejecución y la curva de aprendizaje mediante consultas requeridas. Los errores críticos comprometen decisiones técnicas operativas, mientras que los errores menores afectan únicamente aspectos administrativos del registro documental. Esta distinción orienta prioridades de refinamiento, concentrando ajustes en instrucciones que previenen errores con impacto técnico directo.

5.3.3.1.3. Estructura de sesiones de validación

Cada sesión individual sigue protocolo estandarizado, garantizando consistencia evaluativa entre participantes. El protocolo divide la sesión en cuatro etapas secuenciales, capturando comprensión, ejecución y retroalimentación del usuario. La duración total estimada es 45 minutos por participante. La Tabla 58 detalla la estructura:

Tabla 58

Protocolo de sesiones de validación preliminar.

Etapa	Descripción	Duración	Registro
1. Inducción	Explicar propósito sin revelar criterios específicos. Entregar procedimiento impreso e informe predictivo real.	5 min	Hora de inicio
2. Comprensión	Observar lectura del procedimiento sin intervención.	Variable	Tiempo lectura, consultas manifestadas.
3. Ejecución	Observar completado de formato mientras aplica procedimiento.	25-30 min	Dificultades, dudas, errores cometidos.
4. Retroalimentación	Revisar formato completado. Entrevista post-uso capturando mejoras sugeridas.	10 min	Errores críticos/menores, comentarios cualitativos

Nota: La Tabla 58, presenta la duración total estimada 45 minutos por participante. Sesiones ejecutadas en departamento de mantenimiento facilitando acceso a documentación técnica adicional si requerida.

Las sesiones se ejecutan en ubicaciones del departamento de mantenimiento, permitiendo al participante consultar documentación técnica del mezclador industrial si considera necesario durante la validación, replicando condiciones operacionales reales de aplicación de procedimientos.

5.3.3.2. Selección de participantes

La selección identifica personal representativo que aplicará los procedimientos operativos en condiciones reales, diferenciándose de la validación técnica donde participaron supervisores y jefes de mantenimiento. Los participantes deben poseer experiencia directa con informes predictivos del mezclador industrial y ejecutar roles definidos en los procedimientos desarrollados. La composición captura perspectivas diferenciadas entre quien procesa informes y completa formatos documentales, versus quien ejecuta intervenciones correctivas basándose en estos formatos.

Los criterios de selección priorizan la experiencia operativa sobre la jerarquía organizacional, identificando al usuario principal que interactuará con los procedimientos y formatos diseñados. La Tabla 59 presenta el perfil requerido:

Tabla 59

Perfil del planificador para validación preliminar.

Críterio	Descripción
Rol operativo	Planificador de mantenimiento
Experiencia requerida	Procesamiento de informes vibratorios, termográficos y tribológicos. Gestión de programaciones preventivas en plan Excel. Ejecución de ajustes de frecuencias en plan.
Conocimiento técnico	Familiaridad con técnicas predictivas aplicadas al mezclador industrial. Manejo de taxonomía de equipos. Interpretación de parámetros técnicos en informes.
Perspectiva validada	Usabilidad: comprensión procedimientos, aplicación criterios normativos, completado formatos y ajustes frecuencias.

Nota: La Tabla 59, el presenta Usuario único de procedimientos y formatos desarrollados. Jefes y supervisores validaron viabilidad técnica del modelo en fase previa.

El planificador constituye el usuario principal de los procedimientos y formatos desarrollados, ejecutando clasificación de hallazgos, completado de formatos y coordinación con jefaturas. Su validación evalúa comprensibilidad de instrucciones, aplicabilidad de criterios y facilidad de registro documental.

5.3.3.3. Ejecución de validación

La ejecución valida cinco procedimientos operativos desarrollados, aplicados secuencialmente según flujo de trabajo del planificador. El protocolo estructura sesiones individuales para cada procedimiento, replicando condiciones operacionales reales de procesamiento de informes predictivos. La Tabla 60 estructura la validación por procedimiento:

Tabla 60

Protocolo de validación por procedimiento operativo.

Procedimiento	Materiales provistos	Actividad ejecutada	Observación evaluador
POE-01 Vibraciones	- POE-01 impreso - Reporte de análisis de vibraciones - Formato C1 en blanco - Criterios ISO 10816-3	1. Leer procedimiento completo 2. Extraer parámetros del informe 3. Consultar umbrales ISO 10816-3 4. Clasificar severidad 5. Prescribir acción y plazo 6. Evaluar ajuste frecuencia 7. Completar Formato D1	- Clasificación severidad correcta/incorrecta - Cálculo plazos correcto/erróneo - Completado formato sin omisiones - Tiempo total ejecución
POE-02 Termografía	- POE-02 impreso - Reporte de termografía - Formato D2 en blanco - Criterios ISO 18434-1	1. Leer procedimiento completo 2. Extraer gradiente térmico del informe 3. Consultar umbrales ISO 18434-1 4. Clasificar severidad 5. Prescribir acción y plazo 6. Evaluar ajuste frecuencia 7. Completar Formato D2	- Clasificación severidad correcta/incorrecta - Cálculo plazos correcto/erróneo - Completado formato sin omisiones - Tiempo total ejecución
POE-03 Tribología	- POE-03 impreso - Reporte de análisis de aceites - Formato D3 en blanco - Criterios laboratorio	1. Leer procedimiento completo 2. Extraer parámetros del análisis 3. Consultar umbrales laboratorio 4. Clasificar severidad 5. Prescribir acción y plazo 6. Evaluar ajuste frecuencia 7. Completar Formato D3	- Clasificación severidad correcta/incorrecta - Completado formato sin omisiones - Tiempo total ejecución
POE-04 Ajuste frecuencias	- POE-04 impreso - Formatos D1/D2/D3 completados previamente - Plan mantenimiento Excel	1. Leer procedimiento completo 2. Evaluar criterios ajuste 3. Extraer frecuencia actual de plan Excel 4. Determinar frecuencia nueva 5. Documentar justificación técnica	- Aplicación criterios correcta - Determinación frecuencia apropiada - Tiempo total ejecución
POE-05 Verificación	- POE-05 impreso - Formato D1 completado previamente - Nuevo informe vibratorio post-intervención	1. Leer procedimiento completo 2. Localizar parámetros pre-intervención 3. Comparar con parámetros post-intervención 4. Determinar efectividad corrección 5. Documentar resultado verificación	- Comparación correcta pre/post - Documentación apropiada - Tiempo total ejecución

Nota: La Tabla 60, presenta las sesiones ejecutadas en departamento de mantenimiento. Duración estimada 45 minutos por procedimiento.

La secuencia de cinco procedimientos valida progresivamente capacidades diferenciadas: los tres primeros evalúan clasificación por técnica predictiva, el cuarto evalúa análisis de tendencias y el quinto evalúa comparación antes-después. En la Tabla 61 el evaluador registra observaciones en instrumento estructurado:

Tabla 61

Protocolo de validación por procedimiento operativo.

Sección	Campo	Registro
Identificación	Procedimiento validado (POE-01/02/03/04/05)	
	Formato asociado (D1/D2/D3 o N/A)	
	Fecha sesión	
Comprensión	Tiempo lectura procedimiento (minutos)	
	Consultas durante lectura	
	Términos técnicos confusos identificados	
Ejecución	Tiempo ejecución completa (minutos)	
	Errores críticos: clasificación severidad incorrecta, cálculo plazos erróneo, parámetros omitidos, criterios mal aplicados	
	Errores menores: omisión firmas, fechas, información administrativa	
	Dificultades observadas durante ejecución	
Retroalimentación	Claridad pasos procedimentales	
	Mejoras sugeridas para documentación	
	Observaciones adicionales	
Resultado validación	<input type="checkbox"/> Aprobado sin errores críticos / <input type="checkbox"/> Requiere refinamiento	

Nota: La Tabla 61, presenta el protocolo que debe ser completado por evaluador. Errores críticos comprometen decisión técnica; errores menores afectan registro administrativo.

Las cinco sesiones validan la usabilidad integral del sistema documental desarrollado, capturando comprensibilidad de instrucciones, aplicabilidad de criterios técnicos y completitud de formatos normalizados.

5.3.3.4. Análisis de resultados

La ejecución de validación descrita en la subsección anterior generó tres formatos de retroalimentación completados por el planificador de mantenimiento utilizando informes

predictivos reales del mezclador industrial. El análisis de estos resultados evalúa la precisión de aplicación de los procedimientos operativos mediante comparación directa entre los formatos completados y los reportes originales provistos por los proveedores externos.

La verificación se estructuró comparando cinco aspectos operativos para cada formato: extracción de parámetros del reporte original, clasificación de severidad según criterios normativos de Fase 2, prescripción de acción según matriz prescriptiva, cálculo de plazo de ejecución según plazos refinados y determinación de ajuste de frecuencia según criterios establecidos. Los errores se clasificaron en dos categorías: errores críticos que comprometen decisiones técnicas operativas y errores menores que afectan únicamente aspectos administrativos del registro documental. La Tabla 62 consolida los resultados obtenidos:

Tabla 62

Resultados de validación preliminar por formato evaluado.

Formato	Técnica predictiva	Informe utilizado	Errores críticos	Errores menores	Resultado
D1	Análisis de vibraciones	Reductor Extrusora Izquierdo mezclador industrial.	1	0	Requiere refinamiento
D2	Termografía infrarroja	Reporte N.º 74 Tablero mezclador industrial.	0	0	Aprobado
D3	Análisis tribológico	Unidad Hidráulica Principal mezclador industrial.	0	0	Aprobado

Nota: La Tabla 62, presenta los errores críticos: clasificación severidad incorrecta, cálculo plazos erróneo, parámetros omitidos. Errores menores: omisión firmas, fechas, información administrativa.

El análisis detallado por formato permite identificar fortalezas del diseño documental y aspectos que requieren refinamiento. La Tabla 63 presenta la verificación de aspectos operativos:

Tabla 63*Verificación de aspectos operativos por formato.*

Aspecto evaluado	D1 Vibraciones	D2 Termografía	D3 Tribología
Extracción parámetros	Correcto	Correcto	Correcto
Clasificación severidad	Correcto (P2→ALTO)	Correcto (LEVE→NORMAL)	Correcto (Normal→NORMAL)
Acción prescrita	Coherente con Tabla 34	Coherente con Tabla 34	Coherente con Tabla 34
Plazo ejecución	Error: 31 días registrados	Correcto	No aplica
Ajuste frecuencia	Correcto (Semestral→Trimestral)	Correcto (No requiere)	Correcto (No requiere)

Nota: La Tabla 63, presenta la verificación ejecutada comparando formato completado contra reporte original y criterios establecidos en el diseño del modelo.

- **Dificultad identificada**

La verificación del Formato D1 identificó una discrepancia en el cálculo del plazo de ejecución. El planificador registró intervención programada para el 19 de septiembre de 2025, representando 31 días calendario desde la fecha del informe (19 de agosto de 2025). Los plazos refinados de Fase 2 establecen para severidad ALTA un máximo de 27 días hábiles, compuesto por 7 días hábiles para coordinación con jefaturas y 20 días hábiles para ejecución de orden de trabajo. La diferencia entre días calendario y días hábiles explica parcialmente la discrepancia, aunque el plazo acordado aún excede el límite normativo.

El análisis de causa identificó que el POE-01 no incluye instrucción explícita para contrastar el plazo acordado contra el límite máximo establecido. El planificador aplicó correctamente la clasificación P2→ALTO y coordinó con jefaturas según disponibilidad operacional, pero no verificó que el plazo resultante cumpliera con la restricción normativa del modelo.

- **Ajuste implementado**

El refinamiento del POE-01 incorpora verificación adicional en la etapa correspondiente. La instrucción añadida especifica contrastar el plazo acordado contra el límite máximo según severidad; si el plazo excede el límite, coordinar nuevamente con jefaturas para ajustar dentro de la ventana normativa. Esta verificación previene que compromisos operacionales excedan ventanas temporales definidas por el modelo sin justificación documentada.

- **Limitaciones metodológicas**

La validación preliminar presenta limitaciones derivadas de restricciones operativas durante la ejecución. Los campos de comprensión del instrumento de validación que registran tiempo de lectura del procedimiento, consultas manifestadas durante la lectura y términos técnicos confusos no fueron completados durante la sesión. De igual manera, los campos de retroalimentación cualitativa que capturan claridad de pasos procedimentales, mejoras sugeridas y observaciones adicionales no fueron registrados. Estas limitaciones impiden cuantificar dimensiones de eficiencia y curva de aprendizaje establecidas en los criterios de evaluación de usabilidad.

No obstante, la comparación objetiva entre formatos completados y reportes originales constituye evidencia verificable que permite evaluar la dimensión de facilidad de uso mediante el conteo de errores críticos y menores. Esta verificación documental confirma que el planificador interpretó correctamente los informes técnicos, aplicó criterios normativos de clasificación y completó los campos de los formatos sin omisiones en los tres casos evaluados.

■ **Síntesis de validación**

La validación preliminar demuestra aplicabilidad práctica del sistema documental desarrollado. La extracción de parámetros de los tres reportes alcanzó precisión completa, con todos los valores transcritos según documentación original. La clasificación de severidad aplicó correctamente los criterios normativos, traduciendo clasificaciones del proveedor a niveles unificados del modelo en los tres formatos. Las decisiones de ajuste de frecuencia resultaron coherentes con los criterios establecidos, incrementando frecuencia en el caso de severidad ALTA y manteniendo frecuencia vigente en los casos con severidad NORMAL.

El error identificado en plazo de ejecución representa oportunidad de mejora documental que fortalece robustez del procedimiento sin modificar su estructura fundamental. El refinamiento implementado complementa las instrucciones existentes con verificación de cumplimiento de límites temporales, cerrando la brecha operativa detectada.

La Fase 3 transformó el diseño conceptual de la Fase 2 en herramientas operativas ejecutables por el personal de mantenimiento de la empresa. Los cinco procedimientos operativos estándar desarrollados especifican secuencias de actividades para gestión de hallazgos vibratorios, termográficos y tribológicos, ajuste dinámico de frecuencias de inspección y verificación

de efectividad de acciones correctivas. Los tres formatos de retroalimentación normalizados estructuran el registro documental que establece trazabilidad desde la recepción del informe predictivo hasta el cierre del ciclo de intervención. Los instructivos de llenado y ejemplos aplicados con casos reales del mezclador industrial complementan el sistema documental, facilitando su comprensión y aplicación.

La validación preliminar de usabilidad verificó que el planificador ejecuta correctamente la mayoría de las actividades prescritas, identificando un error crítico en cálculo de plazos que motivó el refinamiento del procedimiento correspondiente. Las limitaciones en registro de tiempos y retroalimentación cualitativa durante la sesión de validación restringen el alcance de las conclusiones a la dimensión de facilidad de uso evaluada mediante errores documentados, sin abarcar dimensiones de eficiencia y curva de aprendizaje previstas en el diseño metodológico.

Los procedimientos, formatos y refinamientos resultantes de esta fase conforman el sistema documental completo del modelo de integración: cinco POE diferenciados por técnica predictiva y tipo de actividad, tres formatos de retroalimentación normalizada y sus respectivos instructivos con ejemplos aplicados a casos reales del mezclador industrial. Este sistema documental se somete a validación teórica formal en la siguiente fase, donde la evaluación retrospectiva aplicará el modelo a eventos históricos para demostrar efectividad mediante indicadores cuantitativos, complementada con validación por panel de expertos y análisis de conformidad con estándares ISO.

5.4. Demostrar efectividad del modelo de integración mediante evaluación retrospectiva de eventos históricos y validación por panel de expertos internos y externos.

El desarrollo de procedimientos operativos transformó el diseño conceptual en herramientas operativas ejecutables por el personal de mantenimiento de la empresa. Los cinco procedimientos operativos estándar y los tres formatos de retroalimentación fueron sometidos a validación preliminar de usabilidad, identificando un error crítico que motivó el refinamiento del POE-01 mediante incorporación de verificación adicional para contraste de plazos. El sistema documental resultante requiere validación teórica formal que demuestre efectividad del modelo propuesto.

La presente fase ejecuta esta validación mediante cuatro componentes complementarios.

La evaluación retrospectiva aplica el modelo a eventos correctivos históricos del mezclador industrial donde existió detección predictiva previa, cuantificando beneficio potencial mediante indicadores de efectividad. La validación por panel de expertos evalúa coherencia técnica y viabilidad operativa desde perspectivas organizacionales diversas, incorporando profesionales internos de la empresa y externos de otras organizaciones industriales. El análisis comparativo verifica la alineación del modelo con estándares internacionales ISO aplicables a mantenimiento predictivo. La consolidación integra resultados de las validaciones ejecutadas durante el desarrollo del proyecto para establecer el grado de validación alcanzado por el modelo completo.

La Figura 21 sintetiza el proceso de validación teórica y sus resultados.

Figura 21

Resumen gráfico de la validación teórica.



Nota: La Figura 21 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

5.4.1. Evaluación retrospectiva

El diseño del modelo incluyó la metodología de evaluación retrospectiva, estableciendo criterios de selección de eventos, procedimiento de aplicación en cuatro pasos e indicadores de efectividad. Los expertos validaron esta metodología con promedio de 4.25 sobre 5.0,

confirmando apropiación para demostrar efectividad del modelo mediante análisis de casos reales. La presente sección ejecuta dicha metodología aplicando el modelo a eventos correctivos históricos del mezclador industrial donde existió informe predictivo previo sin generar acción preventiva documentada.

La evaluación compara dos escenarios para cada evento: el escenario real donde la falla ocurrió sin integración formal y el escenario hipotético donde el modelo habría prescrito intervención preventiva. Esta comparación cuantifica oportunidades perdidas por ausencia de retroalimentación entre técnicas predictivas y plan de mantenimiento, evidenciando beneficio potencial del modelo propuesto.

5.4.1.1. Selección de eventos históricos

La selección aplica los tres criterios establecidos en el diseño del modelo: disponibilidad de informe predictivo previo, criticidad operacional documentada y registro completo en SAP PM. La revisión cruzó 78 eventos correctivos del período octubre-diciembre 2024 contra los informes predictivos disponibles: vibraciones del 09-11/09/2024, termografía del 01-03/07/2024 y análisis de aceite del 14/11/2024.

El cruce identificó seis eventos con detección predictiva previa. El motor reductor extrusora, clasificado P1 en el informe vibracional, precedió dos eventos correctivos en el subsistema extrusora de descarga. Las anomalías termográficas detectadas en portafusibles del sistema eléctrico de drives precedieron cuatro eventos correctivos en el mismo subsistema. El análisis de aceite no generó eventos seleccionables, puesto que los cinco equipos evaluados presentaron condición NORMAL.

La muestra resultante es inferior al rango de 5-8 eventos objetivo establecido en el diseño metodológico. Esta limitación fue anticipada durante la validación del modelo, donde los expertos señalaron que “SAP PM se encuentra en desarrollo y no se cuenta con muchos informes predictivos previos a eventos correctivos”. El procedimiento diseñado permanece válido independientemente del tamaño muestral, permitiendo cuantificar efectividad con los eventos disponibles.

La caracterización de cada evento requiere documentar fecha de ocurrencia, descripción del fallo, subsistema afectado, técnica predictiva que detectó anomalía previa, fecha de detección,

severidad clasificada y días transcurridos entre detección e intervención correctiva. Esta estructura permite comparar escenario real contra escenario hipotético donde el modelo habría prescrito intervención preventiva. La Tabla 64 presenta los seis eventos seleccionados con sus características:

Tabla 64

Eventos históricos seleccionados para evaluación retrospectiva.

N°	Fecha evento	Descripción	Subsistema	Técnica predictiva	Fecha detección	Severidad detectada	Días transcurridos
1	19/11/2024	Falla sensor llenado	Extrusora de descarga	Vibraciones	09-11/09/2024	P1 (Crítico)	69
2	22/11/2024	Rotas placas	Extrusora de descarga	Vibraciones	09-11/09/2024	P1 (Crítico)	72
3	29/10/2024	Falla el Drive	Sistema eléctrico (drives)	Termografía	01-03/07/2024	MEDIO (ΔT 15.1-22.4°C)	118
4	09/11/2024	Salta drive	Sistema eléctrico (drives)	Termografía	01-03/07/2024	MEDIO (ΔT 15.1-22.4°C)	129
5	19/11/2024	Drive en falla	Sistema eléctrico (drives)	Termografía	01-03/07/2024	MEDIO (ΔT 15.1-22.4°C)	139
6	10/12/2024	No arranca falla drive	Sistema eléctrico (drives)	Termografía	01-03/07/2024	MEDIO (ΔT 15.1-22.4°C)	160

Nota: La Tabla 64, presenta los días transcurridos calculados desde fecha final de inspección predictiva (11/09/2024 para vibraciones, 03/07/2024 para termografía) hasta fecha de evento correctivo. Eventos extraídos de SAP PM del mezclador industrial.

Los eventos presentan características particulares que enriquecen la evaluación. Los eventos 1 y 2 ocurrieron dentro de la ventana P-F esperada para vibraciones (14-84 días), demostrando correlación temporal válida entre detección y falla. Los eventos 3 a 6 excedieron la ventana P-F esperada para termografía (30-90 días), evidenciando que la degradación de componentes eléctricos progresó más lentamente que lo anticipado por la literatura técnica. Esta diversidad permite evaluar la efectividad del modelo en escenarios distintos mediante el procedimiento de aplicación retrospectiva.

5.4.1.2. Aplicación del modelo a casos históricos

El procedimiento ejecuta cuatro pasos secuenciales para cada evento: identificación del hallazgo predictivo, clasificación de severidad según criterios normativos, determinación de acción prescrita por la matriz y cálculo comparativo entre escenario real e hipotético. La aplicación utiliza las tablas del modelo: criterios técnicos ISO 10816-3 e ISO 18434-1, clasificación unificada de severidad y matriz prescriptiva con plazos operacionales refinados.

El informe vibracional del 09-11/09/2024 detectó en el Motor Reductor Extrusora.

valores de aceleración de 6.370 g en punto 3V, clasificando el equipo como prioridad P1 con diagnóstico de golpe interno y fallo potencial de rodamientos. Aplicando el modelo, la severidad P1 corresponde a clasificación unificada CRÍTICO. La matriz prescriptiva establece para este nivel intervención inmediata con plazo de coordinación máximo 24 horas y ejecución máxima 72 horas, totalizando 4 días calendario desde detección hasta intervención completada.

El escenario real registró fallas correctivas a los 69 días (evento 1) y 72 días (evento 2) posteriores a la detección, mientras el escenario hipotético habría ejecutado intervención en máximo 4 días, generando 65 y 68 días recuperables, respectivamente.

El informe termográfico del 01-03/07/2024 presenta comportamiento diferente. Las anomalías detectadas en tres portafusibles del sistema eléctrico de drives alcanzaron severidad MEDIO con gradientes térmicos entre 15.1 °C y 22.4 °C. Aplicando criterios ISO 18434-1 para equipos de baja tensión, esta severidad corresponde a clasificación unificada MODERADO. La matriz prescriptiva establece para este nivel ajuste de frecuencia de inspección sin generación de orden de trabajo correctiva, incrementando de anual a semestral para monitoreo más frecuente.

Los cuatro eventos correctivos ocurrieron entre 118 y 160 días posteriores a la detección, excediendo significativamente la ventana P-F de 30-90 días. El modelo habría prescrito incremento de frecuencia, permitiendo potencialmente detectar progresión de anomalías en inspección posterior, aunque esta intervención indirecta no garantiza prevención de falla. La Tabla 65 consolida los resultados de aplicación retrospectiva.

Tabla 65

Aplicación retrospectiva del modelo a eventos seleccionados.

Evento	Severidad detectada	Clasificación unificada	Acción prescrita	Plazo hipotético	Días reales	Días ganados	Prevenible
1	P1 (Vibraciones)	CRÍTICO	Intervención inmediata	4 días	69 días	65 días	Sí
2	P1 (Vibraciones)	CRÍTICO	Intervención inmediata	4 días	72 días	68 días	Sí
3	MEDIO (Termografía)	MODERADO	Ajuste frecuencia	No genera OT	118 días	N/A	No
4	MEDIO (Termografía)	MODERADO	Ajuste frecuencia	No genera OT	129 días	N/A	No
5	MEDIO (Termografía)	MODERADO	Ajuste frecuencia	No genera OT	139 días	N/A	No
6	MEDIO (Termografía)	MODERADO	Ajuste frecuencia	No genera OT	160 días	N/A	No

Nota: La Tabla 65 presenta los días ganados calculados como diferencia entre días reales y plazo hipotético. Eventos clasificados como prevenibles cuando el modelo prescribe intervención correctiva antes de la falla real.

La aplicación retrospectiva confirma comportamiento distinto según severidad clasificada. Los eventos vibratorios con clasificación CRÍTICO habrían sido prevenidos mediante intervención oportuna, acumulando 133 días recuperables. Los eventos termográficos con clasificación MODERADO no generaron intervención correctiva directa, ya que la severidad detectada no alcanzó umbrales ALTO o CRÍTICO requeridos para activar órdenes de trabajo. Esta diferenciación demuestra que el modelo discrimina apropiadamente entre severidades, prescribiendo acciones proporcionales a la condición detectada.

5.4.1.3. Cálculo de indicadores

Los tres indicadores diseñados en la metodología de evaluación retrospectiva cuantifican la efectividad del modelo. El cálculo utiliza datos derivados de la aplicación retrospectiva, diferenciando eventos prevenibles de aquellos donde el modelo no prescribe intervención correctiva.

- **Indicador 1: Reducción promedio de tiempo de respuesta**

Este indicador mide aceleración de respuesta atribuible al modelo, aplicándose únicamente a eventos donde se prescribe intervención correctiva. De los seis eventos evaluados, solo los eventos 1 y 2 cumplen esta condición al alcanzar severidad CRÍTICO.

$$Reducción = \frac{Promedio[(Díasreales - Díashipotéticos)]}{Promedio[Díasreales]} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$Reducción = \frac{Promedio[(69 - 4) + (72 - 4)]}{Promedio[69 + 72]} \cdot 100\% = \frac{66.5}{70.5} \cdot 100\% = 94.3\% \quad (5)$$

El modelo reduce en un 94.3% el tiempo transcurrido entre detección predictiva e intervención para eventos de severidad CRÍTICO.

■ **Indicador 2: Porcentaje de eventos prevenibles**

Este indicador mide la capacidad preventiva del modelo considerando todos los eventos evaluados. Un evento se clasifica como prevenible cuando la fecha hipotética de intervención es anterior a la fecha real de falla.

$$Eventosprevenibles = \frac{Eventosprevenibles}{Totaleventosevaluados} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$Eventosprevenibles = \frac{2}{6} \cdot 100\% = 33.3\% \quad (7)$$

El modelo habría prevenido 2 de 6 eventos evaluados. Los cuatro eventos restantes no son prevenibles porque la clasificación MODERADO no activa intervención correctiva según matriz prescriptiva.

■ **Indicador 3: Días acumulados recuperables**

Este indicador cuantifica beneficio agregado en días productivos, sumando diferencias positivas entre escenario real e hipotético.

$$Díasrecuperables = \sum(Díasreales - Díashipotéticos) \quad (8)$$

$$Díasrecuperables = (69 - 4) + (72 - 4) = 65 + 68 = 133 \quad (9)$$

El modelo habría recuperado 133 días acumulados mediante intervención oportuna en los dos eventos de severidad CRÍTICO.

La Tabla 66 consolida los indicadores calculados:

Tabla 66

Indicadores de efectividad del modelo.

Indicador	Valor	Interpretación
Reducción promedio tiempo respuesta	94.3%	El modelo acelera intervención de 70.5 días promedio a 4 días.
Porcentaje eventos prevenibles	33.3% (2/6)	Un tercio de eventos habrían sido prevenidos.
Días acumulados recuperables	133 días	Tiempo productivo recuperable con integración formal.

Nota: La Tabla 66, presenta los indicadores calculados según fórmulas establecidas en la metodología de evaluación retrospectiva. La reducción de tiempo aplica solo a eventos con intervención prescrita.

Los indicadores evidencian efectividad condicionada a la severidad detectada. Para eventos CRÍTICOS, el modelo demuestra alta capacidad preventiva con reducción del 94.3% en tiempo de respuesta y 133 días recuperables. Para eventos MODERADOS, el modelo opera correctamente al priorizar ajuste de frecuencia sobre intervención correctiva, evitando acciones innecesarias para anomalías que no ameritan intervención inmediata según criterios normativos. Los resultados requieren representación gráfica que visualice comparativamente ambos escenarios.

5.4.1.4. Representación gráfica comparativa

Los indicadores calculados requieren representación visual que evidencie la diferencia entre escenarios. La metodología de evaluación retrospectiva diseñó una gráfica de líneas comparativas donde el eje horizontal presenta eventos ordenados cronológicamente y el eje vertical muestra días transcurridos desde inspección predictiva hasta intervención. La distancia vertical entre líneas cuantifica días ganados por evento.

La representación aplica únicamente a eventos donde el modelo prescribe intervención correctiva, por lo que la clasificación MODERADO no genera plazo hipotético comparable. Los eventos 1 y 2 cumplen esta condición al alcanzar clasificación CRÍTICO con intervención inmediata prescrita. La Tabla 67 presenta los valores comparativos entre escenarios.

Tabla 67

Comparación de escenarios para eventos con clasificación CRÍTICO.

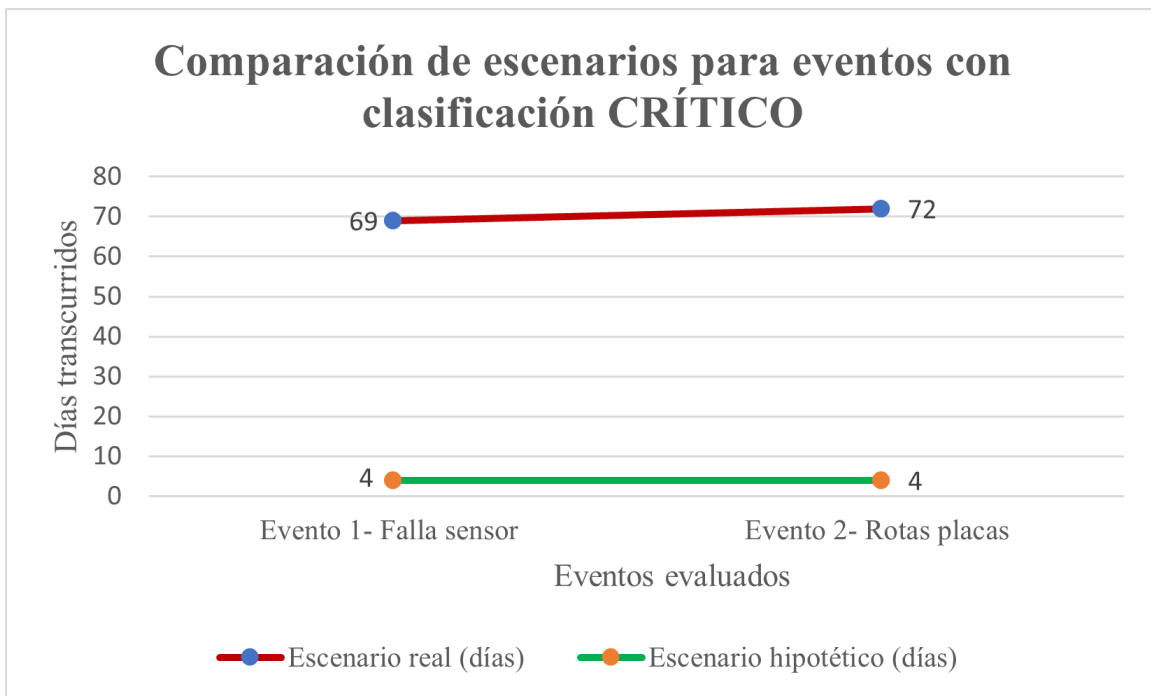
Evento	Escenario Real (días)	Escenario Hipotético (días)	Días ganados
Evento 1 - Falla sensor	69	4	65
Evento 2 - Rotas placas	72	4	68

Nota: La Tabla 67, presenta el escenario real representa días transcurridos hasta falla correctiva. Escenario hipotético representa plazo máximo de intervención prescrito por modelo (coordinación 24h + ejecución 72h = 4 días). Elaboración propia basada en datos de la Tabla 65.

La comparación cuantifica el beneficio potencial del modelo: mientras el escenario real permitió que ambas fallas ocurrieran después de 69 y 72 días respectivamente, el escenario hipotético habría ejecutado intervención preventiva en máximo 4 días calendario, recuperando entre 65 y 68 días de operación segura por evento. Esta diferencia evidencia el valor de la integración formal entre técnicas predictivas y plan preventivo. La Figura 22 visualiza esta diferencia mediante un gráfico de líneas que permite apreciar la magnitud del beneficio potencial.

Figura 22

Comparación de escenarios para eventos con clasificación CRÍTICO.



Nota: En la Figura 22, se observa que la línea roja representa escenario real (días hasta falla correctiva). Línea verde representa escenario hipotético (plazo prescrito por modelo). La distancia vertical entre líneas cuantifica días ganados. Elaboración propia.

La representación gráfica confirma que el modelo habría reducido drásticamente el tiempo de respuesta para ambos eventos. La línea del escenario real se mantiene entre 69 y 72 días, mientras la línea del escenario hipotético permanece constante en 4 días. Esta diferencia visual de aproximadamente 66 días promedio demuestra el beneficio potencial de la integración formal.

Los eventos termográficos (3 a 6) no se incluyen en la representación; por consiguiente, la clasificación MODERADO no genera orden de trabajo con plazo definido. Esta exclusión no constituye limitación metodológica, sino comportamiento correcto del modelo, que reserva intervenciones correctivas para severidades que ameritan acción inmediata según criterios normativos.

La evaluación retrospectiva demuestra efectividad del modelo para eventos donde la severidad detectada activa intervención correctiva. Los 133 días recuperables y la reducción del

94.3% en tiempo de respuesta evidencian un beneficio cuantificable de la integración propuesta. Estos resultados complementan la validación técnica del modelo conceptual y la validación de usabilidad de los procedimientos operativos, requiriendo validación adicional por panel de expertos que evalúe coherencia del modelo desde diversas perspectivas organizacionales.

5.4.2. Validación por panel de expertos

Tras demostrar efectividad cuantitativa mediante los indicadores calculados, el modelo requiere validación cualitativa que evalúe coherencia técnica y viabilidad operativa desde perspectivas organizacionales diversas. El panel de expertos proporciona esta evaluación a través de profesionales internos de la empresa y externos de otras organizaciones industriales.

La validación por panel difiere de la validación del modelo conceptual en alcance y propósito. Aquella validación evaluó el diseño conceptual con cuatro expertos operativos, obteniendo un promedio de 4.17/5.0. La presente validación evalúa el modelo completo, incluyendo procedimientos operativos y formatos desarrollados, e incorpora perspectivas externas que aportan visión independiente.

5.4.2.1. Selección de expertos

La selección configura un panel que representa múltiples niveles jerárquicos y perspectivas funcionales. Los expertos internos aportan conocimiento del contexto operativo de la empresa, mientras los expertos externos aportan visión independiente basada en experiencia en otras organizaciones industriales.

El panel interno comprende cuatro perfiles específicos según posición organizacional. El nivel superior corresponde al Gerente de Mantenimiento, quien evalúa la alineación estratégica del modelo con objetivos departamentales. El nivel central corresponde al Jefe de Mantenimiento, responsable directo del mezclador industrial y usuario principal de las decisiones generadas por el modelo. El nivel operativo corresponde al Programador de Mantenimiento, ejecutor de los procedimientos y formatos desarrollados. El nivel lateral corresponde a la gerente de calidad, quien evalúa el impacto del modelo en áreas interdependientes.

El panel externo comprende dos profesionales de mantenimiento de otras empresas industriales con experiencia en gestión de técnicas predictivas: un Supervisor de Mantenimiento de GRAIMAN y un Superintendente de Mantenimiento de Cartopel SAI. Estos expertos

evalúan el modelo sin sesgos derivados del contexto específico de la empresa manufacturera de neumáticos, aportando perspectiva sobre aplicabilidad en otros entornos operativos. La Tabla 68 presenta la configuración del panel con los datos de cada evaluador.

Tabla 68

Configuración del panel de expertos para validación.

Tipo	Perfil	Cargo	Empresa	Experiencia
Interno	Superior	Gerente de mantenimiento	Empresa manufacturera de neumáticos	30 años
Interno	Centro	Jefe de Mantenimiento del departamento	Empresa manufacturera de neumáticos	22 años
Interno	Operativo	Programador de Mantenimiento	Empresa manufacturera de neumáticos	2 años
Interno	Lateral	Gerente de calidad	Empresa manufacturera de neumáticos	9 años
Externo	Especialista	Supervisor de Mantenimiento	GRAIMAN	12 años
Externo	Especialista	Superintendente de Mantenimiento	Cartopel SAI	38 años

Nota: La Tabla 68, presenta el panel configurado para obtener perspectivas desde múltiples niveles organizacionales. Los seis evaluadores acumulan 113 años de experiencia en mantenimiento industrial.

La configuración garantiza evaluación desde múltiples ángulos: estratégico, operativo, ejecutivo e interdepartamental a nivel interno, complementado con visión externa independiente de profesionales con amplia trayectoria en el sector industrial ecuatoriano. Esta diversidad de perfiles fortalece la validez de los resultados al incorporar perspectivas que abarcan desde la alineación con objetivos organizacionales hasta la aplicabilidad práctica en el contexto operativo del mezclador industrial.

5.4.2.2. Instrumento de validación

La evaluación requiere un instrumento que permita valorar el modelo sin exigir conocimiento previo del proyecto. El instrumento diseñado (ver Anexo G) presenta cada componente mediante descripción de la situación actual, explicación de la propuesta y pregunta de valoración, permitiendo que cualquier evaluador comprenda qué está evaluando antes de emitir su juicio. El instrumento inicia con descripción del modelo que incluye nombre completo, significado de cada término, problema que resuelve, propuesta de solución y componentes

incluidos. Esta introducción proporciona contexto suficiente para evaluadores que no han participado en el desarrollo del proyecto, particularmente los expertos externos de otras organizaciones industriales.

Las preguntas evalúan ocho aspectos del modelo: flujo de trabajo propuesto, clasificación unificada de severidad, plazos de respuesta según urgencia, verificación de efectividad de intervenciones, ajuste dinámico de frecuencias, procedimientos y formatos estandarizados, adaptabilidad a otros equipos y recomendación general de implementación. Cada pregunta utiliza la escala Likert de 5 puntos e incluye espacio para observaciones que capturen sugerencias específicas de mejora.

El instrumento registra datos del evaluador, incluyendo nombre, cargo, empresa, años de experiencia en mantenimiento, fecha y firma. El Anexo G presenta el instrumento completo aplicado a los seis expertos.

5.4.2.3. Ejecución de validación

La ejecución aplica el instrumento diseñado a los seis expertos seleccionados mediante procedimiento estandarizado que garantiza condiciones equivalentes para cada evaluador.

La aplicación inicia con presentación del modelo utilizando la descripción contenida en el Anexo E, que explica nombre del modelo, problema que resuelve, propuesta de solución y componentes incluidos. El evaluador recibe tiempo suficiente para formular preguntas de clarificación antes de proceder con la valoración. Esta etapa inicial asegura comprensión uniforme del modelo, independientemente del conocimiento previo del evaluador.

La valoración procede pregunta por pregunta, permitiendo que el evaluador lea el contexto, comprenda la propuesta específica y emita su calificación en escala de 1 a 5. El evaluador registra observaciones cuando considera necesario aportar sugerencias o comentarios adicionales. El tiempo de aplicación oscila entre 20 y 30 minutos por evaluador. Las entrevistas se ejecutaron entre el 15 y el 16 de enero de 2026.

Los resultados se analizan mediante promedios por pregunta, por evaluador y promedio general. Los promedios iguales o superiores a 4.0 indican validación satisfactoria. Los promedios entre 3.5 y 3.9 señalan aspectos que requieren revisión menor. Los promedios inferiores a 3.5

identifican aspectos que requieren revisión significativa.

5.4.2.4. Resultados

La aplicación del instrumento a los seis expertos generó calificaciones cuantitativas y observaciones cualitativas que permiten evaluar la aceptación del modelo propuesto. La Tabla 69 consolida las calificaciones obtenidas por pregunta y evaluador.

Tabla 69

Resultados consolidados de validación por panel de expertos.

Pregunta	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Evaluador 4	Evaluador 5	Evaluador 6	Promedio
P1. Flujo de trabajo	2	5	4	5	5	4	4.17
P2. Clasificación unificada	5	5	5	5	5	4	4.83
P3. Plazos de respuesta	4	4	5	3	5	3	4.00
P4. Verificación de efectividad	5	5	5	5	5	4	4.83
P5. Ajuste de frecuencias	4	5	5	5	5	5	4.83
P6. Procedimientos y formatos	5	5	5	5	3	5	4.67
P7. Adaptabilidad	4	5	5	5	5	4	4.67
P8. Recomendación	4	5	5	3	5	5	4.50
Promedio evaluador	4.13	4.88	4.88	4.50	4.75	4.25	4.56

Nota: La Tabla 69, presenta la escala Likert 1-5 donde 1=Totalmente en desacuerdo y 5=Totalmente de acuerdo. Evaluadores 1-4 corresponden a personal interno de la Empresa manufacturera de neumáticos; evaluadores 5-6 corresponden a profesionales externos de GRAIMAN y Cartopel SAI respectivamente.

El promedio general alcanza 4.56/5.0, superando el umbral de 4.0 establecido como criterio de validación satisfactoria. Las ocho preguntas obtienen promedios iguales o superiores a 4.0, confirmando consenso en todos los aspectos evaluados. Las preguntas con mayor valoración corresponden a clasificación unificada (4.83), verificación de efectividad (4.83) y ajuste de frecuencias (4.83), indicando que estos componentes resultan particularmente útiles para los profesionales consultados.

La pregunta sobre plazos de respuesta obtiene el promedio más bajo (4.00), aunque permanece dentro del rango de validación satisfactoria. Las observaciones cualitativas explican esta

valoración: el Evaluador 4 señala que el cumplimiento de plazos “depende de la disponibilidad de la máquina, repuestos, personal, producción”, mientras el Evaluador 6 califica con 3 sin registrar observación específica. Estas valoraciones reflejan la realidad operativa donde factores externos condicionan la capacidad de respuesta, sin cuestionar la pertinencia de establecer plazos diferenciados por severidad.

Además de las calificaciones numéricas, los evaluadores registraron observaciones que aportan retroalimentación cualitativa. La Tabla 70 sintetiza estas observaciones categorizadas según tipo de aporte.

Tabla 70

Síntesis de observaciones cualitativas por categoría.

Categoría	Observaciones representativas	Evaluador
Validación del modelo	Es muy importante ya que con esto mejoraría la trazabilidad de la información documental.	Eval 5
	La trazabilidad de las intervenciones y el registro son importantes para tener un historial de cada equipo.	Eval 5
	Es muy recomendable ya que con esto se podría organizar de mejor manera la técnica predictiva.	Eval 5
Condiciones de implementación	Depende de la disponibilidad de la máquina, repuestos, personal, producción.	Eval 4
	El ajuste depende de la capacidad operativa del número de personal de preventivo.	Eval 3
	El modelo es excelente, pero necesita apoyo de administración.	Eval 4
	Depende también de presupuestos.	Eval 4
Sugerencias de mejora	Se debe tener KPIs para medición de resultados	Eval 3
	En el formato de reporte debe existir un espacio llamado 'CAUSA PROBABLE' y otro llamado 'RESULTADOS'	Eval 6
	Se debería realizar una matriz de criticidad.	Eval 6
	El exceso de formatos no es recomendable ya que quita tiempo al personal.	Eval 5
Aclaraciones técnicas	La clasificación de la severidad viene dada del informe del predictivo.	Eval 3
	Las frecuencias de cada técnica predictiva van a depender de la criticidad de cada equipo.	Eval 5

Nota: La Tabla 70, presenta las observaciones textuales extraídas de los instrumentos de validación completados por cada evaluador.

Las observaciones revelan cuatro tipos de aportes específicos. Las validaciones directas confirman la utilidad del modelo para mejorar trazabilidad y organización de técnicas predictivas. Las condiciones de implementación identifican factores organizacionales que inciden en el éxito del modelo sin cuestionar su diseño. Las sugerencias de mejora proponen complementos como KPIs y matriz de criticidad. Las aclaraciones técnicas precisan aspectos operativos del flujo propuesto.

El análisis por tipo de evaluador revela consistencia entre perspectivas internas y externas. Los evaluadores internos promedian 4.60/5.0, mientras los externos alcanzan 4.50/5.0, diferencia de 0.10 puntos que indica valoración equivalente del modelo independientemente del contexto organizacional. Esta convergencia respalda la adaptabilidad del modelo a diferentes entornos industriales.

Los resultados de validación confirman aceptación del modelo por parte del panel de expertos. El promedio general de 4.56/5.0 supera el criterio de validación satisfactoria, y las observaciones cualitativas aportan retroalimentación constructiva que identifica condiciones para implementación efectiva sin invalidar el diseño propuesto.

5.4.3. Análisis comparativo con estándares ISO

Una vez confirmada la aceptación del modelo por el panel de expertos con promedio de 4.56/5.0, resulta necesario verificar su alineación con estándares internacionales reconocidos en ingeniería de mantenimiento.

El análisis compara los componentes del modelo contra requisitos establecidos en cinco normas ISO aplicables: ISO 10816-3 para criterios vibracionales, ISO 18434-1 para criterios termográficos, ISO 17359:2018 para directrices de monitoreo de condición, ISO 13374-2:2004 para arquitectura de procesamiento de datos e ISO 14224:2016 para recopilación de datos de confiabilidad. Esta comparación identifica el grado de conformidad de cada componente del modelo con los requisitos normativos correspondientes.

5.4.3.1. Conformidad de criterios técnicos

Los criterios técnicos del modelo se fundamentan en umbrales cuantitativos derivados de normativas internacionales aplicadas por los proveedores externos de la empresa. La Tabla 71 presenta el análisis de conformidad para cada técnica predictiva.

Tabla 71

Conformidad de criterios técnicos con estándares internacionales.

Componente	Norma de referencia	Requisito normativo	Implementación en el modelo	Conformidad
Criterios vibraciones	ISO 10816-3	Zonas de severidad A-D según velocidad RMS diferenciadas por potencia y tipo de fundación	Adopción de zonas A-D con umbrales específicos para equipos 15-300 kW y >300 kW del mezclador industrial	Conforme
Criterios aceleración	ISO 10816-3	Umbrales diferenciados por velocidad rotacional	Rangos Bueno/Regular/Excedido según rpm (1500-3600, 900-1500, 250-900, <250)	Conforme
Criterios envoltentes	Práctica normativa	Detección de defectos en rodamientos mediante demodulación	Rangos 0-5 gE (Bien), 5-15 gE (Regular), >15 gE (Mal)	Conforme
Criterios termografía	ISO 18434-1	Gradientes térmicos diferenciados por nivel de tensión	Clasificación LEVE-EXTREMO con ΔT específicos para baja/media/alta tensión	Conforme
Criterios tribológicos	Laboratorio acreditado	Límites de viscosidad, oxidación, contaminación y desgaste metálico	Adopción de límites del laboratorio diferenciados por tipo de aceite (ISO 460/220/46)	Conforme

Nota: La Tabla 71, presenta la conformidad evaluada según correspondencia entre requisitos normativos y criterios implementados en el modelo.

Los criterios técnicos del modelo mantienen conformidad total con las normas de referencia. Los umbrales vibracionales replican exactamente las zonas de severidad ISO 10816-3 sin modificación, garantizando trazabilidad normativa. Los criterios termográficos aplican gradientes térmicos según ISO 18434-1, diferenciando umbrales por nivel de tensión del componente eléctrico evaluado. Los criterios tribológicos adoptan límites establecidos por laboratorio acreditado, práctica aceptada cuando normativas internacionales específicas no definen umbrales para el tipo de lubricante analizado.

5.4.3.2. Conformidad del protocolo de integración

El protocolo normativo del modelo establece el flujo de información desde recepción de informes predictivos hasta retroalimentación al plan preventivo. La norma ISO 13374-2:2004

define arquitectura funcional de seis niveles para procesamiento de datos de condición, mientras ISO 17359:2018 establece directrices para decisiones de mantenimiento basadas en monitoreo. La Tabla 72 presenta el análisis de conformidad del protocolo.

Tabla 72

Conformidad del protocolo de integración con arquitectura ISO 13374-2.

Nivel ISO 13374-2	Función	Implementación en el modelo	Conformidad
Nivel 1: Adquisición de datos	Captura de mediciones desde sensores	Recepción de informes técnicos de proveedores externos	Parcial
Nivel 2: Manipulación de datos	Procesamiento y validación de señales	Extracción de parámetros del informe por planificador	Parcial
Nivel 3: Detección de estado	Comparación contra umbrales	Clasificación de severidad mediante criterios normativos	Conforme
Nivel 4: Evaluación de salud	Diagnóstico de condición del activo	Vinculación de hallazgo con subsistema afectado	Conforme
Nivel 5: Pronóstico	Estimación de vida útil remanente	No implementado (requiere datos históricos extensos)	No aplica
Nivel 6: Asesoramiento de decisión	Generación de recomendaciones de acción	Matriz prescriptiva con acciones y plazos por severidad	Conforme

Nota: La Tabla 72, presenta la conformidad parcial en niveles 1-2 porque el modelo procesa informes de proveedores externos, no señales directas de sensores.

El protocolo alcanza conformidad en los niveles críticos para integración predictivo-preventiva: detección de estado (nivel 3), evaluación de salud (nivel 4) y asesoramiento de decisión (nivel 6). La conformidad parcial en niveles 1-2 refleja que la empresa contrata proveedores externos para mediciones, delegando adquisición y manipulación de datos. El nivel 5 (pronóstico) no se implementa porque requiere series históricas extensas que exceden el alcance del presente trabajo de titulación.

5.4.3.3. Conformidad de la matriz prescriptiva

La matriz prescriptiva vincula niveles de severidad con acciones específicas y plazos de ejecución. La norma ISO 17359:2018 establece que las decisiones de mantenimiento predictivo deben variar desde monitoreo en intervalos normales hasta acciones correctivas inmediatas según severidad clasificada. La Tabla 73 presenta el análisis de conformidad.

Tabla 73*Conformidad de acciones prescriptivas con ISO 17359:2018.*

Nivel de severidad	Acción ISO 17359	Acción del modelo	Plazo del modelo	Conformidad
NORMAL	Monitoreo en intervalos normales	Continuar frecuencia establecida	Siguiente inspección programada	Conforme
MODERADO	Incremento de frecuencia de monitoreo	Ajuste de frecuencia de inspección	Implementación en siguiente ciclo	Conforme
ALTO	Acción correctiva planificada	Generación de orden de trabajo	7 días coordinación + 20 días ejecución	Conforme
CRÍTICO	Restricciones operacionales inmediatas	Intervención inmediata	24 horas coordinación + 72 horas ejecución	Conforme

Nota: La Tabla 73, presenta los plazos del modelo refinados según retroalimentación de la validación del modelo conceptual.

La matriz prescriptiva mantiene conformidad total con ISO 17359:2018. Cada nivel de severidad genera la acción correspondiente según directrices normativas: los niveles inferiores permiten programación en ventanas de parada planificada, mientras el nivel crítico demanda respuesta inmediata para prevenir daño al equipo. Los plazos específicos del modelo operacionalizan las directrices generales de la norma según capacidad de respuesta de la empresa.

5.4.3.4. Conformidad de documentación y trazabilidad

La norma ISO 14224:2016 establece requisitos para la recopilación de datos de confiabilidad y mantenimiento, incluyendo taxonomías para clasificación de equipos y procedimientos para documentación consistente. La Tabla 74 presenta el análisis de conformidad de los formatos desarrollados.

Tabla 74*Conformidad de formatos con requisitos ISO 14224:2016.*

Requisito ISO 14224	Descripción	Implementación en formatos	Conformidad
Identificación de equipo	Código único y localización	Campo obligatorio en formatos D1, D2, D3	Conforme
Registro de fecha	Fecha de evento y de registro	Campos de fecha de informe y fecha de registro	Conforme
Identificación de responsable	Personal que ejecuta y registra	Campos de responsable en cada formato	Conforme
Descripción de hallazgo	Detalle técnico del evento	Campo de descripción con parámetros medidos	Conforme
Clasificación de severidad	Categorización normalizada	Campo de nivel unificado (NORMAL a CRÍTICO)	Conforme
Acción ejecutada	Descripción de intervención	Campo de acción prescrita y acción ejecutada	Conforme
Verificación de efectividad	Confirmación de resultado	Formato D3 con comparación antes/después	Conforme

Nota: La Tabla 74, presenta los Formatos D1 (Recepción), D2 (Seguimiento) y D3 (Retroalimentación) desarrollados en la fase de procedimientos operativos.

Los formatos del modelo cumplen requisitos de ISO 14224:2016 para documentación de datos de mantenimiento. Cada formato incluye campos obligatorios de identificación, fechas, responsables y descripción técnica. El formato D3 incorpora verificación de efectividad mediante comparación de condición antes y después de intervención, aspecto que ISO 14224 identifica como necesario para retroalimentación del proceso de mantenimiento.

5.4.3.5. Síntesis de conformidad normativa

El análisis comparativo revela alto grado de alineación entre el modelo propuesto y los estándares internacionales aplicables. La Tabla 75 consolida los resultados de conformidad por componente.

Tabla 75

Síntesis de conformidad normativa del modelo.

Componente del modelo	Normas de referencia	Nivel de conformidad	Observaciones
Criterios técnicos	ISO 10816-3, ISO 18434-1	Conforme	Adopción directa de umbrales normativos
Protocolo de integración	ISO 13374-2	Parcial	Niveles 1-2 delegados a proveedores externos
Matriz prescriptiva	ISO 17359	Conforme	Acciones y plazos según directrices normativas
Formatos de documentación	ISO 14224	Conforme	Campos obligatorios incluidos
Clasificación unificada	ISO 10816-3	Conforme	Estructura de 4 niveles adoptada de zonas A-D

Nota: La Tabla 75, presenta la conformidad parcial del protocolo refleja modelo de contratación externa de servicios predictivos, no deficiencia de diseño.

El modelo alcanza conformidad total en cuatro de cinco componentes evaluados. La conformidad parcial del protocolo de integración responde al contexto operativo de la empresa, donde proveedores externos ejecutan las mediciones predictivas. Esta configuración es práctica común en la industria y no representa incumplimiento normativo, sino adaptación del modelo a la realidad organizacional. Los resultados de conformidad normativa complementan la validación por panel de expertos, confirmando que el modelo no solo resulta útil desde perspectiva operativa, sino que también se alinea con mejores prácticas internacionales en ingeniería de mantenimiento.

5.4.4. Consolidación de validaciones

Habiendo completado la evaluación retrospectiva, la validación por panel de expertos y el análisis de conformidad normativa, corresponde integrar estos resultados con las validaciones ejecutadas en las fases anteriores. El desarrollo del modelo atravesó múltiples instancias de validación distribuidas en tres fases del proyecto. Cada instancia evaluó componentes específicos mediante métodos diferenciados, generando evidencia complementaria sobre coherencia técnica, aplicabilidad operativa y efectividad del modelo propuesto. La presente sección consolida estos resultados para establecer el grado de validación alcanzado por el modelo completo.

5.4.4.1. Síntesis de validaciones ejecutadas

Las validaciones ejecutadas se distribuyen según fase de desarrollo y objeto evaluado. El diseño del modelo fue validado incluyendo criterios técnicos, clasificación unificada y matriz prescriptiva. Los procedimientos operativos fueron validados mediante aplicación por el planificador. La presente fase validó efectividad mediante evaluación retrospectiva, aceptación mediante panel de expertos y alineación mediante análisis de conformidad normativa. La Tabla 76 consolida las cinco instancias de validación ejecutadas.

Tabla 76

Síntesis de conformidad normativa del modelo.

Validación	Objeto evaluado	Método	Participantes	Resultado
Modelo conceptual	Criterios técnicos, clasificación, matriz prescriptiva	Entrevistas estructuradas	4 expertos internos	4.17/5.0
Usabilidad	POE-01 a POE-05, Formatos D1, D2, D3	Sesiones de validación con informes reales	1 planificador	1 error crítico corregido
Retrospectiva	Efectividad del modelo integrado	Aplicación a 6 eventos históricos	N/A (análisis documental)	94.3% reducción tiempo
Panel de expertos	Modelo completo con procedimientos	Instrumento Likert 8 preguntas	6 expertos (4 internos+ 2 externos)	4.56/5.0
Conformidad ISO	Componentes vs normas internacionales	Análisis comparativo	N/A (análisis documental)	4/5 conformes

Nota: La Tabla 76, presenta los resultados extraídos de la validación del modelo conceptual, la validación de usabilidad y las secciones de evaluación retrospectiva, panel de expertos y conformidad ISO. Errores críticos definidos como aquellos que comprometen decisiones técnicas operativas.

Las cinco validaciones cubren dimensiones complementarias del modelo. La validación conceptual confirmó la coherencia técnica de los componentes de diseño. La validación de usabilidad verificó aplicabilidad práctica de los instrumentos operativos. La evaluación retrospectiva cuantificó beneficio potencial mediante indicadores, el panel de expertos evaluó aceptación desde múltiples perspectivas organizacionales y el análisis de conformidad verificó alineación con estándares internacionales.

5.4.4.2. Análisis de convergencia

Los resultados de las cinco validaciones presentan convergencia favorable que respalda la solidez del modelo propuesto. Las dos validaciones cuantitativas mediante escala Likert obtuvieron promedios superiores a 4.0/5.0: el modelo conceptual alcanzó 4.17/5.0 en la validación inicial y el modelo completo alcanzó 4.56/5.0 en la validación por panel de expertos. El incremento de 0.39 puntos entre ambas validaciones indica que la incorporación de procedimientos operativos y formatos mejoró la percepción del modelo por parte de los evaluadores.

La validación de usabilidad identificó un error crítico en el cálculo de plazos durante la aplicación del POE-01, donde el planificador registró 31 días para severidad ALTO contra el límite máximo de 27 días establecido por el modelo. Este hallazgo generó refinamiento del procedimiento mediante incorporación de verificación adicional que contrasta el plazo acordado contra el límite normativo. Los formatos D2 y D3 fueron aprobados sin errores críticos, confirmando la comprensibilidad de las instrucciones para termografía y tribología.

La evaluación retrospectiva demostró capacidad preventiva diferenciada según severidad detectada. Para eventos con clasificación CRÍTICO, el modelo habría reducido el tiempo de respuesta en un 94.3% y recuperado 133 días acumulados. Para eventos con clasificación MODERADO, el modelo prescribió ajuste de frecuencia sin intervención correctiva, comportamiento coherente con los criterios normativos que reservan acciones inmediatas para severidades superiores.

El análisis de conformidad ISO confirmó alineación en cuatro de cinco componentes evaluados. La conformidad parcial del protocolo de integración responde al modelo de contratación externa de servicios predictivos vigente en la empresa, configuración que no representa deficiencia de diseño, sino adaptación a la realidad organizacional.

5.4.4.3. Limitaciones identificadas

Las validaciones ejecutadas presentan limitaciones que deben considerarse en la interpretación de resultados. La validación de usabilidad no completó los campos de comprensión y retroalimentación cualitativa del instrumento, restringiendo el alcance de conclusiones a la dimensión de facilidad de uso evaluada mediante errores documentados. Las dimensiones de eficiencia y curva de aprendizaje previstas en el diseño metodológico no fueron cuantificadas.

La evaluación retrospectiva analizó únicamente seis eventos, muestra inferior al rango de 5-8 eventos objetivo. Esta limitación fue anticipada por los expertos durante la validación del modelo conceptual, quienes señalaron que “SAP PM se encuentra en desarrollo y no se cuenta con muchos informes predictivos previos a eventos correctivos”. Los indicadores calculados son válidos para la muestra disponible, pero requieren verificación con muestras mayores en implementaciones futuras.

El panel de expertos identificó condiciones de implementación que inciden en el éxito del modelo: disponibilidad de recursos, apoyo gerencial y capacidad operativa del personal. Estas condiciones no invalidan el diseño propuesto, pero establecen requisitos organizacionales para implementación efectiva.

5.4.4.4. Conclusión de validación

La consolidación de las cinco instancias de validación confirma que el modelo de integración normativo-prescriptivo cumple los criterios establecidos para demostrar coherencia técnica, aplicabilidad operativa y efectividad potencial. La Tabla 77 presenta la evaluación consolidada por criterio de validación.

Tabla 77

Evaluación consolidada por criterio de validación.

Criterio	Evidencia	Resultado
Coherencia técnica	Validación del diseño del modelo (4.17/5.0), Conformidad ISO (4/5 componentes)	Cumple
Aplicabilidad operativa	Validación usabilidad (2/3 formatos aprobados, 1 error corregido), Panel expertos (4.56/5.0)	Cumple
Efectividad potencial	Evaluación retrospectiva (94.3% reducción, 133 días recuperables)	Cumple
Aceptación organizacional	Panel expertos internos (4.60/5.0), Panel expertos externos (4.50/5.0)	Cumple

Nota: La Tabla 77, presenta el criterio Cumple cuando la evidencia respalda validación satisfactoria según umbrales establecidos ($\geq 4.0/5.0$ para escalas Likert, ausencia de errores críticos no corregidos para usabilidad).

El modelo propuesto ha sido validado mediante métodos complementarios que evalúan distintas dimensiones. Los resultados respaldan su implementación como propuesta que

la empresa puede adaptar según su realidad operativa, considerando las condiciones de implementación identificadas por los expertos y las limitaciones metodológicas documentadas en cada instancia de validación.

5.4.5. Síntesis de validación

La presente fase ejecutó la validación teórica del modelo de integración normativo-prescriptivo mediante tres componentes complementarios: evaluación retrospectiva con eventos históricos, validación por panel de expertos y análisis de conformidad con estándares internacionales.

La evaluación retrospectiva demostró efectividad cuantificable del modelo para eventos donde la severidad detectada activa intervención correctiva. La aplicación a seis eventos históricos del mezclador industrial evidenció reducción del 94.3% en tiempo de respuesta y 133 días acumulados recuperables para los dos eventos con clasificación CRÍTICO. Los cuatro eventos con clasificación MODERADO no generaron intervención correctiva, comportamiento coherente con los criterios normativos que reservan acciones inmediatas para severidades superiores.

La validación por panel de expertos confirmó aceptación del modelo desde múltiples perspectivas organizacionales. El promedio general de 4.56/5.0 superó el umbral de validación satisfactoria, con consenso en los ocho aspectos evaluados. Los evaluadores internos (4.60/5.0) y externos (4.50/5.0) presentaron valoraciones convergentes, respaldando la adaptabilidad del modelo a diferentes entornos industriales. Las observaciones cualitativas aportaron retroalimentación constructiva que identifica condiciones para implementación efectiva sin invalidar el diseño propuesto.

El análisis de conformidad normativa verificó alineación del modelo con estándares internacionales reconocidos. Cuatro de cinco componentes evaluados alcanzaron conformidad total con las normas ISO 10816-3, ISO 18434-1, ISO 17359:2018 e ISO 14224:2016. La conformidad parcial del protocolo de integración con ISO 13374-2:2004 responde al modelo de contratación externa de servicios predictivos, configuración que constituye práctica común en la industria.

La consolidación de validaciones integró cinco instancias ejecutadas durante el desarrollo del proyecto, confirmando cumplimiento de los criterios establecidos para coherencia técnica, aplicabilidad operativa, efectividad potencial y aceptación organizacional. Las limitaciones

identificadas incluyen muestra reducida en evaluación retrospectiva, campos incompletos en validación de usabilidad y condiciones de implementación dependientes de factores organizacionales.

El modelo de integración normativo-prescriptivo ha sido validado teóricamente mediante métodos complementarios que respaldan su propuesta como herramienta que la empresa puede adaptar para formalizar la retroalimentación entre técnicas de mantenimiento predictivo y plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial.

6. Resultados

La presente sección expone los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, organizados según los cuatro objetivos específicos planteados en la metodología. Cada subsección presenta hallazgos concretos respaldados por evidencia documental, estableciendo relación con el fundamento teórico desarrollado en el marco correspondiente. La Figura 23 sintetiza los principales resultados obtenidos en cada objetivo.

Figura 23

Resumen gráfico de los resultados.



Nota: La Figura 23 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

6.1. Resultados del objetivo 1

El diagnóstico del estado actual del plan de mantenimiento y el nivel de integración de las técnicas predictivas implementadas en el mezclador industrial se ejecutó mediante evaluación documental rigurosa y validación operativa con personal clave del departamento de mantenimiento.

La evaluación documental aplicó métricas fundamentadas en ISO 14224 e ISO 13374-2 a los documentos técnicos generados durante la gestión del equipo, organizados en cinco grupos de evaluación. Esta evaluación reveló heterogeneidad significativa en calidad documental: los informes de análisis de aceite y el sistema SAP PM alcanzaron completitud del 100 %, mientras que los informes de vibraciones y termografía presentaron deficiencias con menos del 50% de campos obligatorios según requisitos normativos. El hallazgo más relevante corresponde a la capacidad de integración predictiva, donde cuatro de cinco documentos evaluados obtuvieron calificaciones entre “Nula” y “Baja”, evidenciando que las técnicas predictivas operan como verificaciones periódicas independientes sin mecanismos formales de retroalimentación al plan preventivo.

El análisis de deficiencias documentales permitió identificar cinco categorías de brechas operativas: documentales, referidas a técnicas predictivas independientes sin vinculación operativa; integración sistémica, caracterizada por ausencia de protocolos formales de respuesta a hallazgos; frecuencia y monitoreo, donde los intervalos de inspección permanecen fijos independientemente de la condición real del equipo; conocimiento y trazabilidad, manifestada en recomendaciones genéricas sin umbrales cuantitativos; y normativas y estandarización, evidenciada en desviaciones respecto a requisitos ISO 14224 e ISO 13374-2.

La validación operativa mediante cuestionarios estructurados aplicados al personal clave del departamento confirmó la existencia de las brechas identificadas, aunque con severidad moderada. Los promedios obtenidos oscilaron entre 3.00 y 3.33 en escala Likert, sin alcanzar el umbral de 3.5 establecido para validación completa. Las categorías de integración sistémica y conocimiento/trazabilidad obtuvieron los promedios más altos con 3.27 y 3.33 respectivamente, indicando que el personal operativo percibe estas dimensiones como las más críticas dentro del contexto evaluado.

Estos resultados se alinean con los fundamentos teóricos que establecen que la integración

efectiva requiere marco metodológico científico, herramientas que faciliten implementación práctica y estructura que permita toma de decisiones informada (Mora, 2021). El diagnóstico evidenció ausencia de estas condiciones en el contexto actual del mezclador industrial, estableciendo la línea base técnica que fundamenta el diseño de un modelo de integración.

6.2. Resultados del objetivo 2

Las brechas identificadas en el diagnóstico demandaron el diseño de un modelo que estableciera relaciones formales entre resultados de técnicas predictivas y ajustes al plan de mantenimiento del mezclador industrial. El modelo resultante se estructuró en cuatro componentes interrelacionados.

Los criterios técnicos normativos definieron umbrales cuantitativos para clasificar la severidad de hallazgos según la técnica predictiva aplicada. Para vibraciones mecánicas, se adoptaron rangos de velocidad RMS según zonas de severidad ISO 10816-3, diferenciando umbrales para máquinas medianas de 15-300 kW y máquinas grandes superiores a 300 kW. Los equipos del mezclador industrial incluyen motorreductores de 160 kW que aplican umbrales de la categoría mediana, y el motor reductor extrusora de 1500 kW que aplica umbrales de la categoría grande, determinando los valores límite correspondientes según la tabla normativa. Para termografía infrarroja, se establecieron criterios de gradientes térmicos según ISO 18434-1, con valores específicos para componentes de baja y alta tensión. Para análisis tribológico, se adoptaron criterios del laboratorio externo que clasifican la condición del aceite según viscosidad, oxidación y concentración de elementos metálicos.

La clasificación unificada de severidad integró las escalas diferenciadas de cada técnica en cuatro niveles operacionales: NORMAL, MODERADO, ALTO y CRÍTICO. Esta estructura adopta el marco de ISO 10816-3, que define explícitamente cuatro zonas de severidad con interpretaciones operacionales diferenciadas, permitiendo mapear las escalas de cinco niveles termográficos y tres niveles tribológicos sin perder estados operacionales críticos. El protocolo normativo especificó el flujo de información desde recepción de informes hasta retroalimentación al plan preventivo, incorporando verificación de efectividad posterior a correcciones ejecutadas según retroalimentación de validación.

La matriz prescriptiva vinculó niveles de severidad con acciones específicas, plazos de ejecución y tipos de registro en el sistema de gestión. Los plazos operacionales fueron refinados

según validación con expertos, extendiendo las ventanas temporales para nivel ALTO de 5 a 7 días hábiles para coordinación y de 15 a 20 días hábiles para ejecución, mientras el nivel CRÍTICO mantiene respuesta inmediata con máximo 24 horas para coordinación y 72 horas para ejecución.

La validación del modelo mediante entrevistas semiestructuradas con cuatro expertos del departamento de mantenimiento alcanzó promedio general de 4.17/5.0, superando el umbral de consenso establecido. La coherencia técnica obtuvo 4.50/5.0 y la completitud 4.31/5.0, mientras la factibilidad operativa alcanzó 3.69/5.0, identificando necesidad de ajustes en plazos según capacidad operacional real.

El diseño del modelo responde a los fundamentos teóricos que establecen que un modelo normativo-prescriptivo define cómo debe funcionar el proceso y qué acciones tomar según condición detectada (Lazakis y cols., 2018). La arquitectura adoptada sigue ISO 13374-2 para procesamiento de datos de condición, integrando protocolo normativo, matriz prescriptiva y metodología de validación retrospectiva como componentes fundamentales.

6.3. Resultados del objetivo 3

El modelo diseñado requirió transformación en herramientas prácticas ejecutables por el personal de mantenimiento. Esta transformación se materializó mediante el desarrollo de procedimientos operativos estandarizados y formatos de retroalimentación normalizados.

Se desarrollaron cinco Procedimientos Operativos Estándar diferenciados por tipo de actividad: POE-01 para gestión de hallazgos vibratorios según ISO 10816-3, POE-02 para gestión de hallazgos termográficos según ISO 18434-1, POE-03 para gestión de hallazgos tribológicos según criterios de laboratorio, POE-04 para ajuste de frecuencias de inspección según tendencias detectadas y POE-05 para verificación de efectividad de acciones correctivas mediante comparación de parámetros pre y postintervención. Cada procedimiento se estructuró mediante cuatro componentes: objetivo y alcance, responsables con funciones asignadas, desarrollo de actividades y registros generados con tiempos de retención.

Los tres formatos de retroalimentación normalizados documentan el ciclo completo desde detección hasta cierre de acciones: Formato D1 para análisis de vibraciones, Formato D2 para termografía infrarroja y Formato D3 para análisis tribológico. Cada formato se estructura en

cinco secciones que capturan identificación del equipo, parámetros detectados con clasificación de severidad, acción prescrita con plazos, ajuste de frecuencia si aplica y seguimiento de efectividad.

La validación preliminar de usabilidad ejecutada con el planificador de mantenimiento utilizando informes predictivos reales del mezclador industrial generó resultados diferenciados por formato. Los formatos D2 y D3 fueron aprobados sin errores críticos, confirmando la comprensibilidad de las instrucciones para termografía y tribología. El Formato D1 identificó un error crítico en el cálculo de plazos, donde el planificador registró 31 días calendario para severidad ALTO contra el límite máximo de 27 días hábiles establecido por el modelo. Este hallazgo motivó el refinamiento del POE-01 mediante la incorporación de verificación adicional que contrasta el plazo acordado contra el límite normativo antes de confirmar la programación.

El desarrollo de procedimientos operativos responde al principio teórico que establece que los procedimientos deben proporcionar guías claras sobre cómo interpretar resultados predictivos, traducir hallazgos en acciones apropiadas y documentar el proceso para mejora continua (Márquez y cols., 2021). La validación de usabilidad confirmó que el sistema documental cumple con criterios de facilidad de uso requeridos para implementación efectiva.

6.4. Resultados del objetivo 4

Los procedimientos operativos desarrollados completaron el sistema documental del modelo, requiriendo validación teórica formal que demostrara su efectividad potencial. Esta validación se ejecutó mediante evaluación retrospectiva de eventos históricos, validación por panel de expertos y análisis de conformidad con estándares internacionales.

La evaluación retrospectiva aplicó el modelo a seis eventos correctivos históricos del mezclador industrial donde existió detección predictiva previa sin generar acción preventiva documentada. Los dos eventos vibratorios alcanzaron clasificación CRÍTICO con prioridad P1, habiendo transcurrido 69 y 72 días respectivamente desde la inspección predictiva hasta la falla correctiva. El modelo habría prescrito intervención inmediata con plazo máximo de 4 días, recuperando 65 y 68 días de operación segura por evento. Los cuatro eventos termográficos alcanzaron clasificación MODERADO con nivel MEDIO, donde el modelo prescribe ajuste de frecuencia sin generar orden de trabajo correctiva, comportamiento coherente con criterios normativos que reservan intervenciones inmediatas para severidades superiores.

Los indicadores de efectividad calculados evidenciaron: reducción promedio del 94.3% en tiempo de respuesta para eventos con clasificación CRÍTICO, porcentaje de eventos prevenibles del 33.3% correspondiente a 2 de 6 eventos evaluados y 133 días acumulados recuperables mediante intervención oportuna. Estos indicadores cuantifican el cierre de las brechas de mayor impacto identificadas en el diagnóstico, demostrando beneficio potencial de la integración formal entre técnicas predictivas y plan preventivo.

La validación por panel de expertos evaluó coherencia técnica y viabilidad operativa del modelo completo con procedimientos incorporados. El panel integró cuatro profesionales internos de la empresa manufacturera de neumáticos y dos profesionales externos de empresas industriales de la región. El promedio general alcanzó 4.56/5.0, superando el umbral de validación satisfactoria. Las preguntas con mayor valoración correspondieron a clasificación unificada (4.83/5.0), verificación de efectividad (4.83/5.0) y ajuste de frecuencias (4.83/5.0), mientras plazos de respuesta obtuvo 4.00/5.0 con observaciones sobre dependencia de disponibilidad de recursos.

El análisis de conformidad con estándares internacionales verificó la alineación de cuatro de cinco componentes del modelo: los criterios técnicos cumplen ISO 10816-3 e ISO 18434-1, el protocolo normativo sigue arquitectura ISO 13374-2, los formatos incorporan campos requeridos por ISO 14224 y los procedimientos aplican principios de claridad y completitud. La metodología de evaluación retrospectiva constituye una adaptación contextual sin equivalente normativo directo, fundamentada en principios de análisis de oportunidades perdidas.

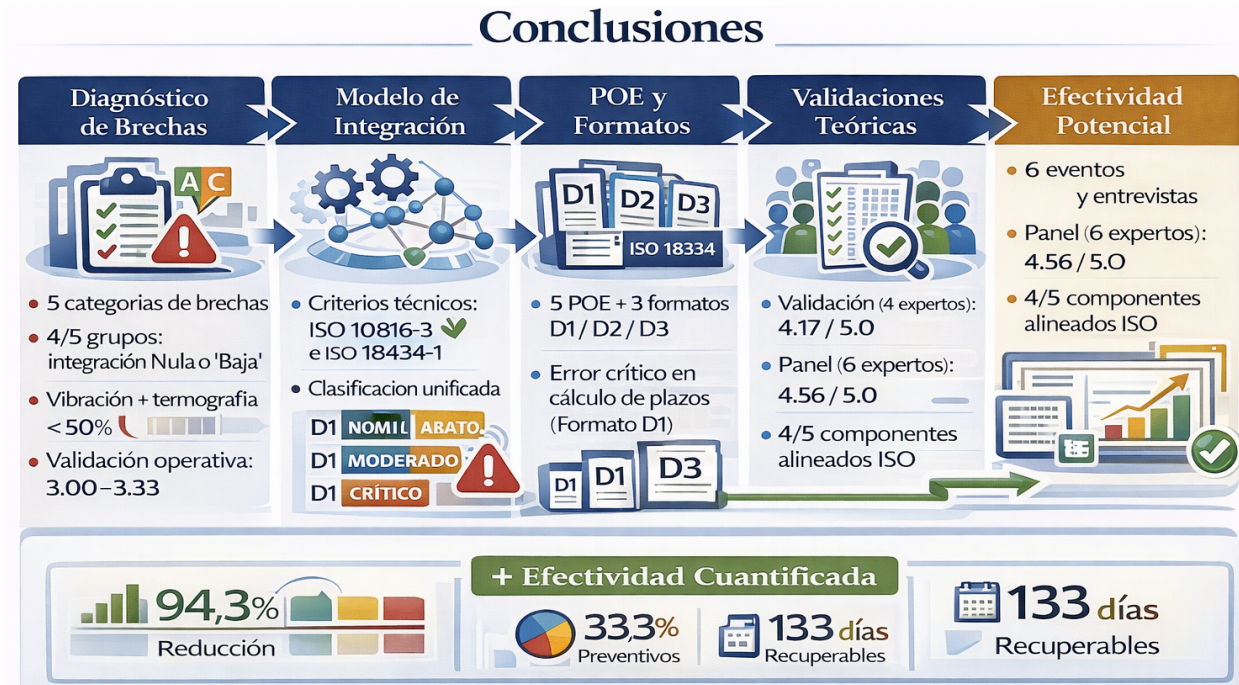
La consolidación de validaciones confirma que el modelo cumple criterios de coherencia técnica, aplicabilidad operativa y efectividad potencial, condición respaldada mediante las cinco instancias de validación ejecutadas que evalúan dimensiones complementarias del modelo propuesto.

7. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió alcanzar el objetivo general de proponer un modelo de integración para el mezclador industrial de la empresa. La Figura 24 sintetiza las principales conclusiones derivadas de cada fase metodológica.

Figura 24

Resumen gráfico de las conclusiones.



Nota: La Figura 24 se realizó con el uso de la inteligencia artificial.

El diagnóstico del estado actual identificó cinco categorías de brechas operativas entre técnicas predictivas y el plan de mantenimiento del mezclador industrial. La evaluación documental reveló que cuatro de los cinco grupos documentales presentan capacidad de integración predictiva entre “Nula” y “Baja”, mientras los informes de vibraciones y termografía alcanzan menos del 50% de completitud según requisitos ISO 14224. La validación operativa con cinco actores clave confirmó la existencia de brechas con severidad moderada, obteniendo promedios entre 3.00 y 3.33 en escala Likert, lo que justifica el desarrollo de un modelo de integración.

El modelo normativo-prescriptivo diseñado integra cuatro componentes interrelacionados: criterios técnicos basados en ISO 10816-3 e ISO 18434-1, clasificación unificada de severidad en cuatro niveles, protocolo normativo con verificación de efectividad y matriz prescriptiva con plazos operacionales diferenciados. La validación mediante entrevistas semiestructuradas con cuatro expertos del departamento de mantenimiento alcanzó promedio de 4.17/5.0, con refinamiento de plazos para nivel ALTO extendidos a 7 días hábiles de coordinación y 20 días

hábiles de ejecución según retroalimentación operacional.

El desarrollo de procedimientos operativos generó cinco POE diferenciados por técnica predictiva y tipo de actividad, junto con tres formatos de retroalimentación normalizada que documentan el ciclo completo desde detección hasta verificación de efectividad. La validación preliminar de usabilidad identificó un error crítico en el cálculo de plazos del Formato D1, donde el planificador registró 31 días calendario contra el límite de 27 días hábiles establecido, motivando el refinamiento del POE-01 mediante verificación adicional. Los formatos D2 y D3 fueron aprobados sin errores críticos.

La validación teórica demostró efectividad cuantificable del modelo mediante tres indicadores: reducción del 94.3% en tiempo de respuesta, 33.3% de eventos prevenibles y 133 días acumulados recuperables, calculados a partir de seis eventos correctivos históricos donde existió detección predictiva previa. El panel de expertos integrado por cuatro profesionales internos y dos externos validó el modelo completo con promedio de 4.56/5.0, mientras el análisis de conformidad verificó alineación de cuatro de cinco componentes con estándares ISO aplicables.

8. Recomendaciones

Se recomienda ejecutar implementación piloto del modelo en la empresa durante un período mínimo de seis meses, permitiendo validar indicadores de efectividad con muestra significativa de eventos y ajustar plazos operacionales según experiencia acumulada en condiciones reales.

Se sugiere ampliar la validación de usabilidad incorporando múltiples usuarios del sistema documental, dado que la validación preliminar se ejecutó con un único planificador. Esta extensión permitiría cuantificar dimensiones de eficiencia y curva de aprendizaje no evaluadas en el presente estudio.

Resulta pertinente desarrollar análisis de costo-beneficio que cuantifique el retorno de inversión de la integración propuesta, correlacionando días recuperables con costos de parada no planificada y costos de implementación del sistema documental, variable no considerada en el alcance del presente trabajo.

Se recomienda evaluar la extensión del modelo a otros equipos críticos de la empresa,

adaptando criterios técnicos según características específicas de cada equipo, mientras se mantiene la estructura lógica de clasificación, protocolo y matriz prescriptiva validada.

Es conveniente investigar la integración digital del modelo con el sistema SAP PM en desarrollo, automatizando la generación de órdenes de trabajo según severidad detectada y habilitando análisis de tendencias históricas que actualmente requieren procesamiento manual de informes predictivos.

Se recomienda investigar la incorporación de técnicas predictivas complementarias, como análisis de ultrasonido para detección de fallas incipientes en rodamientos, considerando que el mezclador industrial opera con múltiples componentes rotativos donde técnicas adicionales podrían ampliar la ventana de detección temprana.

Referencias

- Arauzo, J., y Rodriguez, D. (2024). Propuesta de mejora para reducir el incumplimiento de entregas, usando 5s y mantenimiento planificado en una empresa metalúrgica. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.
- Belton, V., y Stewart, T. (2012). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science & Business Media.
- Bravo, L., García, U., Hernández, M., y Ruiz, M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Investigación en educación médica*, 2(7), 162–167.
- Cansino, E., y Lucero, D. (2015). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y seguridad industrial para la fabrica minera* (B.S. thesis). Quito: EPN. 2015.
- Carvalho, T., Soares, F., Vita, R., Francisco, R., Basto, J., y Alcalá, S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- Cervelló, R., Martínez, D., Ramírez, D., y Virgili, J. (2009). Interfaces usuario máquina. *Universitat Oberta de Catalunya*.
- Cheremisinoff, N. (2017). *Polymer mixing and extrusion technology*. Routledge.
- Crespo, A. (2007). *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer.
- Dalkey, N., y Helmer, O. (1963). An experimental application of the delphi method to the use of experts. *Management science*, 9(3), 458–467.
- Drobny, G. (2016). Processing of fluoroelastomers. *Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323394802000075>*.
- Díaz, J. (2022). El impacto de los modelos bpmn en las organizaciones. *Obtenido de Departamento académico de ingeniería: <https://departamentingenieria.pucp.edu.pe/columnistas/el-impacto-de-los-modelos-bpmn-en-las-organizaciones/>*.
- EN13306. (2017). *Mantenimiento. terminología del mantenimiento*. UNE.
- EPRI. (1975). Electric power research institute. *EPRI*.
- Escudero, G., y Mendoza, C. (2023). Modelo de gestión de componentes para mejorar la eficiencia del servicio de mantenimiento de equipos pesados de minería, utilizando mrp y tpm. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.
- Espinoza, A., y Piedad, M. (2021). *Modelo de auditoría para la gestión de mantenimiento de activos físicos. caso de estudio: Laboratorios del área mecánica de la universidad politécnica salesiana sede cuenca* (B.S. thesis).

- Freybel, L. (2023). Reducción del tiempo de inactividad y mejora de la condición de la máquina con mantenimiento predictivo. *Obtenido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/posts/freybel-lorenzo-b3797075cmc-articulo-mantenimiento-activity-7038273309116915712-3lU8/?originalSubdomain=do>*
- Galarza, K. (2024). Implementación de un plan de mantenimiento de las maquinarias pesadas, aplicando la metodología amef para medir la disponibilidad en la empresa inteqmin. *Universidad Nacional del Centro del Perú*.
- García, F. (2004). Desarrollo de nuevos algoritmos aplicados al mantenimiento predictivo óptimo centrado en la fiabilidad y la monitorización remota basada en la condición (rcm2). *Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha*.
- García, S. (2009). *Mantenimiento predictivo: Técnicas de mantenimiento condicional basadas en la medición de variables físicas*. Editorial Renovetec.
- García, S. (2012). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- González, E. (2017). Propuesta para el desarrollo de una estrategia de gestión de activos para equipo rotativo en las fases de operación, mantenimiento y optimización en el sector de petróleo. *Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB*.
- González, F. (2020). *Mantenimiento industrial avanzado*. FUNDACIÓN CONFEMETAL.
- Gopalakrishnan, M., Bokrantz, J., Ylipää, T., y Skoogh, A. (2015). Planning of maintenance activities—a current state mapping in industry. *Procedia CIRP*, 30, 480–485.
- Gómez, S. (2017). Técnicas de mantenimiento predictivo. metodología de aplicación en las organizaciones. *Universidad Católica de Colombia, Bogotá*, 23.
- Ishizaka, A., y Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. John Wiley & Sons.
- ISO. (2018). *International standards for asset management, maintenance and reliability*. International Organization for Standardization.
- ISO13274-1. (2003). *Condition monitoring and diagnostics of machines — data processing, communication and presentation — part 1: General guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO13374-2. (2004). *Condition monitoring and diagnostics of machines — data processing, communication and presentation — part 2: Data processing*. International Organization for Standardization.
- ISO14224. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. International Organization for Standardization.

- ISO17359. (2018). *Condition monitoring and diagnostics of machines — general guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO20816-1. (2016). *Mechanical vibration — measurement and evaluation of machine vibration*. International Organization for Standardization.
- ISO55000. (2014). *Asset management — overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization.
- Jardine, A., Lin, D., y Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483–1510.
- Lazakis, I., Raptodimos, Y., y Varelas, T. (2018). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404–415.
- López, A. (2012). *Diseño de un marco de referencia para la gestión del mantenimiento orientado al cumplimiento de estándares ya la aplicación de procesos de e-maintenance* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Sevilla.
- Luna, M., Badillo, I., y Vázquez, G. (2021). Diseño de una metodología de mantenimiento predictivo para asegurar procesos de producción de la industria 4.0. *South Florida Journal of Development*, 2(1), 1009–1017.
- Márquez, A., León, P. M., y Herguedas, A. (2021). *Ingeniería de mantenimiento: técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Ediciones AENOR.
- Medrano, J., Gonzáles, V., y Díaz, V. (2017). *Mantenimiento técnicas y aplicaciones industriales . méxico*. Grupo Editorial Patria.
- Montilla, C. (2019). *Mantenimiento industrial y su administración. pereira*. Editorial UPT.
- Mora, L. (2021). *Mantenimiento industrial efectivo. colombia*. COLDI Limitada.
- Morales, E. (s.f.). Diseño y estrategia de implementación de un sistema integrado de gestión del mantenimiento de equipos para una constructora.
- Moubray, J. (1997). El camino hacia el rcm-mantenimiento centrado en confiabilidad. *Sopore y CIA, LTDA*, 1–2.
- Palencia, O. (2011). *Gestión moderna del mantenimiento industrial. principios fundamentales*. Ediciones de la U.
- Parra, C., y Crespo, A. (2012). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos*. Ingecon.
- Pérez, F. (2021). Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial. *Universidad Santo Tomás*.
- Rausand, M., y Haugen, S. (2020). *Risk assessment: Theory, methods, and applications*.

- en *j. wiley, risk assessment: Theory, methods, and applications. escocia*. University of Glasgow; Nottingham Trent University.
- Realyvásquez, A., Maldonado, A., y García, J. (2018). Macroergonomics for manufacturing systems. *Springer*.
- Rivera, E. (2011). Sistema de gestión del mantenimiento industrial. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Programa Cybertesis PERÚ*.
- Rosale, J. (2023). Curva pf: Describe dónde aplicar las técnicas de mantenimiento. *fraattal*.
- Rowe, G., y Wright, G. (2011). The delphi technique: Past, present, and future prospects—introduction to the special issue. *Technological forecasting and social change*, 78(9), 1487–1490.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83–98.
- Saaty, T., y Vargas, L. (2012). Models, methods, concepts y applications of the analytic hierarchy process. *Boston, MA: Springer US: Imprint: Springer*.
- Sánchez, M., Rodríguez, J., González, J., Ramos, M., y García, A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en michoacán, méxico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(2), 391–403.
- Skulmoski, G., Hartman, F., y Krahn, J. (2007). The delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research*, 6(1), 1–21.
- Stamatis, D. (2018). *Advanced product quality planning: the road to success*. CRC Press.
- Sánchez, A. (2017). *TÉcnicas de mantenimiento predictivo. metodologÍA de aplicaciÓn en las organizaciones. bogotá*. Universida católica de colombia.
- Tavner, P. (2012). *Offshore wind turbines-reliability, availability & maintenance*. Institution of Engineering and Technology (IET).
- Torres, C. (2020). La curva p-f. *Power-Mi Blog*.
- Urian, M., Tapia, M., Cabrera, G., Vaquero, M., Montaña, J., Tovar, M., ... Martínez, J. (2023). Diagnóstico de una organización de servicios en la gestión estratégica de mantenimiento. *South Florida Journal of Development*, 4(7), 2813–2825.
- Villegas, G. (1997). Gestión por factores críticos de éxito. *Universidad EAFIT*.
- Yıldız, G., y Soyly, B. (2023). Integrating preventive and predictive maintenance policies with system dynamics: A decision table approach. *Advanced Engineering Informatics*, 56, 101952.
- Zhang, C., y Mousavi, A. (2024). *Structural health monitoring using emerging signal processing approaches with artificial intelligence algorithms*. CRC Press.
- Zonta, T., Da Costa, C., da Rosa Righi, R., de Lima, J., Da Trindade, E., y Li, G. (2020).

Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & industrial engineering*, 150, 106889.

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

MATRIZ DE CONSISTENCIA			
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Qué modelo permitiría integrar efectivamente las técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos?	Proponer un modelo para la integración de las técnicas de mantenimiento predictivo con el plan de mantenimiento del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos.	-VI: Modelo de integración. -VD: Plan de mantenimiento.	Integración de estrategias de mantenimiento.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Cuál es el estado actual del plan de mantenimiento y de la implementación de técnicas predictivas del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos?	Diagnosticar el estado actual del plan de mantenimiento y de la implementación de técnicas predictivas del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos, mediante auditoría documental, técnicas existentes y entrevistas al 80% del personal técnico.	-VI: Modelo de integración. -VD: Plan de mantenimiento.	Mantenimiento predictivo.
¿Qué estructura debería tener un modelo de integración para incorporar efectivamente los resultados de las técnicas predictivas al plan de mantenimiento del mezclador industrial?	Diseñar un modelo de integración que establezca claramente las relaciones entre los resultados de las técnicas predictivas y los ajustes necesarios para el plan de mantenimiento del mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos.	-VI: Modelo de integración. -VD: Plan de mantenimiento.	Técnicas de mantenimiento.
¿Qué procedimientos y herramientas de bajo costo se requieren para implementar el modelo para la integración propuesto?	Elaborar procedimientos específicos y herramientas prácticas de bajo costo que faciliten la implementación del modelo para la integración propuesto.	-VI: Modelo de integración. -VD: Plan de mantenimiento.	Plan de mantenimiento.
¿Cómo validar teóricamente la efectividad del modelo de integración propuesto para el mezclador industrial de la empresa manufacturera de neumáticos?	Validar teóricamente el modelo para la integración propuesto mediante evaluación de al menos 3 expertos de la empresa y comparar con estándares internacionales.	-VI: Modelo de integración. -VD: Plan de mantenimiento.	Integración de estrategias de mantenimiento.

Anexo B: Operacionalización de Variables

VARIABLE DEPENDIENTE: PLAN DE MANTENIMIENTO				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
Estructura del plan de mantenimiento	<p>Definición conceptual: Se refiere a la estructuración, extensión y actualización del plan de mantenimiento, teniendo en cuenta el número de tareas programadas, los equipos involucrados y la frecuencia con que se realizan las revisiones (Palencia, 2011).</p> <p>Definición operacional: Se evalúa a través del conteo total de tareas programadas, el porcentaje de equipos incluidos en el plan y cronogramas de mantenimiento.</p>	Conteo (Número de tareas de mantenimiento programadas)	Conteo	Conteo
Cumplimiento del plan de mantenimiento	<p>Definición conceptual: Evalúa el nivel de cumplimiento del mantenimiento planificado en relación con el cronograma establecido (Arauzo y Rodriguez, 2024).</p> <p>Definición operacional: El porcentaje de tareas completadas según lo planificado, el tiempo promedio de retraso en la ejecución de actividades, utilizando como base los informes de mantenimiento y las bitácoras de trabajo.</p>	Porcentaje (tareas ejecutadas según cronograma)	Porcentaje	Reportes de mantenimiento ejecutado
Impacto en la disponibilidad del equipo	<p>Definición conceptual: Evalúa cómo la implementación del plan de mantenimiento impacta en la disponibilidad operativa, ya que reduce los tiempos de inactividad y optimiza la planificación (Galarza, 2024).</p> <p>Definición operacional: Es donde se evalúa el impacto del modelo a través del porcentaje de disponibilidad del equipo. También se considera la disminución en el tiempo de inactividad por mantenimiento.</p>	Tiempo (inactividad por mantenimiento)	Horas	Registro de tiempos de paro y mantenimiento

VARIABLE INDEPENDIENTE: MODELO DE INTEGRACIÓN

Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
Nivel de integración con el plan de mantenimiento	<p>Definición conceptual: Se trata del nivel en que se han integrado las técnicas predictivas en el plan de mantenimiento, adaptando procedimientos y estrategias con el fin de optimizar la confiabilidad de los equipos (González, 2017).</p> <p>Definición operacional: El nivel de integración se evalúa mediante el porcentaje de técnicas predictivas y procedimientos incorporados al plan de mantenimiento.</p>	<p>Porcentaje (% de técnicas de mantenimiento predictivo incorporadas en el plan)</p>	<p>Porcentaje</p>	<p>Conteo (Análisis documental del plan de mantenimiento)</p>
Aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo	<p>Definición conceptual: Analiza la implementación y el uso de herramientas predictivas, como el análisis de vibraciones, la termografía y el ultrasonido, para detectar de manera temprana posibles fallas (Gómez, 2017).</p> <p>Definición operacional: Se evalúa la frecuencia de aplicación de cada técnica, el porcentaje de equipos monitoreados mediante estas herramientas y la exactitud en la detección de fallas.</p>	<p>Porcentaje (equipos monitoreados con técnicas predictivas)</p>	<p>Porcentaje</p>	<p>Conteo (Inventario de equipos y registros de inspección)</p>
Desempeño del modelo de integración	<p>Definición conceptual: Evalúa la efectividad del modelo implementado considerando su impacto en la reducción de fallas, la mejora en la disponibilidad del equipo y la satisfacción del personal con el nuevo sistema (Escudero y Mendoza, 2023).</p> <p>Definición operacional: Se evalúa a través de la disminución de fallas recurrentes, el incremento en la disponibilidad operativa y el grado de satisfacción del personal, el cual será medido mediante encuestas de evaluación.</p>	<p>Porcentaje (reducción de fallas repetitivas)</p>	<p>Porcentaje</p>	<p>Conteo (Registro de fallas en historial de mantenimiento)</p>

Anexo C: Versiones del cuestionario

VERSIÓN A - SUPERVISIÓN Y PLANIFICACIÓN (jefe de mantenimiento, planificador y jefe de producción)

OBJETIVO: Este cuestionario tiene como objetivo validar desde la perspectiva operativa las brechas identificadas en el diagnóstico del sistema de mantenimiento del mezclador industrial.

Datos del encuestado:

Cargo: _____

Área: _____

Años de experiencia con el mezclador industrial: _____

INSTRUCCIONES: Evalúe cada afirmación según su experiencia operativa con el mezclador industrial, usando la siguiente escala:

1 = Totalmente en desacuerdo (la situación no ocurre)

2 = En desacuerdo (ocurre raramente)

3 = Neutral (ocurre ocasionalmente)

4 = De acuerdo (ocurre frecuentemente)

5 = Totalmente de acuerdo (ocurre siempre)

BLOQUE 1: BRECHAS DOCUMENTALES

1. Los informes de análisis predictivos NO generan modificaciones en el plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial. _____

2. Cuando se ejecutan acciones basadas en hallazgos predictivos, estas NO se documentan en un registro formal. _____
3. El plan de mantenimiento, los informes predictivos y el sistema SAP PM funcionan como sistemas independientes. _____

BLOQUE 2: INTEGRACIÓN SISTÉMICA

4. Cuando los análisis predictivos detectan anomalías, NO existe un mecanismo formal para generar órdenes de trabajo. _____
5. NO existen protocolos documentados para acciones según severidad detectada. _____
6. Los informes de vibraciones, termografía y aceite se revisan por separado, sin correlación. _____

BLOQUE 3: FRECUENCIA Y MONITOREO

7. Las frecuencias fijas de monitoreo NO se ajustan según condición real del mezclador industrial. _____
8. NO existe sistema formal para analizar tendencias históricas de parámetros monitoreados. _____
9. Los informes predictivos NO incluyen umbrales de alerta específicos. _____

BLOQUE 4: CONOCIMIENTO Y TRAZABILIDAD

10. Las soluciones exitosas NO se documentan formalmente. _____
11. La rotación de personal genera pérdida de conocimiento no documentado. _____
12. NO existe mecanismo para evaluar efectividad de acciones post-hallazgos predictivos. _____

BLOQUE 5: NORMATIVAS Y ESTANDARIZACIÓN

13. Los proveedores usan diferentes escalas de severidad, dificultando la interpretación. _____

14. La clasificación de fallas NO sigue la taxonomía ISO 14224. _____

15. NO existen procedimientos formales para actualizar el plan de mantenimiento. _____

VERSIÓN B - TÉCNICOS DE PLANTA (Mecánico y Eléctrico)

OBJETIVO: Conocer su experiencia práctica con el mantenimiento del mezclador industrial para confirmar problemas identificados.

Datos del encuestado:

Cargo: _____

Turno: _____

Años trabajando con el mezclador industrial: _____

INSTRUCCIONES: Califique cada situación según su experiencia trabajando con el mezclador industrial:

1 = Nunca pasa

2 = Casi nunca pasa

3 = A veces pasa

4 = Casi siempre pasa

5 = Siempre pasa

BLOQUE 1: DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO

1. Los resultados de análisis predictivos NO cambian nuestras tareas semanales de mantenimiento. _____
2. Cuando reparo algo basándome en análisis predictivos, NO registro formalmente qué hice. _____
3. El plan de mantenimiento NO se actualiza cuando los análisis detectan problemas. _____

BLOQUE 2: INTEGRACIÓN DE SISTEMAS

4. Cuando llegan resultados anormales de análisis, NO se genera automáticamente una orden de trabajo. _____
5. NO hay procedimientos claros escritos sobre qué hacer con cada tipo de anomalía detectada. _____
6. Los diferentes análisis (vibraciones, temperatura, aceite) NO se relacionan entre sí. _____

BLOQUE 3: DETECCIÓN DE FALLAS

7. El mezclador industrial presenta fallas que NO fueron detectadas previamente por análisis predictivos. _____
8. Problemas repetitivos (tecle 5, balanzas bloqueadas) NO se detectan antes de fallar. _____
9. Seguimos frecuencias fijas de mantenimiento sin importar el estado del equipo. _____

BLOQUE 4: CONOCIMIENTO TÉCNICO

10. Soluciones efectivas que descubro NO quedan en manuales o procedimientos. _____
11. Compañeros nuevos aprenden preguntando porque NO hay documentación clara. _____
12. Con valores anormales en informes, NO está claro qué acción tomar. _____

BLOQUE 5: ESTANDARIZACIÓN

13. Informes de proveedores externos usan términos diferentes, dificultan entender urgencia. _____
14. NO verificamos si nuestras acciones realmente previnieron fallas. _____
15. Órdenes correctivas NO indican si el problema pudo detectarse antes con predictivo. _____

Anexo D: Formatos de retroalimentación

FORMATO D1: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEZCLADOR INDUSTRIAL - EMPRESA MANUFACTURERA DE NEUMÁTICOS

Fecha de inspección: ____/____/_____

Inspector:

Código de tarea:

Información de la inspección

Subsistema	Velocidad RMS (mm/s)	Aceleración (g)	Envolvente (gE)	Severidad P4-P1	¿Requiere intervención?	Resultado siguiente inspección	Fecha siguiente inspección

Acciones ejecutadas y seguimiento:

Descripción de correcciones realizadas:	
Fecha de ejecución:	____/____/_____
Ejecutado por:	<input type="checkbox"/> Personal interno <input type="checkbox"/> Personal externo
Ajuste de frecuencia:	<input type="checkbox"/> No requiere <input type="checkbox"/> Sí: _____

Firma Planificador: _____	Firma jefe Mantenimiento: _____
------------------------------	------------------------------------

Nota. La empresa puede implementar versión digitalizada de este formato en el sistema SAP PM según desarrollo disponible, manteniendo formato físico como alternativa operativa.

FORMATO D2: RETROALIMENTACIÓN TERMOGRAFÍA INFRARROJA
MEZCLADOR INDUSTRIAL - EMPRESA MANUFACTURERA DE NEUMÁTICOS

Fecha de inspección: ____/____/_____

Inspector:

Código de tarea:

Información de la inspección

Componente/Tablero	Nivel tensión (Alta/Baja)	ΔT (°C)	Severidad LEVE- EXTREMO	¿Requiere intervención?	Resultado siguiente inspección	Fecha siguiente inspección

Acciones ejecutadas y seguimiento:

Descripción de correcciones realizadas:	
Fecha de ejecución:	____/____/_____
Ejecutado por:	<input type="checkbox"/> Personal interno <input type="checkbox"/> Personal externo
Ajuste de frecuencia:	<input type="checkbox"/> No requiere <input type="checkbox"/> Sí: _____

Firma Planificador: _____	Firma jefe Mantenimiento: _____
------------------------------	------------------------------------

Nota. La empresa puede implementar versión digitalizada de este formato en el sistema SAP PM según desarrollo disponible, manteniendo formato físico como alternativa operativa.

FORMATO D3: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS DE ACEITES
MEZCLADOR INDUSTRIAL - EMPRESA MANUFACTURERA DE NEUMÁTICOS

Fecha de inspección:

Inspector:

Código de tarea:

Información de la inspección

Equipo lubricado	Grado ISO	Viscosidad (cSt)	Oxidación (Abs/cm)	Elementos críticos (ppm)	Severidad Normal-Anormal	Resultado siguiente inspección	Fecha siguiente inspección

Acciones ejecutadas y seguimiento:

Descripción de correcciones realizadas:	
Fecha de ejecución:	____/____/____
Ejecutado por:	<input type="checkbox"/> Personal interno <input type="checkbox"/> Personal externo
Ajuste de frecuencia:	<input type="checkbox"/> No requiere <input type="checkbox"/> Sí: _____

Firma Planificador: _____	Firma jefe Mantenimiento: _____
------------------------------	------------------------------------

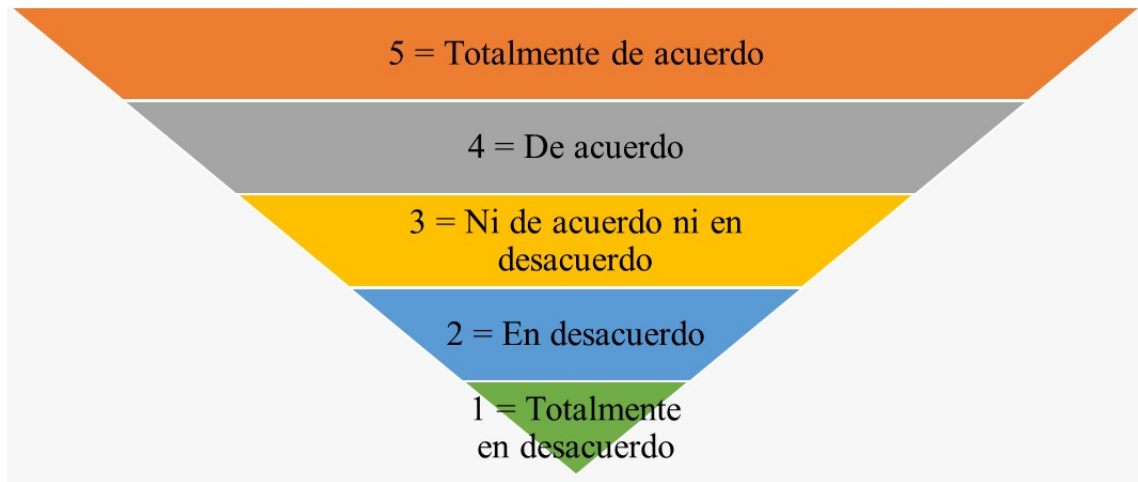
Nota. La empresa puede implementar versión digitalizada de este formato en el sistema SAP PM según desarrollo disponible, manteniendo formato físico como alternativa operativa.

Anexo E: Instrumento de validación

INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN DEL MODELO NORMATIVO-PRESCRIPTIVO DE INTEGRACIÓN PREDICTIVO-PREVENTIVO

OBJETIVO: Evaluar la coherencia técnica, factibilidad operativa y completitud del modelo propuesto de integración entre técnicas predictivas y plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial.

INSTRUCCIONES: Por favor, lea cuidadosamente cada afirmación y marque con una “X”, el número que mejor representa su nivel de acuerdo según la siguiente escala:



No existen respuestas correctas o incorrectas. Su opinión técnica es valiosa para validar y mejorar el modelo propuesto.

DATOS DEL PARTICIPANTE:

Nombre: _____

Cargo: _____

Años en el cargo: _____

DIMENSIÓN 1: COHERENCIA TÉCNICA

Los siguientes enunciados evalúan si los criterios técnicos y clasificación de severidad son apropiados para los equipos del mezclador industrial.

1. Los umbrales normativos de velocidad RMS (ISO 10816-3), gradiente térmico (ISO 18434-1) y concentración de elementos metálicos (Laboratorio) aplicados al mezclador industrial son técnicamente apropiados para clasificar la condición real de sus equipos.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

2. La clasificación unificada de severidad en cuatro niveles (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO) permite diferenciar claramente la urgencia de intervención requerida según el hallazgo detectado.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

3. El procedimiento de análisis por técnica predictiva (1. Extraer parámetros del informe, 2. Consultar criterios normativos, 3. Clasificar severidad y 4. Vincular subsistema) permite traducir los hallazgos de los informes de vibraciones, termografía y aceite en decisiones de mantenimiento técnicamente fundamentadas

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

4. Los tres criterios de selección de eventos históricos (disponibilidad de informe predictivo previo, criticidad operacional, documentación completa) son apropiados para demostrar efectividad del modelo mediante análisis retrospectivo.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

DIMENSIÓN 2: FACTIBILIDAD OPERATIVA

Los siguientes enunciados evalúan si el protocolo, las acciones y los plazos propuestos son ejecutables con los recursos actuales del departamento.

5. El flujo de información propuesto (recepción de informe → análisis → registro → coordinación → ejecución → verificación) es aplicable con la estructura organizacional actual del departamento de mantenimiento.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

-
6. Las acciones prescriptivas definidas para cada nivel de severidad (registro en Anexo D, ajuste de frecuencia, coordinación con jefes, generación de OT) son ejecutables con los recursos humanos y tecnológicos disponibles.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

-
-
7. Los plazos establecidos (24 horas para coordinación CRÍTICO, 5 días para coordinación ALTO, 72 horas para ejecución CRÍTICO, 15 días para ejecución ALTO) son realistas considerando disponibilidad de personal y complejidad de intervenciones.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

-
-
8. El procedimiento de aplicación retrospectiva (identificar hallazgo predictivo, clasificar severidad, determinar acción prescrita, calcular comparativo) es ejecutable con datos disponibles en SAP PM e informes históricos de Predictiva.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

DIMENSIÓN 3: COMPLETITUD

Los siguientes enunciados evalúan si el modelo incluye todos los componentes necesarios para integrar efectivamente el mantenimiento predictivo con el preventivo.

9. El modelo aborda todos los aspectos necesarios para integrar los hallazgos de las técnicas predictivas con el plan de mantenimiento preventivo del mezclador industrial.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

10. Los formatos de retroalimentación propuestos (Anexo D) capturan la información necesaria para documentar el ciclo completo desde detección hasta cierre de acciones.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

11. Los tres indicadores propuestos (reducción tiempo respuesta, porcentaje eventos prevenibles, días acumulados recuperables) permiten cuantificar efectividad del modelo mediante evaluación retrospectiva.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

12. El modelo propuesto no omite ningún componente crítico que impediría su funcionamiento efectivo en la práctica.

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

RETROALIMENTACIÓN CUALITATIVA

Por favor, describa cualquier ajuste, mejora o componente adicional que considere necesario para que el modelo propuesto funcione efectivamente en la empresa:

¿Existe algún recurso adicional (personal, equipo, capacitación, software) que sería necesario para implementar este modelo?

Anexo F: Formatos de retroalimentación normalizados

FORMATO D1: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS VIBRACIONES

Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos

Código: FRM-MIXER-D1 | Versión: 1.0 | Fecha: Diciembre 2024

SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN

Fecha Inspección	Subsistema Evaluado	Punto de Medición
------------------	---------------------	-------------------

SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS

Parámetro	Valor Medido	Unidad	Criterio Aplicado	Zona/Clasificación
-----------	--------------	--------	-------------------	--------------------

SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN

Severidad Unificada	Acción Prescrita	Plazo Ejecución	Responsable	Observaciones
---------------------	------------------	-----------------	-------------	---------------

SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA

¿Requiere ajuste?	Frecuencia Actual	Frecuencia Nueva	Criterio Aplicado	Aprobado por
-------------------	-------------------	------------------	-------------------	--------------

SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar post-intervención)

Fecha Ejecución	Resultado Verificación	Valor Post-Intervención	Observaciones
-----------------	------------------------	-------------------------	---------------

Nota. Completar este formato inmediatamente después de recibir el informe predictivo y registrar el SAP PM si la severidad es \geq a MODERADO.

FORMATO D2: RETROALIMENTACIÓN TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos
Código: FRM-MIXER-D2 | Versión: 1.0 | Fecha: Diciembre 2024

SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN

Fecha Inspección	Componente/Tablero Evaluado	Nivel de Tensión
------------------	-----------------------------	------------------

SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS

Parámetro	Valor Medido	Unidad	Criterio Aplicado	Clasificación
-----------	--------------	--------	-------------------	---------------

SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN

Severidad unificada	Acción prescrita	Plazo ejecución	Responsable	Observaciones
---------------------	------------------	-----------------	-------------	---------------

SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA

¿Requiere ajuste?	Frecuencia actual	Frecuencia nueva	Criterio aplicado	Aprobado por
-------------------	-------------------	------------------	-------------------	--------------

SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar post-intervención)

Fecha ejecución	Resultado verificación	ΔT Post-intervención	Observaciones
-----------------	------------------------	------------------------------	---------------

Nota. Completar este formato inmediatamente después de recibir el informe predictivo y registrar el SAP PM si la severidad es \geq a MODERADO.

FORMATO D3: RETROALIMENTACIÓN ANÁLISIS TRIBOLÓGICO

Mezclador industrial - Empresa manufacturera de neumáticos
Código: FRM-MIXER-D3 | Versión: 1.0 | Fecha: Diciembre 2024

SECCIÓN A: IDENTIFICACIÓN

Fecha inspección	Equipo/Sistema lubricado	Tipo de aceite
------------------	--------------------------	----------------

SECCIÓN B: PARÁMETROS MEDIDOS

Parámetro	Valor medido	Unidad	Criterio aplicado	Clasificación
-----------	--------------	--------	-------------------	---------------

SECCIÓN C: CLASIFICACIÓN Y ACCIÓN

Severidad unificada	Acción prescrita	Plazo ejecución	Responsable	Observaciones
---------------------	------------------	-----------------	-------------	---------------

SECCIÓN D: AJUSTE DE FRECUENCIA

¿Requiere ajuste?	Frecuencia actual	Frecuencia nueva	Criterio aplicado	Aprobado por
-------------------	-------------------	------------------	-------------------	--------------

SECCIÓN E: SEGUIMIENTO (completar post-intervención)

Fecha ejecución	Resultado verificación	Valores post-cambio	Observaciones
-----------------	------------------------	---------------------	---------------

Nota. Completar este formato inmediatamente después de recibir el informe predictivo y registrar el SAP PM si la severidad es \geq a MODERADO.

Anexo G: Instrumento de validación por panel de expertos

DESCRIPCIÓN DEL MODELO A EVALUAR

Nombre: Modelo de Integración Normativo-Prescriptivo para la retroalimentación entre Técnicas de mantenimiento predictivo y el Plan de mantenimiento preventivo.

¿Qué significa este nombre?

- **Integración:** Conecta dos elementos que actualmente operan de forma independiente (técnicas predictivas y plan preventivo).
- **Normativo:** Utiliza criterios técnicos basados en normas internacionales ISO para clasificar la severidad de hallazgos.
- **Prescriptivo:** Define acciones específicas y plazos obligatorios según la severidad clasificada.
- **Retroalimentación:** Los resultados predictivos alimentan decisiones del plan preventivo, y los resultados de intervenciones alimentan ajustes en las inspecciones predictivas.

¿Qué problema resuelve?

Hoy en día, cuando un proveedor externo detecta una anomalía mediante técnicas predictivas (vibraciones, termografía o análisis de aceite), el informe se entrega al departamento de mantenimiento, pero no existe un proceso formal que defina qué hacer con esa información. No hay criterios establecidos para determinar la urgencia, no hay plazos para actuar y no se verifica si las intervenciones resolvieron el problema detectado.

¿Qué propone el modelo?

El modelo establece un flujo estructurado que transforma hallazgos predictivos en acciones concretas de mantenimiento:

1. El planificador recibe el informe predictivo.
2. Clasifica la severidad del hallazgo en una escala unificada (NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO).

3. Ejecuta la acción prescrita según esa clasificación (desde monitoreo hasta intervención inmediata).
4. Ejecuta la acción prescrita según esa clasificación (desde monitoreo hasta intervención inmediata).
5. Documenta el proceso en formatos estandarizados.
6. Verifica si la intervención fue efectiva.

¿Qué incluye el modelo?

- Criterios técnicos basados en normas ISO para clasificar severidad.
- Plazos máximos de respuesta según urgencia.
- Procedimientos paso a paso para cada técnica predictiva.
- Formatos de registro para documentar el ciclo completo.

INSTRUCCIONES

Lea cada pregunta y marque con una X el número que mejor represente su opinión:

Valor	Significado
1	Totalmente en desacuerdo
2	Desacuerdo
3	Neutral
4	Deacuerdo
5	Totalmente de acuerdo

PREGUNTAS DE EVALUACIÓN

Pregunta 1: Flujo de trabajo

Actualmente, no existe un proceso formal para gestionar hallazgos predictivos. El modelo propone que el planificador reciba el informe, clasifique la severidad y determine la acción según esa clasificación.

¿Este flujo de trabajo es lógico para gestionar hallazgos predictivos?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Observaciones:

Pregunta 2: Clasificación unificada

Cada técnica predictiva usa escalas diferentes (P1-P4 para vibraciones, LEVE-EXTREMO para termografía, Normal-Anormal para aceite). El modelo traduce todas a una escala común: NORMAL, MODERADO, ALTO, CRÍTICO.

¿Esta unificación facilita decidir qué hallazgo atender primero?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 3: Plazos de respuesta

Actualmente, no existen plazos definidos para actuar ante hallazgos. El modelo establece tiempos máximos: CRÍTICO en 4 días, ALTO en 27 días, MODERADO solo ajusta frecuencia de inspección.

¿Definir plazos según severidad mejora la respuesta ante hallazgos?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 4: Verificación de efectividad

Actualmente, las intervenciones se ejecutan, pero no se documenta si resolvieron la anomalía. El modelo incluye verificación posterior, comparando condición antes y después de intervenir.

¿Este seguimiento permite confirmar que las intervenciones son efectivas?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 5: Ajuste de frecuencias

Actualmente, las frecuencias de inspección son fijas. El modelo permite aumentarlas si se detectan anomalías repetidas, o reducir las si el equipo muestra condición estable.

¿Ajustar frecuencias según condición real optimiza los recursos de inspección?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 6: Procedimientos y formatos

El modelo incluye procedimientos paso a paso y formatos estandarizados para documentar desde la recepción del informe hasta la verificación de efectividad.

¿Contar con procedimientos y formatos estandarizados facilita la aplicación del modelo?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 7: Adaptabilidad

El modelo fue desarrollado para el mezclador industrial como caso de estudio. Sin embargo, su estructura permite aplicación en otros equipos rotativos.

¿El modelo puede adaptarse a otros equipos además del mezclador industrial?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

Pregunta 8: Recomendación

Considerando todos los aspectos evaluados anteriormente (flujo de trabajo, clasificación, plazos, verificación, ajuste de frecuencias, procedimientos y formatos):

¿Recomendaría implementar este modelo en la organización?

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Comentarios:

DATOS DEL EVALUADOR

Campo	Información
Nombre	
Cargo	
Empresa	
Años de experiencia en mantenimiento	
Fecha de evaluación	
Firma	