

# Implementation of a condition-based monitoring management system for the pasta preparation area of Trupal S.A. company based on the ISO-17359:2018 standard

Sol Rodriguez, M. Sc<sup>1</sup>, Daniel E. Granados, B.S.<sup>1</sup>, Beatriz C. Suarez<sup>1</sup>, B.S.

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c19588@utp.edu.pe, u18101322@utp.edu.pe, u17300556@utp.edu.pe

*Abstract– The objective of this work is to present an implementation of condition-based monitoring maintenance following the guidelines of ISO 17359:2018 standard in a specific area of the company TRUPAL S.A., in order to increase the availability of its machinery. For many years, TRUPAL S.A. has focused on a corrective maintenance and has tried to implement a based on condition monitoring maintenance assisted with third party companies, but the expected objectives, such as failure control of its machinery and availability above 90%, were not achieved. This work focuses only on the pasta preparation area (PPI) which has 120 pieces of equipment and all of them were be evaluated and verified according to the ISO 17359:2018 standard. In our cases, vibrational analysis and criticality analysis were performed as part of the implementation. At the end of the implementation, different tools were developed (AMFE matrices, routing tables and vibration analysis protocol) that allowed to improve the availability of the equipment, achieving up to 95.2% availability, which allowed a production growth of 2.3% monthly on average. The development of this document is intended to be a basis for other companies to implement this type of maintenance for improving the machinery management without requiring a considerable investment.*

*Keywords-- Condition-based monitoring, ISO 17359, Availability, Vibrational analysis, Predictive maintenance.*

# Implementación de un sistema de gestión de monitoreo por condición para el área de preparación de pasta de la empresa Trupal S.A. basado en la norma ISO-17359:2018

Sol Rodriguez, M. Sc<sup>1</sup>, Daniel E. Granados, B.S.<sup>1</sup>, Beatriz C. Suarez<sup>1</sup>, B.S.

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c19588@utp.edu.pe, u18101322@utp.edu.pe, u17300556@utp.edu.pe

**Resumen–** El presente trabajo tiene como objetivo implementar el mantenimiento de monitoreo bajo condición siguiendo los lineamientos de la norma ISO 17359:2018 en un área específica de la empresa TRUPAL S.A., para aumentar la disponibilidad de su maquinaria. La empresa TRUPAL S.A. por varios años se ha enfocado en un mantenimiento correctivo y ha realizado, junto con empresas terceras, implementar el área de mantenimiento basado en condición sin cumplir los objetivos esperados, como el control de fallos de sus maquinarias, que permita una disponibilidad por encima del 90%. Este trabajo se enfoca solo en el área de preparación de pastas (PPI) la cual cuenta con 120 equipos y todos ellos ingresaron a una evaluación y verificación en el marco de la norma ISO 17359:2018 aplicando el análisis vibracional y la evaluación de criticidad. Al finalizar la implementación, se desarrollaron distintas herramientas (matrices AMFE, tablas de ruteo y protocolo de análisis vibracional) que permitieron mejorar la disponibilidad de los equipos, logrando hasta un 95.2% de disponibilidad, lo que permitió un crecimiento de la producción de 2.3% mensual en promedio. El desarrollo del presente documento tiene como propósito ser una base para otras empresas de realizar la implementación de este tipo de mantenimiento, que no involucren un gran gasto y tienen efectos positivos sobre la maquinaria.

## I. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento industrial es un aspecto importante en las empresas para asegurar la conservación y disponibilidad de las máquinas de manera constante y eficaz, así como para mantener condiciones seguras de trabajo [1]. Las prácticas llevadas a cabo dentro de las actividades de mantenimiento deben tener como meta asegurar el mejor rendimiento de los equipos con la mínima interrupción posible [2]. En la industria, dependiendo del trabajo a realizar, se puede distinguir tres tipos de mantenimiento: preventivo, predictivo y correctivo. El mantenimiento correctivo está enfocado a la reparación de equipos parados por falla, el mantenimiento preventivo localiza daños antes que se produzca una parada del proceso de producción, y el mantenimiento predictivo implanta un procedimiento el cual consiste en pronosticar las fallas, y en el momento adecuado, gestionar las acciones correctivas [3].

Dentro del mantenimiento predictivo, se aplican aplica

técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas, por lo que es necesario emplear las técnicas más favorables para que se pueda detectar sus fallos a tiempo [4]. Las técnicas más usuales son el análisis de vibraciones, la termografía, el análisis por ultrasonido y el análisis de aceite [5]. Con todas las técnicas mencionadas se analizan las posibles fallas de las máquinas en actividad y esto aporta en la toma de decisiones sobre posibles actividades sin afectar el proceso de forma técnica y/o económica [6]. Adicionalmente, los mantenimientos predictivos han requerido la aplicación de metodologías complementarias como el Mantenimiento Productivo Total (TPM) o el Mantenimiento centrado en la Confiabilidad (RCM). Por ejemplo, Junior et al. [3] realizan una propuesta de implementación de herramientas del mantenimiento predictivo y el TPM (mantenimiento productivo total) para mejorar la eficiencia en plantas termoeléctricas. Según sus reportes obtenidos, determinaron la necesidad de realizar inspecciones periódicas utilizando el análisis de vibraciones, el análisis del aceite lubricante y la termografía como parte del mantenimiento predictivo. Como resultado de la aplicación, se detectaron las causas de las paradas constantes de sus equipos y con la aplicación del mantenimiento predictivo demostraron la mejoría de los indicadores usados como el MTBF (tiempo medio entre fallos) y el MTTR (tiempo medio de reparación), consiguiendo un ahorro estimado de US\$ 7 millones. Altaf Tarar [7] reportó que el mantenimiento predictivo podría apoyarse en otra estrategia como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), la cual engloba conocer la función de los equipos, fallas potenciales, riesgos asociados a las fallas y trabajar con sus siete principios básicos. Los resultados de Altaf Tarar [7] demostraron que, empleando la técnica de análisis de vibraciones en el marco de RCM, es posible mantener un funcionamiento sostenido de unos ventiladores empleados en una fábrica de pintura. Además, con esta metodología, se detectaron que las fallas más comunes son el desbalanceo, depósitos sucios, deterioro de juntas y desgaste de lubricantes. Luna Perez et al. [6] sugiere la introducción del concepto de mantenimiento 4.0, es decir el acoplamiento de base de datos para los sistemas de autodiagnóstico combinadas con plataformas de monitoreo con tecnología de la industria 4.0 (IoT). Ello implicaría que se considere el uso de sensores nuevos, combinación de redes inalámbricas e internet para

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCED).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCED).  
**DO NOT REMOVE**

transferencia de datos que podrían ir acopladas con las técnicas empleadas en el mantenimiento predictivo.

Actualmente, se ha reportado la estrategia de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) como una estrategia avanzada de mantenimiento. El CBM se basa en la data del monitoreo de condición; es decir, se toman medidas en base a la data de los análisis de vibración, emisión acústica, lubricantes y electricidad para predecir las posibles fallas en equipos y evalúa la distribución de fallas en el tiempo [8]. Tian et al. [9] aplicaron esta estrategia en componentes de turbinas de un parque eólico. La aplicación de estas estrategias demostró que se puede alcanzar una reducción de costos de mantenimiento mediante un estudio previo de simulación que permita predecir la aplicación de repuestos. Esta simulación se lleva a cabo mediante modelos de redes neuronales artificiales (ANN) y se concluye que el costo de mantenimiento podría reducirse en un 44.42%, de US\$ 833.41 diarios a US\$ 577.08 diarios. Hwang et al. [10] aplicó los criterios de CBM a una batería de producción de una planta de líquidos de gas natural. El CBM propuesto para la batería de producción podría analizar los datos obtenidos a través de varios sensores para identificar anomalías en el equipo, diagnosticar condiciones de falla, predecir el estado de deterioro del equipo y brindar soporte de mantenimiento oportuno. Para llevar a cabo esta implementación, se construyó una arquitectura que englobe el registro de anomalías y registro de sensores vibratorios. Con esto, un operador puede tomar la mejor decisión para organizar las actividades de mantenimiento.

En base al CBM, actualmente existe la norma ISO 17359 “Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines” que proporciona un diagrama de flujo del procedimiento de monitoreo de condición, donde se indican los procedimientos desde la selección del equipo (monitoreo) hasta las acciones de mantenimiento requeridas determinadas, pasando por procesos que se ajustan a las capas de OSA-CBM (arquitectura de sistema abierto) [11]. Según la norma, las ubicaciones de medición deben elegirse para brindar la mejor posibilidad de detección de fallas. Los puntos de medición deben identificarse de manera única y se recomienda el uso de una etiqueta permanente o marca de identificación. Los factores a tener en cuenta son: seguridad, alta sensibilidad, reducción de sensibilidad de factores externos, atenuación de pérdida de señal, accesibilidad, ambiente y costo [5], [12]. Los monitoreos y análisis de vibraciones han sido reportados en estudios previos [12]–[14] y articulados para poder ser aplicados de forma más eficiente, sin embargo, es importante que existan más estudios aplicados a diversos sectores industriales para darle una mejor perspectiva a la aplicación de esta norma.

La presente investigación está orientada en detectar a tiempo las posibles fallas de equipos y aumentar la disponibilidad de estos en el área de producción de papel liner y papeles especiales de la empresa TRUPAL empleando el mantenimiento por condición según la norma ISO 17359. En TRUPAL S.A., en los últimos años, la gestión de mantenimiento se basó en el mantenimiento correctivo

generando un incremento de costos debido a las continuas paradas. Ello ha generado que los niveles de disponibilidad de las máquinas disminuyan, por lo cual se ha presentado un incumplimiento con la fecha de entrega de los pedidos. Además, la empresa TRUPAL S.A. por años ha contratado a empresas terceras para la evaluación predictiva de su maquinaria, el cual no se ha obtenido los resultados esperados como el control del estado de sus maquinarias para detectar a tiempo sus posibles fallas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es implementar un sistema de gestión de mantenimiento a través del monitoreo por condición bajo la norma ISO 17359 en el área de preparación de pasta de la empresa TRUPAL para mejorar la disponibilidad de su maquinaria. La metodología de la norma ISO 17359:2018 sugiere seguir 8 etapas correspondientes a: Recolección documental, Entrenamiento, Revisión y actualización de equipos, Revisión de confiabilidad y criticidad, Selección del mantenimiento adecuado, Selección del método de medición, Recolección de datos y análisis de información, y Determinación de las acciones de mantenimiento. Tras la implementación se evaluó el impacto de ésta en la productividad del área de pastas.

## II. METODOLOGÍA

La implementación del modelo de mantenimiento bajo condición, se realizó basado en el procedimiento reportado en la norma ISO 17359:2018. Esta implementación se realizó en cinco etapas, sobre las cuales se realizaron evaluaciones para la sostenibilidad del proyecto [15]. La implementación se delimitó a todo los equipos y maquinarias del área de preparación de pasta (PP1). En total se analizaron 120 máquinas entre bombas, reductores, motores y máquinas especiales de dicha línea de producción. Se tomaron como criterio el tiempo promedio entre fallas y el tiempo medio de restauración, para que la disponibilidad de las máquinas sea óptima alineándose a los procedimientos de la norma ISO 17359.

Etapa 1. Recolección documental sobre las tecnologías predictivas

De acuerdo a los reportes históricos, TRUPAL S.A. ha buscado llevar la gestión de mantenimiento predictivo a empresas terceras, logrando resultados poco satisfactorios. En esta etapa se tomó el histórico de condición del año 2020 que reúne datos de la cantidad de equipos que se encuentren en OBSERVACIÓN y ALERTA, procediendo a realizar un análisis de la condición de los equipos. Además, se tomará como histórico, el reporte de disponibilidad de la maquinaria del periodo 2020, para luego realizar un comparativo con los resultados puesto a la implementación.

Etapa 2. Entrenamiento

Luego de revisar los historiales de la maquinaria del periodo 2020, se empezó la capacitación al personal que está a

cargo. Se realizaron 2 cursos llevados en la semana 2, 3 y 4 del proyecto, respectivamente:

- Mantenimiento Basado en Condición según el estándar ISO 17359
- Análisis de Vibraciones CAT-I

### Etapa 3. Revisión y actualización de equipos

La empresa TRUPAL S.A. cuenta con dos líneas de producción: la línea MP1 (maquina papelera 1) y línea MP2 (máquina papelera 2). El área donde se realizará la implementación será el área de preparación de pastas de la línea MP1, la cual cuenta con 120 equipos operativos. Luego de pasar por la revisión de históricos se procederá a la identificación de equipos agrupándolos según los siguientes criterios:

- Línea: Es la columna en donde identifica a la maquina a la cual pertenece.
- Subsistema: Zona del área en la planta de preparación de pasta.
- Equipo: Nombre del activo.
- SAP: Código con el que es reconocido el Activo en el programa SAP.
- TAG: Código abreviado del activo, define su ubicación
- Familia del Activo: Al tipo de familia a la que pertenece: motor eléctrico, bomba centrifuga, reductor y screen.

### Etapa 4. Revisión de confiabilidad y criticidad.

Una vez identificados y codificados los equipos se procederá a determinar la criticidad de cada uno de ellos. En la matriz de criticidad se tomará en cuenta 4 criterios: producción, calidad, mantenimiento y seguridad. En cada criterio se analizará ciertos factores que serán evaluados del 1 al 5 (en donde 1 será considerado como valor menor y 5 como valor mayor). En cuanto a la producción se evaluará: porcentaje de marcha, equipo auxiliar e influencia sobre el proceso.

Para el criterio de calidad se evaluará los factores de influencia en la calidad del producto y horas de paro por mes. En el criterio de mantenimiento se calificará el costo de mantenimiento y el tiempo medio entre fallos (MTBF). Por último, el criterio de seguridad tendrá como factor el punto de influencia de la seguridad del medio ambiente. Luego de dar las valoraciones se realizará el ponderado respectivo para cada equipo. Los valores de criticidad que se han considerado en la Fig. 1. Para la asignación de puntuación de cada factor se tomó en cuenta los valores y sus respectivas descripciones de evaluación, según la Fig. 2.

1 -7: No criticidad	
7-10: Poca Criticidad	
11-17. Criticidad Media	
18-25. Criticidad Considerable	
26 o +. Alta Criticidad	

Fig. 1. Valores para el cuadro de criticidad (elaboración propia).

### Etapa 5. Selección del mantenimiento adecuado

Luego de haber realizado el análisis de criticidad de los equipos se procederá a determinar cuáles ingresaran al programa de mantenimiento predictivo. Se realizará el análisis AMFE (análisis del modo y efectos de falla) por familia de equipos, el cual ayuda a estimar y predecir los fallos de cada uno de ellos y así poder realizar un análisis para asignar el tipo de mantenimiento y posteriormente la técnica a utilizar.

### Etapa 6. Selección del método de medición

Según los modos de fallos y sus parámetros expresados en la fase anterior, se definirá por equipo la técnica de mantenimiento predictivo a utilizar que será el análisis de vibraciones. Para el control y toma de datos se generaron rutas según la ubicación de los equipos en el área de pastas.

### Etapa 7. Recolección de datos y análisis de información

Acorde a la implementación en la línea MP1 del área de pastas de la empresa TRUPAL S.A., se trabajará con técnicas establecidas según el análisis del AMFE. El análisis de vibraciones se realizó con un acelerómetro de tipo triaxial, el cual por medio de una base magnética se fija a la superficie, en donde el elemento rodante se encuentra y se procede a realizar la toma de lectura. El colector de datos graba la señal del sensor. El resultado es una señal en forma de onda, la cual puede ser simple o compleja. Adicionalmente, se utilizó un estroboscopio, el cual dará el resultado de las RPM (revoluciones por minuto) a las que se encuentra trabajando el equipo a monitorear.

Una vez realizado la recolección de datos, estos quedan grabados de manera automática en el colector, luego se procede a realizar la descarga de la información al software NEST 3.0. En la tabla de valores de ruteo se tomará en cuenta los siguientes parámetros a medir: velocidad, aceleración, desplazamiento o factor de defecto. Estas valoraciones se darán en cada punto-ubicación del equipo de la cual tendrá 3 tipos de posiciones de medida: axial, horizontal y vertical. En el parámetro de aceleración se considerará la valoración mayor a 1 como equipo con posible fallo. Para finalizar, el espectro es un gráfico que nos ayudará a identificar la falla de acuerdo a la fuente de vibración.

### Etapa 8: Determinar acciones de mantenimiento

Con los análisis e informes de cada equipo, se procederá a determinar acciones. Estas acciones o tareas serán asignadas por el planificador, auxiliar de planificación y supervisor mecánico.

### Etapa 9: Revisión

Luego de realizar la determinación de acciones y la ejecución de ellos, se procedió con la revisión de todo el proceso por parte de la jefatura. Se realizó un diagnóstico de disponibilidad y se comparó con los datos históricos.

NIVEL DE IMPACTO	PUNTAJE (VALOR)	PRODUCCION			CALIDAD		MANTENIMIENTO		SEGURIDAD
		% DE MARCHA	EQUIPO AUXILIAR	INFLUENCIA SOBRE EL PROCESO	INFLUENCIA EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO	HORAS DE PARO POR MES	COSTO DE MANTENIMIENTO	MTBF	INFLUENCIA EN LA SEGURIDAD DEL MEDIO AMBIENTE
MUY ALTA	5	se da esta valoracion cuando el equipo no esta operativo	El equipo no cuenta con equipo auxiliar	la influencia es al 100% sobre el proceso	la influencia es al 100% sobre la calidad del producto	El equipo cuenta con paradas de 8 a 10 en el mes	El costo de mantenimiento oscila entre 7500 a 10000	El tiempo medio entre fallos es entre 40 a 50	cualquier tipo de derrame es emergencia (es altamente probable genere el cierre de fabrica)
ALTA	4	cuando el equipo trabaja a un 75% de su capacidad	el equipo cuenta con un equipo auxiliar	la influencia es al 75% sobre el proceso	la influencia es al 75% sobre la calidad del producto	El equipo cuenta con paradas de 5 a 7 en el mes	El costo de mantenimiento oscila entre 5000 a 7499	El tiempo medio entre fallos es entre 30 a 29	Los derrames afectan al medio ambiente y su limpieza requiere de agentes especializados
MEDIO	3	cuando el equipo trabaja a un 50% de su capacidad	el equipo cuenta con dos equipo auxiliar	la influencia es al 50% sobre el proceso	la influencia es al 50% sobre la calidad del producto	El equipo cuenta con paradas de 3 a 4 en el mes	El costo de mantenimiento oscila entre 2500 a 4999	El tiempo medio entre fallos es entre 20 a 29	cualquier tipo de derrame afecta al medio ambiente y su limpieza toma mas de 1 a 2 dias con el equipo de emergencia de la empresa
BAJA	2	cuando el equipo trabaja a un 25% de su capacidad	el equipo cuenta con tres equipo auxiliar	la influencia es al 25% sobre el proceso	la influencia es al 25% sobre la calidad del producto	El equipo cuenta con paradas de 1 a 2 en el mes	El costo de mantenimiento oscila entre 1500 a 2499	El tiempo medio entre fallos es entre 10 a 19	cualquier tipo de derrame afecta al medio ambiente y su limpieza toma mas de 1 dia con el equipo de brigada de la empresa
MUY BAJA	1	cuando el equipo no presenta ningun problema en el funcionamiento	el equipo cuenta con cuatro equipo auxiliar	no existe una influencia directa sobre el proceso	no existe una influencia directa sobre la calidad del producto	El equipo cuenta con cero paradas en el mes	El costo de mantenimiento oscila entre 0 a 1499	El tiempo medio entre fallos es entre 0 a 9	Cualquier tipo de derrame es de impacto medio para el medio ambiente y su limpieza es de manera inmediata

Fig. 2. Descripción de valoración de criticidad (elaboración propia).

Finalmente, se presentó un conjunto de acciones tomadas y resultados obtenidos de acuerdo a la implementación.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la primera etapa de la investigación, se realizó un diagnóstico sobre la situación de los equipos de la línea PP1 de la empresa TRUPAL S.A. De acuerdo a lo mostrado en la Fig. 3a se visualiza que, al final del año 2020, de un total de 131 máquinas del área de preparación de pastas (PP1), nueve (09) equipos quedaron en condición de “ALERTA”, un (01) equipo se catalogó en “EMERGENCIA”, treinta y dos (32) equipos se clasificaron en “OBSERVACION”, setenta (70) equipos se clasificaron en “BUEN ESTADO” y veinte (20) equipos se etiquetaron en condición de “NO PROGRAMADOS”. Por otro lado, tras un estudio preliminar sobre la disponibilidad de los equipos (Tabla 1), se aprecia que la DISPONIBILIDAD varía entre 50% y 89.7% en el periodo del 2020. La Fig. 3b muestra las cantidades de los equipos por familia de activos, observando que 60 equipos estarían agrupados dentro del concepto de motor eléctrico.

Tras ello, se continúa con la etapa de entrenamiento, donde se realizaron los cursos para el desarrollo de la implementación. Los puestos que participaron se encuentran dentro del área de mantenimiento (Fig.4) con las siguientes responsabilidades:

- Jefatura de mantenimiento: Define y ejecuta decisiones finales en cuanto a resultados e informes presentados de acuerdo al avance de la implementación.

- Planificador y coordinador de mantenimiento: Analiza información que se obtiene del informe presentado sobre las rutinas ejecutadas, retroalimenta el mantenimiento en general y realiza los cambios necesarios en el proceso.
- Auxiliar de planificación: Se encarga de ver el stock de los repuestos de acuerdo a la programación del mantenimiento de cada equipo.
- Supervisor Mecánico: Supervisa el cumplimiento de las reparaciones de acuerdo al informe entregado por el analista.
- Encargado de mantenimiento basado en condición (analista de predictivo): Responsable de analizar datos obtenidos en el monitoreo de condición, evalúa parámetros obtenidos y emite informe de diagnóstico de la condición de los equipos.
- Técnicos de ruteo: Realiza el cumplimiento y recaudación de datos de la línea 1.

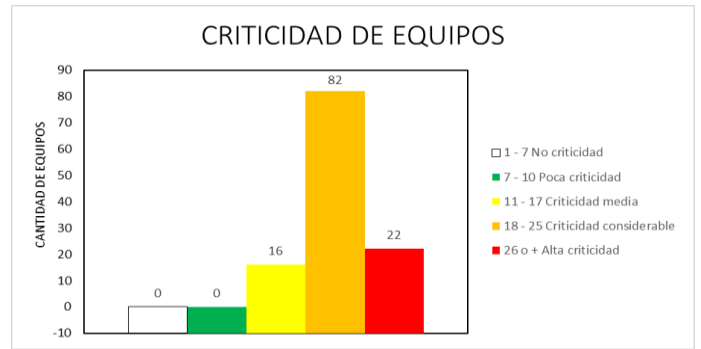
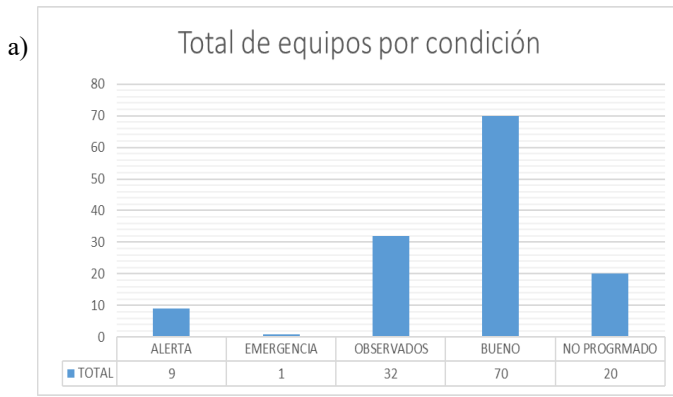


Fig. 5. Cantidad de equipos según criticidad.

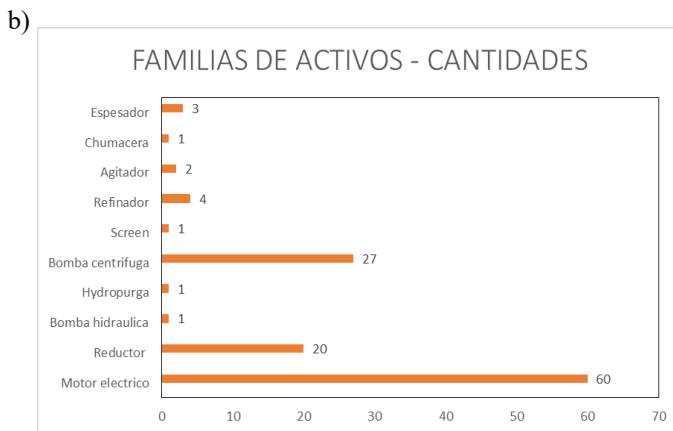


Fig. 3. a) Cantidad de equipos totales por condición durante el año 2020. b) Familia de activos.

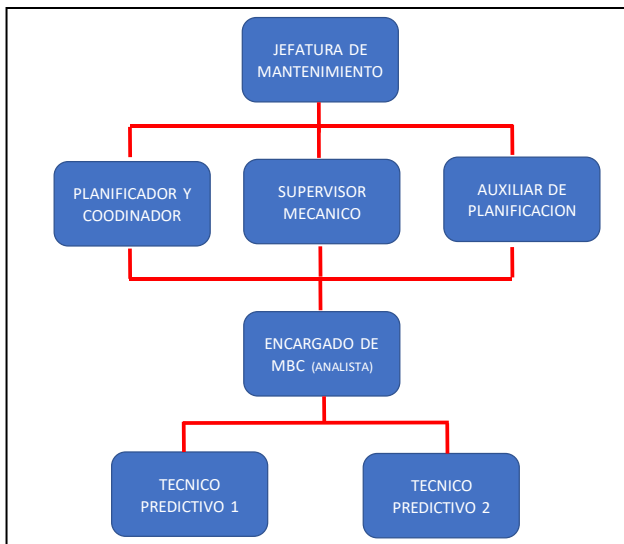


Fig. 4. Organigrama del área de mantenimiento.

Para el personas del área de mantenimiento, se realizaron dos cursos relacionados a la aplicación del análisis vibracional como parte del estándar del mantenimiento basado en condición:

1) Mantenimiento Basado en Condición según el estándar ISO 17359:2018:

El objetivo del curso es aplicar criterios estandarizados de planificación, ejecución y revisión de la estrategia conocida como mantenimiento condicional. Con este curso el personal tiene la capacidad de:

- Asignar de forma correcta una estrategia condicional para la verificación de modos de fallo.
- Con los criterios correctos, definir el periodo de inspecciones.
- Emplear los pasos de la norma ISO 17359 para la implementación.
- Proyectar actividades condicionales utilizando las herramientas de análisis propuestas por la normativa.
- Considerar y aplicar la estrategia de diagnóstico basado en reglas en casos básicos.
- Analizar los pronósticos de fallos.
- Verificar la viabilidad económica de la estrategia.

2) Análisis de Vibraciones-CAT-I:

El curso se enfocó en colección periódica de datos a un canal y análisis para el programa de mantenimiento basado en la condición. El personal estudió la relación entre el espectro de vibración y la forma de onda. Tienen la base para analizar y coleccionar datos de vibración, así como también el entendimiento en análisis de vibraciones y monitoreo de la condición. Cuentan con una excelente comprensión de las bases, y pueden tomar las medidas correctamente y analizan espectros de vibración.

En la tercera etapa, se procede a la revisión y actualización de equipos, tal como sugiere la norma. Por ello, los equipos de la línea de preparación de pasta PP1 se catalogaron según el tipo de trabajo (Pulper 9d, Agua cruda de OCC y Pasta de OCC), y se empleó la codificación SAP,

donde se muestra su ID y código abreviado de cada equipo (TAG). Un ejemplo de ello se puede observar en la Fig. 6 para ciertos equipos.

Asimismo, se ha evaluado la criticidad de los equipos de acuerdo a los criterios señalados en la Fig. 1 y el conteo de equipos por criticidad en la Fig. 5. Para ello, se evaluaron los criterios de producción, calidad, mantenimiento y seguridad. La Fig. 4 resume los niveles de criticidad de los equipos, donde se aprecian que 22 equipos con “ALTA CRITICIDAD”, 82 equipos con “CRITICIDAD CONSIDERABLE” y 16 equipos con “CRITICIDAD MEDIA”, mientras que CERO equipos reportaron “POCA CRITICIDAD” o “NO CRITICIDAD”. Con la implementación de la ISO 17359 se busca llegar a CERO en condición “NO PROGRAMADOS”, “ALERTA” y “EMERGENCIA” y que todos estén bajo un monitoreo mediante el análisis de vibraciones. De acuerdo a las características de los equipos, se concluye que éstos pasarán por una supervisión mediante análisis vibracionales, asignando dos rutas para la toma de datos para evaluar el estado de los equipos. La toma de datos se realiza con el colector y el acelerómetro, cuyos datos son descargados en el programa NEST 3.0, donde se reportan la tabla de valores de ruteo, valores de tendencia y el espectro, como se visualiza en la Fig. 7. Mediante el espectro vibracional se puede apreciar la presencia de irregularidades por las anomalías de la onda [16]. En el análisis vibracional, se determina que 70 equipos se encuentran en estado “BUENO”, 37 equipos en estado “OBSERVACION”, 12 equipos en estado “ALERTA” y 1 en “EMERGENCIA”. En base a la condición, se detallan las acciones a tomar por cada estado:

- **EQUIPOS ESTADO BUENO:** Se continuará con la ruta ya designada en su mismo período mensual.
- **EQUIPOS ESTADO OBSERVACION:** Se continuará con la ruta ya designada en su mismo período mensual.

- **EQUIPOS ESTADO ALERTA:** Se deriva a mantenimiento correctivo por programación, y se continuará con la medición en la ruta designada de manera quincenal hasta que se haya realizado el mantenimiento correctivo. Luego del mantenimiento, se reincorporará a su monitoreo habitual.

- **EQUIPOS ESTADO EMERGENCIA:** Se deriva a un mantenimiento correctivo inmediato, luego del mantenimiento se reincorporará a su monitoreo habitual.

Tras la evaluación de criticidad de los equipos, se realiza la matriz de análisis del modo y efecto de falla (AMFE) por familia de equipos para estimar y predecir los fallos (Fig. 8). En la Fig.9a se muestra el análisis mensual de los tiempos de paradas por máquinas en general. Con la toma de tiempos de paradas se pudo deducir los tiempos de operación y averías con el cual se hallaron los indicadores del MTBF (tiempo medio entre fallos) y el MTTR (tiempo medio para reparar) deducidos, y con ello la disponibilidad en general de las maquinarias. Asimismo, con la tendencia mostrada en la Fig. 9b podemos observar la evolución del medio tiempo entre fallas (MTBF), en el último mes se puede visualizar que ha disminuido y esto garantiza la implementación realizada.

MAQUINARIAS EN EL ÁREA DE PASTAS						
Item	Linea	Subsistema	Equipo	Sap	Tag	Familia de activo
1	MP01	Pulper 9d	MOTOR - MOTOREDUCTOR TRANSPORTADOR PACAS	10011797	01MTAP01	Motor electrico
2	MP01	Pulper 9d	REDUCTOR - MOTOREDUCTOR TRANSPORTADO PACA	10011798	01TAP01	Reductor
3	MP01	Pulper 9d	MOTOR HYDRAPULPER 9D	10009903	01MPC02	Motor electrico
4	MP01	Pulper 9d	REDUCTOR PULPER 9D	10009904	01PC02	Reductor
5	MP01	Pulper 9d	MOTOR UNIDAD LUBRICACION PULPER 9D	10009907	01MPC02A	Motor electrico
6	MP01	Pulper 9d	BOMBA UNIDAD LUBRICACION PULPER 9D	10009906	01PC02A	Bomba hidraulica
7	MP01	Pulper 9d	MOTOR HYDRAPURGE - 01MHY08	10009933	01MHY08	Motor electrico
8	MP01	Pulper 9d	DESINTEGRADOR HYDRAPURGE XVK 42 - 01HY08	10009932	01HY08	Hydropurga
9	MP01	Pulper 9d	MOTOR MOTOREDUCTOR TROMMEL 01	10009936	01MTR10	Motor electrico
10	MP01	Pulper 9d	REDUCTOR MOTOREDUCTOR TROMMEL 01	10009937	01TR10	Reductor

Fig. 6. Ejemplo de listado de equipos del área de preparación de pastas.

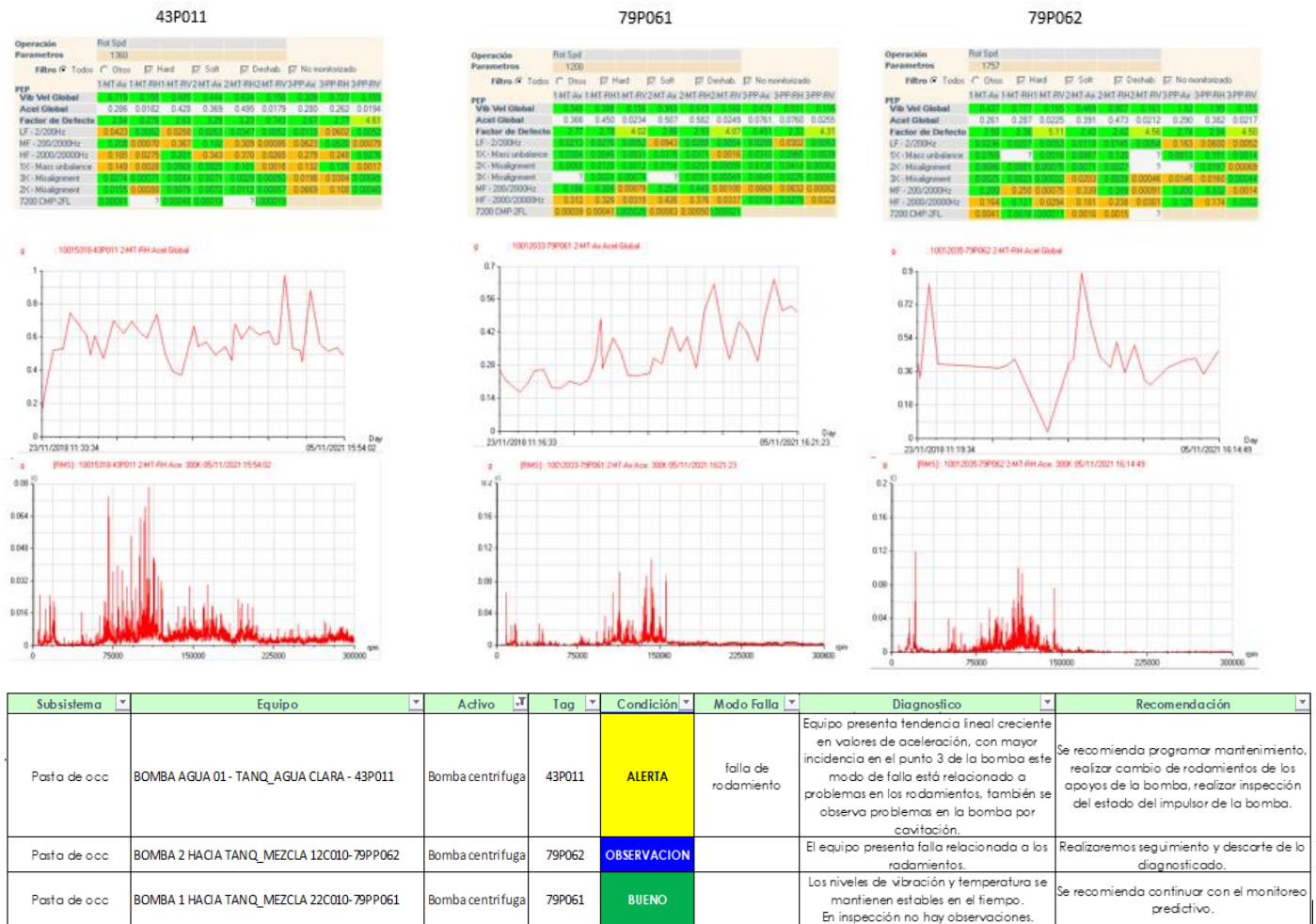


Fig. 7. Ejemplo de tablas de ruteo, tendencias y espectros. En la parte inferior se muestra un ejemplo de tabla de condición de equipos.

AMFE para MBC - Bomba Centrífuga - Hidraulica								
Tipo de Equipo:	Síntoma reflejado o cambio de parametro							
Tipos de Fallas	Medidas de desplazamiento	potencia	Velocidad	Vibraciones	Temperatura	Tiempo de Parada	Partículas en Aceite	Fuga de Aceite
Daño en ábabe de rotor o impulsor	*	*	*	*	*	*	*	*
Daño en sellos	*	*	*	*	*	*	*	*
Excentricidad del rotor	*	*	*	*	*	*	*	*
Daño de los rodamientos	*	*	*	*	*	*	*	*
Desgaste de los rodamientos	*	*	*	*	*	*	*	*
Deformación del rotor	*	*	*	*	*	*	*	*
Desbalance	*	*	*	*	*	*	*	*
Desalineamiento	*	*	*	*	*	*	*	*

AMFE para MBC - Screen - Hydropurga								
Tipo de Equipo:	Síntoma reflejado o cambio de parametro							
Tipos de Fallas	Medidas de desplazamiento	potencia	Velocidad	Vibraciones	Temperatura	Tiempo de Parada	Partículas en Aceite	Fuga de Aceite
Daño en ábabe de rotor o impulsor	*	*	*	*	*	*	*	*
Daño en sellos	*	*	*	*	*	*	*	*
Excentricidad del rotor	*	*	*	*	*	*	*	*
Daño de los rodamientos	*	*	*	*	*	*	*	*
Desgaste de los rodamientos	*	*	*	*	*	*	*	*
Deformación del rotor	*	*	*	*	*	*	*	*
Desbalance	*	*	*	*	*	*	*	*
Desalineamiento	*	*	*	*	*	*	*	*

Fig. 8. Matriz AMFE para bomba centrífuga y Screen Hydropurga

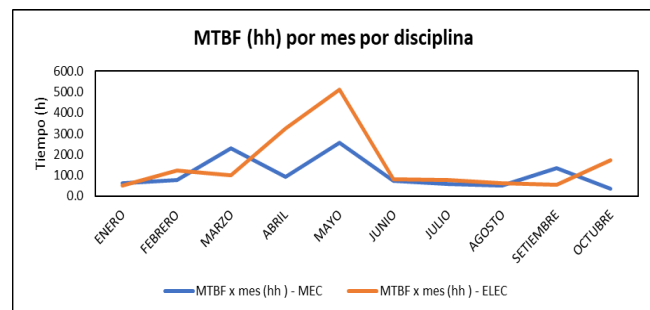
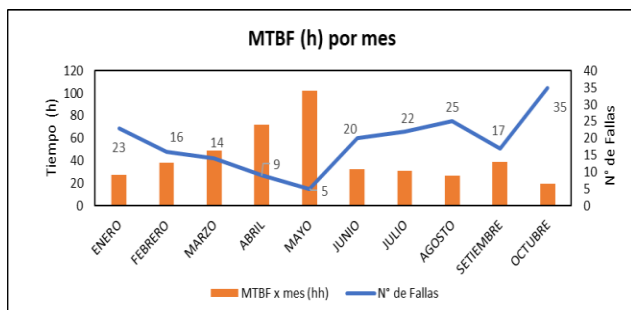


Fig.9. a) MTBF (en horas) por mes; b) MTBF (en horas) por mes por disciplina.



Tabla 1: Cuadro resumen de las máquinas PP1 en el periodo 2021. Se muestra, a modo de comparación, la disponibilidad calculada en el periodo 2020.

Máquinas PP1	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Tiempo Disponible Calendario (h)	744	672	744	720	744	720	744	744	744	744		
Feriado (h)	24.00	0.00	0.00	0.00	24.00							
Tiempo programado (h)	19.80	0.00	0.00	0.00						2.17		
Tiempo Programado Mantenimiento (h)	0.00	12.00	0.00	9.67	167.88	9.00						
Tiempo Cambio de Calidad (h)	0.00	2.92	0.00	0.00		3.25			1.42			
Tiempo Motivos Externos	0.00	4.83	3.33	1.42		2.84			2.54			
Paradas Falta de Pasta	13.43	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00		
Paradas Papeleros	10.60	9.92	35.73	20.83	35.20	10.78	16.65	31.35	22.07	16.91		
Tiempo Paradas Falla Mecánico (h)	18.03	17.47	6.05	36.50	4.08	26.17	29.88	18.60	15.88	28.62		
Tiempo Paradas Falla Eléctrico (h)	26.30	13.62	7.43	2.33	1.25	7.80	13.58	17.57	36.90	3.25		
Otros	0.00	2.18	2.82	0.37	1.02	3.12	2.57					
N° Paradas Falta de Pasta	12	0	0	1	0	0	1	0	0	0		
N° Paradas Falla Mecánica	10	8	3	7	2	9	12	14	5	21		
N° Paradas Falla Eléctrica	13	5	7	2	1	8	9	11	12	4		
N° Paradas Otros		3	4		2	3	1					
Tiempo de operación (h)	676.17	642.33	704.94	686.08	516.92	694.13	726.47	712.65	717.97	724.92	0.00	
Tiempo de Avería (h)	44.33	33.27	16.30	39.20	6.35	37.09	46.03	36.17	52.78	31.87	0.00	
N° de fallas	23.00	16.00	14.00	9.00	5.00	20.00	22.00	25.00	17.00	35.00	0.00	
<b>MTBF x mes (hh)</b>	<b>27.47</b>	<b>38.07</b>	<b>49.49</b>	<b>71.88</b>	<b>102.11</b>	<b>32.85</b>	<b>30.93</b>	<b>27.08</b>	<b>39.13</b>	<b>19.80</b>	<b>0.00</b>	
<b>MTTR x mes</b>	<b>1.93</b>	<b>2.08</b>	<b>1.16</b>	<b>4.36</b>	<b>1.27</b>	<b>1.85</b>	<b>2.09</b>	<b>1.45</b>	<b>3.10</b>	<b>0.91</b>		
<b>DISPONIBILIDAD 2021</b>	<b>93%</b>	<b>95%</b>	<b>98%</b>	<b>94%</b>	<b>99%</b>	<b>95%</b>	<b>94%</b>	<b>95%</b>	<b>93%</b>	<b>96%</b>		
<b>DISPONIBILIDAD 2020 (diagnóstico)</b>	<b>65.10%</b>	<b>83.30%</b>	<b>88.70%</b>	<b>87.90%</b>	<b>50%</b>	<b>74.10%</b>	<b>82.20%</b>	<b>89.20%</b>	<b>58.70%</b>	<b>84.20%</b>	<b>73.70%</b>	<b>80.80%</b>
Tiempo de operación (MEC)	649.89	626.53	694.69	683.38	514.65	683.21	710.32	695.08	681.07	721.67	0.00	
Tiempo de operación (ELEC)	658.14	622.68	696.07	649.21	511.82	664.84	694.02	694.05	702.09	696.30	0.00	
MTBF x mes (hh) - MEC	63.20	76.10	229.50	92.40	255.30	73.00	56.70	48.30	133.00	33.00	0.00	
MTBF x mes (hh) - ELEC	48.60	121.80	98.40	323.40	510.60	82.10	75.60	61.50	55.40	173.30	0.00	

Tabla 2: Producción alcanzada por mes en el año 2021

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre
<b>Producción de papel liner (toneladas)</b>	6542.3	6354.2	7012.2	6974.4	5663.6	6915.8	7683.6	7540.9	7303.3	8062.9

En la Tabla N°1 se muestra el resumen de los números de falla, tiempos programados, tiempos de operación, tiempos de avería y disponibilidad. Se aprecia que, durante el tiempo de validación de la implementación la disponibilidad se mantuvo al 95% en promedio, considerablemente superior al periodo del año 2020. A consecuencia de ello, en la Tabla N°2. se puede observar que los niveles de producción han incrementado de manera sostenida en 2,3% en promedio entre los meses de enero y octubre del año 2021, alcanzando el punto más alto en el último mes de análisis. Los valores de tiempo entre fallas han disminuido, lo que indica una reducción de tiempos muertos, que tendría relación con los tiempos que se empleaban anteriormente para aplicar mantenimientos de manera no óptima.

La aplicación de un mantenimiento predictivo, que actúe de manera proactiva se ha vuelto un tema de gran importancia, aunque, según manifiesta Wagner et al. en su recopilación de experiencias [17], es difícil encontrar personal con el conocimiento para un proceso de implementación y la complejidad que cada empresa tiene dentro de su cadena pro-

ductiva. Palchevkiy et al. [18] rescatan que el mantenimiento basado en condición requiere un diagnóstico importante, el cual se debe lograr en base al análisis de las maquinarias, rescatando el análisis vibracional y el análisis de lubricantes acoplado a un algoritmo de seguimiento. Al-Obaidi [15] determinó que el mantenimiento bajo condición junto con la inspección y análisis vibracional (basado en la norma ISO17359) ayudó a detectar la presencia de cavitaciones en bombas.

La implementación de una estrategia de monitoreo bajo condición ha demostrado ser una estrategia de mantenimiento que genera impactos positivos con un adecuado costo-beneficio [19]. Por otro lado, las estrategias de mantenimiento predictivo recopilan un gran volumen de data de diversos análisis y ensayos, los cuales pueden ser sistematizados en algoritmos o sistemas de análisis (IA, big data), por lo que en el futuro se espera que la evolución de los mantenimientos vayan asociados a la conexión entre sistemas [20]. En conclusión, se demuestra que el mantenimiento bajo condición

es una estrategia que permite incrementar la disponibilidad de equipos, mientras que el análisis vibracional es una técnica que permite realizar monitoreos adecuados para evaluar la condición de equipos. Para los siguientes periodos en la empresa TRUPAL SA, se espera trasladar el éxito de esta estrategia a otros sectores de la empresa para mejorar los indicadores de productividad.

### III. CONCLUSIONES

El área de preparación de pastas de la empresa TRUPAL S.A. se ha visto beneficiada con la implementación del mantenimiento bajo condición según la norma ISO 17359:2018. Se comprobó que la gestión de este tipo de mantenimiento y control puede aumentar la disponibilidad de la maquinaria, y así en consecuencia llegar a rangos de productividad nunca antes alcanzados. Es por ello que en el mes de octubre 2021 se llegó a batir un récord de producción con 8063 toneladas de papel liner, demostrando así que este tipo de implementación si es beneficioso para la empresa y justifica su inversión. El esfuerzo de llevar a cabo la implementación se logró gracias el compromiso de cada trabajador involucrado en la gestión. Por otro lado, realizar un análisis de criticidad en los equipos apoya a verificar la importancia y estado de cada una de ellas, y permite establecer una jerarquía en ellas para poder realizar una elección de mantenimiento adecuado para facilitar el proceso de implementación. El empleo de herramientas como el análisis vibracional, la categorización de equipos y el empleo de la matriz AMFE son cruciales para dar seguimiento a los equipos y escoger la mejor estrategia de mantenimiento. Especialmente, en este trabajo la implementación se apoyó en la técnica del análisis de vibraciones debido a que ayuda a poder detectar de manera anticipada los modos de fallo en su etapa incipiente. De este modo, se gestiona el mantenimiento más adecuado, alargando la vida útil del equipo y, con ello, su disponibilidad. La toma de datos se facilita con la asignación de rutas por ubicación de equipos, el cual realizando una evaluación correcta se puede optimizar tiempos en cuanto a la toma de ellos. Al finalizar el mes de octubre 2021, se observó se reducen los tiempos muertos y paradas innecesarias y consiguiendo una disponibilidad superior al 90%, lo que trajo como consecuencia un aumento nunca antes reportado de la productividad.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Universidad Tecnológica del Perú por el apoyo

### REFERENCIAS

[1] E. Bernal, M. Spiriyagin, and C. Cole, "Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 4–24, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2875160.

[2] S. Grobbelaar and J. K. Visser, "Determining the cost of predictive component replacement in order to assist with maintenance decision-making," *South African J. Ind. Eng.*, vol. 26, no. May 2015, pp. 150–162, 2015, doi: 10.14341/conf05-08.09.22-132.

[3] M. Fonseca-Junior, U. Holanda-Bezerra, J. Cabral-Leite, and T. L. Reyes-Carvajal, "Programa de gestión de mantenimiento a través de la implementación de herramientas predictivas y de TPM como contribución a la mejora de la eficiencia energética en plantas termoeléctricas," *DYNA*, vol. 82, no. 194, pp. 139–149, 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n194.47642.

[4] W. Olarte, M. Botero, and B. A. Cañon, "ANÁLISIS DE VIBRACIONES: UNA HERRAMIENTA CLAVE EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO Analysis of vibrations: a key tool in the predictive maintenance," *Sci. Tech. Sci. Tech. Año XVI*, vol. 45, no. 45, pp. 219–222, 2010.

[5] L. Fumagalli, E. Jantunen, M. Garetti, and M. Macchi, "Diagnosis for improved maintenance services: Analysis of standards related to condition based maintenance," *Eng. Asset Lifecycle Manag. - Proc. 4th World Congr. Eng. Asset Manag. WCEAM 2009*, no. September, pp. 288–297, 2009, doi: 10.1007/978-0-85729-320-6\_34.

[6] M. Á. L. Pérez, I. B. Piña, and G. V. Álvarez, "Diseño de una metodología de mantenimiento predictivo para asegurar procesos de producción de la industria 4.0," *South Florida J. Dev.*, vol. 2, no. 1, pp. 1009–1017, 2021, doi: 10.46932/sfjdv2n1-074.

[7] M. A. Tarar, "Study Reliability Centered Maintenance (RCM) of Rotating Equipment through Predictive Maintenance," no. March 2014, 2014, doi: 10.15242/iee.e0314595.

[8] W. Liu, B. Tang, and Y. Jiang, "Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1414–1418, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.01.006.

[9] Z. Tian, T. Jin, B. Wu, and F. Ding, "Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1502–1509, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.10.028.

[10] H. J. Hwang, J. H. Lee, J. S. Hwang, and H. B. Jun, "A study of the development of a condition-based maintenance system for an LNG FPSO," *Ocean Eng.*,

- vol. 164, no. December 2017, pp. 604–615, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.004.
- [11] International Organization for Standardization, “Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines,” 2018. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:17359:en>.
- [12] J. Robichaud and P. Eng, “Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis,” *Bretech Eng. Ltd*, pp. 1–10, 2009, [Online]. Available: [http://www.hdutil.com.br/site/arquivos/manutencao/analise de vibracoes/ReferenceStandardsforVibrationMonitoring andAnalysis.pdf](http://www.hdutil.com.br/site/arquivos/manutencao/analise%20de%20vibracoes/ReferenceStandardsforVibrationMonitoringandAnalysis.pdf).
- [13] H. Kuemlee, T. Gross, and J. Kolerus, “Machine Vibrations and Diagnostics,” *Mater. IEEE*, pp. 1–13, 2013.
- [14] A. Kostogryzov, A. Rybas, L. Grigoriev, A. Nistratov, and G. Nistratov, “Probabilistic Estimations of Increasing Expected Reliability and Safety for Intelligent Manufacturing,” *Proc. - 2018 Glob. Smart Ind. Conf. GloSIC 2018*, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570124.
- [15] A. R. Al-Obaidi, “Detection of Cavitation Phenomenon within a Centrifugal Pump Based on Vibration Analysis Technique in both Time and Frequency Domains,” *Exp. Tech.*, vol. 44, no. 3, pp. 329–347, 2020, doi: 10.1007/s40799-020-00362-z.
- [16] G. E. Kondhalkar and G. Diwakar, *ICRRM 2019 – System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management*. Springer Singapore, 2020.
- [17] C. Wagner and B. Hellingrath, “Implementing predictive maintenance in a company: Industry insights with expert interviews,” *2019 IEEE Int. Conf. Progn. Heal. Manag. ICPHM 2019*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/ICPHM.2019.8819406.
- [18] B. Palchevskiy and L. Krestyanpol, “Application of Predictive Maintenance in the Packaging Production,” *Inform. Autom. Pomiary w Gospod. i Ochr. Sr.*, vol. 12, no. 3, pp. 27–33, 2022, doi: 10.35784/iapgos.3051.
- [19] H. N. Teixeira, I. Lopes, and A. C. Braga, “Condition-based maintenance implementation: A literature review,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2019, pp. 228–235, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.033.
- [20] P. Gangsar and R. Tiwari, “Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 144, p. 106908, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.