



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Implementación de un proceso de ACR, utilizando análisis vibracional,
para asegurar la operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo
de caña de azúcar de una empresa papelera**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Gavidia Morales, Jorge Luis (ORCID:0000-0003-2168-9196)

Rodríguez Lavado, Roberto Daniel (ORCID:0000-0001-5691-0909)

ASESOR:

Mg. De la Cruz Araujo, Ronal Abel (ORCID:0000-0003-3551-184X)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Sistema y Planes de Mantenimiento

TRUJILLO – PERÚ

2020

Dedicatoria

A nuestro Padre celestial por darme la vida y la oportunidad de realizar mis metas, Gracias por darme la mano y levantarme en los momentos más difíciles cuando se cree no poder salir de tantas dificultades este triunfo es dedicado a ti Señor Jesucristo.

De igual forma, dedico esta tesis a mis amados padres los pilares más importantes en mi vida han sido un gran apoyo en este largo camino estaré eternamente agradecido. A mi abuelita que ya no se encuentra entre nosotros pero que fue parte importante de mi formación.

Jorge Luis Gavidia Morales

La gloria sea para ustedes oh Dios grande, soberano y supremo Jesucristo. Se lo dedico este trabajo de investigación por ser de fuente de inspiración y permitir guardar y guiar pese a la adversidad que nos tocó vivir y ser perseverantes

A mi esposa amada, a mi querida hija, mis padres, hermanos(as) por su amor paciencia, motivación y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida.

Roberto Daniel Rodríguez Lavado

Agradecimiento

Los autores expresan agradecimiento a Dios por guiarnos durante todo este camino de obstáculos y dificultades logrando concluir nuestros objetivos, en estas líneas queremos agradecer a nuestras familias, padres y demás personas que nos apoyaron en los momentos difíciles, alegres, y tristes de esta meta

Un agradecimiento especial a los docentes de la universidad César Vallejo y compañeros de la universidad con quienes compartimos todos los años de nuestra carrera aprendimos muchas enseñanzas que volcaron en nuestra vida personal y profesional

Queremos agradecer a nuestro profesor y guía por sus palabras de apoyo y su espíritu positivo, Docente Ph.D. De La Cruz Araujo, Ronal Abel y a MSc Ing. Martin Sifuentes Inostroza por su desinteresada ayuda en el desarrollo de la tesis.

Índice de Contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de Contenidos.....	iv
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras.....	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	18
3.1 Tipo de diseño de investigación	18
3.2 Variables y operacionalización:	18
3.3 Población, muestra.....	20
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	20
3.5 Procedimientos.....	20
3.6 Método de análisis de datos.....	21
3.7 Aspectos éticos	21
IV. RESULTADOS.....	22
4.1 Evaluación de las condiciones iniciales del sistema de desmeduladores de bagazo, para determinar los indicadores de mantenimiento	22
4.1.1 Evaluación de los equipos	22
4.1.2 Análisis de fallas de los molinos desmeduladores, aplicando los indicadores de disponibilidad y confiabilidad.	24
4.2 Efectuar un análisis de criticidad en la fase de operación para clasificar las fallas preponderantes de los molinos desmeduladores por efecto de vibraciones, elaborar las respectivas hojas del AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas) y realizar el proceso de Balanceo Dinámico de rotores en el sitio. (TABLA N°8).....	28
4.2.1 Resumen del análisis de criticidad del molino desmedulador:....	29
4.2.2 Fallas críticas preponderantes mediante Análisis de Modos y Efectos de fallas (AMEF)	30

4.2.3	Número de Prioridades de Riesgo (NPR).	33
4.3	Elaborar un plan de mantenimiento preventivo basado en el ACR y determinar el proceso de Balanceo Dinámico del molino.	34
4.3.1	Jerarquización de problemas:	34
4.3.2	Contexto operacional de los molinos desmeduladores:	38
4.3.3	Análisis de las causas críticas.	39
4.4	Determinar los nuevos indicadores de mejora, luego del proceso de Análisis Causa Raíz y Balanceo Dinámico de Rotores, para contrastar con los iniciales.	41
4.4.1	Proceso de Balanceo Dinámico de rotor de molino desmedulador.	41
4.4.2	Determinación de los nuevos indicadores de mejora, obtenidos a partir del Plan de mantenimiento.	43
4.5	Evaluar la inversión, proyectar el beneficio económico y retorno operacional de la inversión, para el caso de implementación del sistema.	45
4.5.1	Beneficios económicos en reducción de horas pérdidas:	45
4.5.2	Costos para la implementación del mantenimiento predictivo	45
4.5.3	Costos para la implementación del mantenimiento preventivo	46
4.5.4	Beneficio útil.	47
4.5.5	Inversión en activos fijos y tecnología para la implementación del ACR basado en el AMEF	47
4.5.6	Retorno operacional de la inversión.	48
V.	DISCUSIÓN	49
VI.	CONCLUSIONES	52
VII.	RECOMENDACIONES	54
	REFERENCIAS	55
	ANEXOS	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables independientes y dependientes	19
Tabla 2. Tecnicas e Instrumento de Estudio	20
Tabla 3. Falla de los Activos Fijos	23
Tabla 4: Molino Desmedulador No 1	24
Tabla 5: Molino Desmedulador N° 2.....	26
Tabla 6: Molino Desmedulador N° 3.....	27
Tabla 7 Resumen:	28
Tabla 8. Resumen del análisis de criticidad del molino desmedulador 3.....	29
Tabla 9. Establecer mediante el Análisis de Modos y Efectos de fallas (AMEF), las fallas críticas preponderantes.....	30
Tabla 10. Análisis del NPR(Número de Prioridades de Riesgo).....	33
Tabla 11 Definiciones por tipos de mantenimiento de la norma ISO 14224:2016.	36
Tabla 12 Programa de Mantenimiento preventivo para el sistema de Molinos	40
Tabla 13. Determinación de nuevos indicadores de mantenimiento.	43
Tabla 14 Cuadro comparativo de indicadores de mantenimiento (antes y después del Plan).	44
Tabla 15. Beneficios a la reducción de horas perdidas	45
Tabla 16. Costos en mantenimiento predictivo en molinos desmeduladores	45
Tabla 17. Costos en mantenimiento preventivo en molinos desmeduladores.	46
Tabla 18. Resumen de los costos de mantenimiento	47
Tabla 19. Inversión en activos fijos.	47

Índice de Figuras

FIGURA N° 1 Herramienta del ACR.....	9
FIGURA N° 2: Movimiento vibratorio del cojinete de una maquina	10
FIGURA N° 3: Movimiento senoidal	11
FIGURA N° 4: Representa el desbalanceo estático de un rotor producido por una masa “m” sin compensar.....	13
FIGURA N° 5: Desbalance por Par de Fuerzas (P. tournero 2017).....	13
FIGURA N° 6: Desbalance cuasi estático (Gary, 2014)	14
FIGURA N° 7: Balance Dinámico (Gary, 2014)	14
FIGURA N° 8: Cuchillas de Molinos Recubrimiento con UTP-711 (Carburos de Cromo Formando Redes) (J. Gómez 2004).....	15
FIGURA N° 9: Molino desmedulador.....	16
FIGURA N° 10: Rotor de Molino.....	16
FIGURA N° 11: Molino en Corte Lateral.....	17
FIGURA N° 12: Esquema de la maquia GUNKEL, Plano de Sociedad Paramonga Ltda. Perú.....	17
FIGURA N° 13: Jerarquización de problemas (trupal 2019).....	34
FIGURA N° 14: Categoría de Mantenimiento (trupal .2019).....	35
FIGURA N° 15: Jerarquía de elementos para el equipo más crítico.....	37
FIGURA N° 16 Diagrama de Ishikawa de las causas críticas.	39
FIGURA N° 17 Diagrama de balanceo dinámico de rotor de molino	42

Resumen

En la presente tesis se ha realizado un análisis para los molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar de una empresa papelera. Con la finalidad de asegurar la operatividad de los equipos y mejorar los indicadores a raíz de la implementación de un plan de mantenimiento. Se inició la investigación evaluando los indicadores de mantenimiento “actuales” disponibilidad inicial 89.65%, 88.94% y 90.87% para los molinos 1, 2 y 3, respectivamente la confiabilidad 90.19%, 89.89% y 91.20%, luego realizando análisis de criticidad y efectuando el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) se determinó mediante el Numero de Prioridad de riesgos (NPR) las categorías de las fallas críticas. Efectuando un plan de mantenimiento preventivo basado en el ACR, cuya disponibilidad actual 95.81%, 95.54% y 96.40% para los molinos 1, 2 y 3 respectivamente la confiabilidad 90.19%, 90.00% y 91.36% solucionando las fallas del desbalanceo de los molinos desmeduladores mediante un método de balanceo dinámico, en el sitio de operación. Finalizando, el estudio del costo de implementación de mantenimiento y del beneficio; se determinó el retorno de la inversión obteniendo un valor beneficioso.

Palabras clave: Análisis causa raíz, Criticidad, Análisis de modo y efecto de fallos, Balanceo Dinámico, Plan de mantenimiento.

Abstract

In this thesis, an analysis has been carried out for the sugar cane bagasse desmedulado mills of a paper company. In order to ensure the operation of the equipment and improve the indicators following the implementation of a maintenance plan, the investigation was started evaluating the "current" maintenance indicators, initial availability 89.65%, 88.94% and 90.87% for the mills. 1,2 and 3, respectively the reliability 90.19%, 89.89% and 91.20%, after performing criticality analysis and performing the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), the categories of risk priority (NPR) were determined by critical failures. Carrying out a preventive maintenance plan based on the ACR, whose current availability 95.81%, 95.54% and 96.40% for mills 1, 2 and 3, respectively, reliability 90.19%, 90.00% and 91.36%, solving the imbalance failures of the desmedulado mills using a dynamic balancing method, at the operation site. Finally, the study of the cost of maintenance implementation and the benefit. The return on investment was determined obtaining a beneficial value.

Keywords: Root cause analysis, Criticality, Failure mode and effect analysis, Dynamic Balancing, Maintenance plan.

I. INTRODUCCIÓN

El mundo moderno tal como lo contemplamos hoy sería improbable sin la fundamental aportación que han tenido las máquinas durante toda su historia. (Santiago, 2011) Desde su descubrimiento, la humanidad ha disfrutado de una importante evolución tecnológica. (Saunders, 2017) Desde que el hombre empezó a construir máquinas, la reducción de sus vibraciones ha sido un problema constante para los Ingenieros. (Gordillo Calle, y otros, 2019)

En la práctica, es difícil evitar las vibraciones por complejo; generalmente se producen por los efectos dinámicos de las tolerancias de fabricación. (Mendoza Franco, 2019) holguras, contactos rodantes y fricción entre las partes de la máquina y desequilibrios de elementos rotativos y alternativos. (Espinoza Ronquillo, 2019) Ocasionalmente pequeñas fuerzas insignificantes pueden excitar las resonancias de elementos estructurales y convertirse en fuentes de ruido y vibración considerable. (Fernandez, 2017).

Ocasionalmente, mínimas fuerzas insignificantes pueden excitar las resonancias de los elementos estructurales y convertirse en fuentes de vibraciones y ruidos considerables como al diseñar maquinas e intentar reducir las vibraciones, se ha vuelto necesario tener dispositivos que puedan medirlas y analizarlas. (Romero Gallegos, y otros, 2019)

En las maquinas lentas y robustas de ayer, escuchar y tocar era uno los instrumentos sencillos y óptimos aplicados por el maestro del taller que median los desplazamientos de las vibraciones, pero en los últimos años se ha desarrollado una nueva tecnología de medición que es muy adecuada para máquinas de alta velocidad, con acelerómetros de piezas eléctricas que convierten el movimiento de vibración en una señal eléctrica, aplicando todas las funciones electrónicas. (Ibáñez Albalate, 2020)

La aplicación actual del análisis vibracional, se realiza con mayor énfasis en el proceso de Balanceo dinámico de rotores, en el sitio. (Contreras Calderón, y otros, 2018).Es decir, sin alterar sus condiciones por desmontaje y montaje posterior de la unidad. (Carrera Pruna, 2018) Se realiza la corrección de vibraciones que son muy perjudiciales para las máquinas en general. ¿Cuántas veces hemos oído decir algo como sigue? Algo pasa con esta máquina, está haciendo un ruido muy raro;

o bien, me da la sensación de que va muy trabajoso. (Calderón Rodríguez, 2016) Es natural, por lo tanto, asociar el estado de una máquina con el nivel de ruido o vibración que produce; (Achig Cabrera, 2015) Además, si se escucha algo suelto o hay un desequilibrio, comenzamos a sospechar que algo está pasando a su vez hay un problema mecánico eléctrico. (Zapana Flores, 2017)

La finalidad de esta investigación es Implementar un proceso de Análisis Causa Raíz, utilizando Análisis Vibracional, para asegurar la operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo de una empresa papelera de la región. Los cuales frecuentemente sufren paralizaciones prematuras y riesgosas por roturas de martillos (cuchillas de molino) a causa de excesivas vibraciones por desbalance del rotor de los molinos

La investigación para dar respuesta a la problemática realizamos la siguiente formulación del problema ¿La implementación de un proceso de ACR, utilizando Análisis Vibracional, asegurara la operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo de una empresa papelera?

Debemos tener en cuenta que este problema requiere del análisis correspondiente, por lo tanto, debemos realizar las respectivas justificaciones del estudio desde diferentes aspectos y determinar que, la presente investigación, (1) se justifica económicamente porque al aplicar un plan de mantenimiento preventivo orientado en el ACR.

Por lo cual permitirá aminorar las pérdidas económicas debido a la disminución de costos por paradas de mantenimientos correctivos en plena producción de la empresa papelera. (2) se justifica metodológicamente, porque la aplicación de nuevas metodologías en la solución de problemas de mantenimiento; como lo es el análisis causa - raíz permite detectar las causas de las fallas más críticas que estén ocasionando grandes pérdidas de producción y la reducción de la vida útil de los molinos desmeduladores, pudiendo aplicarse esta metodología como modelo para estudios posteriores. (3) se justifica institucionalmente, porque la implementación de la herramienta de análisis causa raíz para reducir las pérdidas de producción con la eliminación de las fallas críticas. Permitiendo a las empresas involucradas, estar un paso al frente respecto a otras empresas agroindustriales del ramo de utilización de bagazo y/o médula, permitiendo asimismo que el alumno de la Universidad César Vallejo aplique lo aprendido en las aulas y extienda sus

conocimientos referentes a mantenimiento en el campo laboral. (4) se justifica social y ambientalmente, porque la aplicación del ACR a los elementos activos de molinos permite encontrar las causas por las cuales se generan las pérdidas de energía eléctrica y la cantidad de “polvillo” o médula de bagazo, residuales son evacuados al medio ambiente. En tal sentido, teniendo en cuenta todo lo procedente, se plantea la siguiente:

Hipótesis La implementación de un proceso de ACR, utilizando Análisis Vibracional, sí asegurará la correcta operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo de una empresa papelera. La investigación nos proyecta el siguiente objetivo general: Implementar un proceso de Análisis Causa Raíz (ACR), utilizando análisis vibracional, para asegurar la correcta operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo de una empresa papelera. Para el logro del objetivo general determinamos los siguientes:

Objetivos específicos (1) Realizar una evaluación de las condiciones iniciales del sistema de desmeduladores de bagazo, para determinar los indicadores de mantenimiento actuales. (2) Efectuar un análisis de criticidad en la fase de operación para clasificar las fallas preponderantes de los molinos desmeduladores por efecto de vibraciones, elaborar las respectivas hojas del AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas) y realizar el proceso de Balanceo Dinámico de rotores en el sitio.(3) Elaborar un plan de mantenimiento preventivo, basado en los resultados del ACR y proceso de Balanceo Dinámico en el sitio evaluados.(4) Determinar los nuevos indicadores de mejora obtenidos del proceso de Análisis Causa Raíz y Balanceo Dinámico de Rotores, elaborados, para contrastar con los evaluados. (5) Realizar un estudio de costos de la inversión para el proceso, materia del presente proyecto, proyectar el beneficio económico y el retorno de la inversión

II. MARCO TEÓRICO

Para basarse la realidad problemática de acuerdo a nuestra tratativa, para nuestra investigación, hemos tenido en cuenta trabajos de índole profesional que aportan a su desarrollo. Así (Goti, 2008) realizó una encuesta donde se manifiesta Es necesario establecer las bases de un sistema de gestión de mantenimiento que sirva para recopilar, analizar y estudiar las actividades realizadas, siendo esencial el desarrollo de ésta. Tomamos como aporte la concepción de un Sistema de Gestión para el mejoramiento de indicadores y costos en un escenario industrial acorde con el nuestro. Además, se debe tener en cuenta la cultura y la organización de la empresa, y en particular es muy importante para comprender el nivel existente de gestión de la información en la empresa. Donde se pueden esperar cuellos de botella en la adquisición, transmisión o procesamiento de información relacionados con la confiabilidad y las operaciones de mantenimiento (SAETEROS, y otros, 2020), se planteó una metodología del mantenimiento basado en Condición (CBM) así mismo poder elaborar un matriz e identificar los diversos equipos y componentes críticos. Se planifico un matriz de técnicas apropiadas para el monitoreo de los equipos cuyos parámetros tales como: vibraciones, temperatura, tribología velocidades de flujo, potencia y velocidad; siendo estos criterios de rendimiento y calidad para luego establecer un base de análisis de modos de fallo, efecto y criticidad (AMFEC), por consiguiente, se obtuvo parámetros de medición y de seguimiento calculando diversas frecuencias para determinar su estado operativo siendo a mayoría medibles y detectables en base al registro de fallos existentes típicamente siendo asociados para discernir el rendimiento, condición y calidad.

Por otro lado (Gilberto, 2018) El análisis de influencia de las vibraciones en rodamientos de equipos rotatorios en las diversas industrias bien hoy en día utilizando técnicas de diagnóstico de fallas y ejecutando evaluaciones integrando un estudio vital en la prevención de posibles roturas , identificando fallos usuales ejes flexionados , desbalance de masa en rotores , desalineamiento y desgaste su utilidad radica en que las frecuencias y su amplitud de vibración especifican el problema específico y su severidad , a partir del historial de las vibraciones se inicia

una investigación de las vibraciones mecánicas y la eficiencia en la durabilidad de los rodamientos rotatorios se hizo un análisis en cinco equipos UEB AZUCARERA IFRIN ALFONSO utilizando el método japonés de aceleración y norma ISO10816-3 la metodología propuesta se extenderá a empresas y equipos similares, ya que se puede prevenir y evitar la paralización de la producción la cual conlleva a grandes pérdidas de costos

En forma similar, (Chiroque, 2017), utilizando el método de elementos finitos (MEF) con el fin de prevenir fallas mecánicas en máquinas rotativas. Asume como objetivo, desarrollar un modelo conceptual de un sistema de transmisión por engranajes (sistema ramificado) para determinar sus frecuencias naturales y modos de vibración torsional, así como analizar la respuesta del sistema a una fuerza impulsiva sinusoidal que simula la etapa de arranque (régimen transitorio). Se procedió luego a elaborar algoritmos de cálculo y producir las curvas características que permiten estudiar el comportamiento de las frecuencias naturales, modos de vibración torsional y respuesta del sistema bajo régimen transitorio. Los resultados indicaron que al incrementar la relación de transmisión mientras los demás parámetros se mantienen constantes, la amplitud de respuesta en la sección del eje alcanza valores máximos comparados con las amplitudes obtenidas al variar el resto de parámetros. En la sección del eje conducido, dicha amplitud disminuye progresivamente hasta ser menor que la amplitud de la fuerza impulsiva. Concluye la investigación, aseverando que es de vital importancia considerar la medición y control de las vibraciones torsionales en el programa de mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas en la industria, a fin de evitar fallos mecánicos debido a esfuerzos torsionales que conlleven a fallas por fatiga

También (Rojas Vasquez, 2018), determinó el desarrollo de un Sistema de Detección de Fallas para Bombas Centrífugas, basado en el método del análisis vibracional y el método de alineamiento de ejes. Los trabajos realizados incluyen el estudio de funcionamiento de equipos rotativos, la elección del método de detección de fallas y el diseño del Sistema de Diagnóstico de Fallas que permite conocer el estado diseñado en una bomba centrífuga en la del Gold Mill Minera Yanacocha.

En forma similar (TORRES ROJAS, 2018) mediante la propuesta de una implementación de un programa de mantenimiento preventivo. cuyo objetivo es minimizar los costos de mantenimientos en el Área de planta de pulpa de la empresa Trupal S.A .primero se determinó costos operacionales indicando que son muy elevados ,siendo los mantenimientos correctivos los de mayor costos al no disponer de una programación de mantenimiento preventivo .una vez encontrada la causa raíz de la problemática en la Área de pulpa se procede a priorizar las posibles causas mediante la implementación de un diagrama de Ishikawa continuamente con un diagrama de Pareto para la identificación de las causas más relevantes a desarrollar basado en herramientas e indicadores económicos como una solución a dichos problemas por ende se concluirá si esta propuesta es factible y la vez rentable para a empresa Trupal S.A .

Por otro lado, (Chávez, 2012), ejecutaron un análisis causa raíz a bombas hidráulicas. El cual concluye aseverando que los elementos más críticos son los sellos mecánicos y rodamientos por la presencia del mayor número de falla en el proceso. Asimismo, se elaboró un plan de mantenimiento preventivo cada 4 meses con el propósito de reducir costes de mantenimiento y aumentando el rendimiento y la disponibilidad de las bombas.

Teniendo en cuenta lo precedente, es necesario precisar conceptos que ayudarán a la elaboración, desarrollo y mejor entendimiento del presente proyecto de investigación. Uno de los conceptos iniciales es la precisión del mantenimiento preventivo, el cual es un tipo de mantenimiento que ayuda a prevenir las averías o fallas cuyo objetivo es mantener los equipos bajo condiciones específicas de operación. Se ejecuta a frecuencias dinámicas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, las condiciones operacionales y al historial de falla de los equipos (Ávila, 1992).

Es bueno considerar un breve concepto tradicional y real de; mantenimiento correctivo, cuyo concepto se enfoca y se aplica cuando y donde ocurrió un error en el sistema, ya sea porque sufrió una avería o fallo cuando se realizaba un mantenimiento, cuyo proceso de producción se detiene, por lo que disminuye la cantidad de horas de operación. Siendo impredecibles en términos de sus gastos y el tiempo que tomara realizarlo, sin embargo (Galietero Olivares, 2015), el

mantenimiento que mayor auge tiene actualmente en los últimos tiempos es el denominado.

Mantenimiento preventivo es una estrategia donde la intervención es básicamente una prioridad, determinada usando criterios básicos para analizar y sustituir algunas piezas ya sea por desgaste gradual o partes de un sistema donde esta pueda causar averías dicha intervención será ejecutada cuando el equipo esté operando satisfactoriamente (Galietero Olivares, 2015)

El mantenimiento predictivo consiste en determinar las condiciones, permitiendo diagnosticar la vida útil permanente de los equipos así mismo este mantenimiento puede proporcionar numerosos beneficios e incrementar la disponibilidad y seguridad y calidad en cuanto a mejoras dentro de una programación de mantenimiento, minimizando costes haciendo una toma de decisiones a tomar en cada fase para luego garantizar un exitoso mantenimiento programado (Carmen, 2012)

Tiene como indicadores principales de mantenimiento a las disciplinas modernas de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad los cuales son guías fundamentales de un equipo, siendo estas aplicadas al mantenimiento consecutivamente evaluar si el equipo está operativo, el objetivo es aumentar la disponibilidad y confiabilidad para así, recudir o estabilizar constantemente la mantenibilidad (Benjamin, 2016).

Disponibilidad Es el porcentaje del tiempo que tarda un activo o equipo físico en funcionar sin avería, falla o error (Carrasco, 2016) .

$$D(T) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

Dónde:

A (t): Disponibilidad operacional (%),

MTBF: Tiempo promedio entre fallas (horas útiles promedio/falla).

MTTR: Tiempo promedio para reparar (horas de reparación/falla).

Confiabilidad: Es la fracción requerida, para que un determinado equipo funcione en un intervalo de tiempo propuesto y bajo condiciones específicas (SANTIAGO, 2013)

$$R(t) = \left(e^{-\frac{FR * TTO}{100}} \right) * 100 \quad (2)$$

Dónde:

R(t): Confiabilidad operacional de un equipo en un tiempo (t) dado. (%),

e: constante Neperiana (e= 2. 303...),

FR (λ): Tasa de fallas Hrs útil (número total de fallas /horas útil operación),

TTO: (Tiempo total de operación), sería la suma del MTBF+MTTR = Horas totales/año y se expresa:

$$FR = \frac{1}{MTBF} \quad (3)$$

Mantenibilidad Probabilidad de reparar un equipo en un tiempo determinado que ha sufrido una falla en una determinada fracción de tiempo (SANTIAGO, 2013)

$$R(t) = \left(e^{-\frac{RR * TTO}{100}} \right) * 100 \quad (4)$$

M (t): Mantenibilidad mecánica (%)

TTO: Tiempo total de estudio o programado (horas totales/año).

RR (μ): mantenimiento de tasa de reparaciones (fallas horas de reparación) y se expresa

$$RR = \frac{1}{MTTR} \quad (5)$$

El análisis de causa Raíz (ACR) o Root Cause Analysis. Es una metodología básicamente utilizada para solucionar problemas o corregir ; cuyo objetivo es eliminar o en dado caso minimizar errores En diversas organizaciones son ejecutadas para identificar y establecer de manera critica las causas que subyacen en determinadas situaciones inesperadas o no deseadas (fugas, fracturas e incidentes) .El propósito del ACR es utilizar un pensamiento objetivo para descifrar

porque algo salió mal o porque algo no es posible ¿Cómo? descubrir un evento indeseable (MCQI, 2008).

Herramientas del análisis causa raíz (ACR) Son métodos empleados en la resolución de problemas cuyo objetivo es identificar las causas

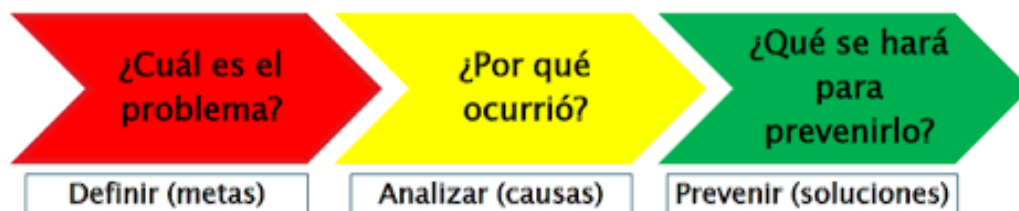


FIGURA N° 1 Herramienta del ACR

El análisis de Pareto Es una técnica fácil de aplicar que contribuye a elegir los diversos cambios siendo efectivos aplicar. Está fundamentado en la ley “80-20” cuyo principio detalla que el 20% de los trabajos puede generar defectos en el 80% de los procesos permitiendo detectar y descartar la influencia de diversos elementos triviales en la consecuencia de una actividad o falla (ACOSTA, y otros, 2017)

El diagrama de causa efecto: conceptualizada como un diagrama de espina o Ishikawa este tipo de diagrama está representado mediante una gráfica entre las relaciones de los efectos y las posibles factoras como causas. lo que determina que los análisis son llevados a detalle en donde las causas primarias y secundarias son determinadas de manera jerárquica, en el diagrama de Ishikawa incluye la identificación del problema, identificando las principales categorías de causas que tienen el mayor impacto en un posible problema que pueda ocurrir (FABIŚ DOMAGAŁA, y otros, 2017)

Lluvia de ideas basado fundamentalmente en el uso de herramientas, cuya finalidad es generar diversas alternativas a un determinado problema, se debe considerar, el desarrollar y efectuar la búsqueda de posibles soluciones, no criticar ni juzgar. (MCQI, 2008)

Ahora debemos centrarnos en conceptualizar la tecnología principal del mantenimiento moderno, que ha revolucionado lo tradicional del preventivo estadístico, hacia un mantenimiento preventivo condicional; pues involucra

inspecciones y seguimiento continuo, mediante herramientas predictivas para lograr una excelencia en el mantenimiento; nos referimos específicamente, al Análisis Vibracional.

Vibración. Es un término utilizado para describir el movimiento de oscilación de una pequeña amplitud en un cuerpo, respecto a una posición de equilibrio original o en reposo siendo este no perceptible visualmente, pero si lo es al tocar y en algunas veces oírse, en ocasiones estas vibraciones podrían ser periódicas en las máquinas. (FIGURA 2)

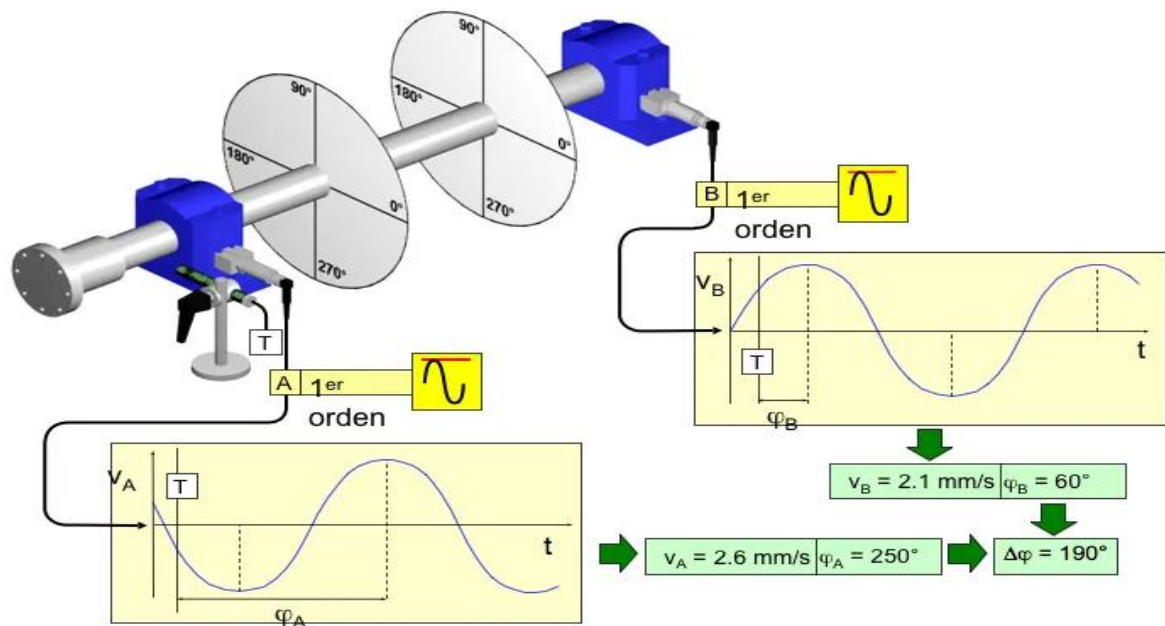


FIGURA Nº 2: Movimiento vibratorio del cojinete de una maquina

Fuente: Análisis vibracional avanzado Universidad de concepción, 2010

Muchas de las principales vibraciones mecánicas están en el rango de 1 a 2000Hz. (1 Hz. = 1 ciclo por segundo = 60 CPM ciclos por minuto correspondiente a la velocidad de rotación de 60 a 120.0000 RPM. Sin embargo, en algunos campos muy específicos, como la simbología, los estudios de vibraciones pueden extenderse por debajo de algunas fracciones pequeñas de un Hertz, mientras que, en el diseño de un altavoz de vibraciones alcanza hasta 20000 Hz. Una forma de medir y analizar las vibraciones mecánicas es usar instrumentos eléctricos, que conviertan la señal mecánica en una señal eléctrica, usar transductores para procesarlas más y ayudarnos a diagnosticar posibles fallas de la maquina

La causa debe ser una fuerza que cambie de dirección, sentido o importancia. Esta fuerza provocará vibración y las características que resulten, serán determinadas por el modo en que se generen las fuerzas, esto es porque cada fenómeno que causa vibración tiene características propias. Toda máquina, con el uso sufre cambios (desgaste, partes deformadas, sellos, tolerancias, etc.) en sus propiedades dinámicas, lo que ocasiona fallas como desbalance, desalineamientos, flexión en los ejes, engranajes desgastados, excéntricos o dañados e incremento de tolerancia. Todos estos factores se reflejan como un incremento de energía vibratoria.

La oscilación puede ser tan simple como el movimiento de un péndulo denominado movimiento armónico simple; y tan complejo como el de una maquina alternativa (máquina de combustión) entonces por ello la vibración por ser un movimiento periódico tiene un comportamiento de una ONDA SINUSOIDAL (figura nº3), por ello su definición matemática se expresa:

$$X = A \text{ Sen } (wt + \phi)$$

Dónde: A es la amplitud valor pico de la señal, w es la frecuencia angular, ϕ la fase de la señal y t es el tiempo.

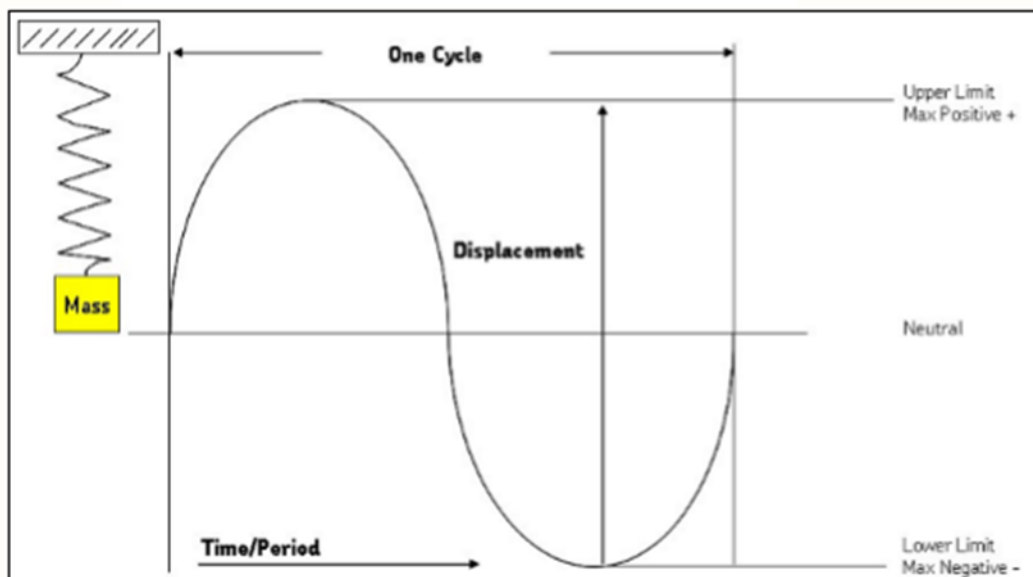


FIGURA Nº 3: Movimiento senoidal

Fuente: SKF Análisis de vibraciones, 2010

Los problemas mecánicos y las causas más comunes en las vibraciones en una maquina son el desequilibrio, desbalance y desalineamiento, dichos problemas concentran un 70 % de los efectos vibraciones en la industria, Asumiendo como: Flexión, soldaduras, fuerzas electromagnéticas fuerzas hidráulicas, fuerzas Aerodinámicas, rozamientos entre superficies (YANG, 2016)

Tabla de medidas de vibración norma ISO 1000

Medida	Unidades	Descripción
Desplazamiento	m, mm, μm	Movimiento de la máquina, estructura, o rotor; relativo al esfuerzo
Velocidad	m/s, mm/s.	Rapidez del cambio de desplazamiento relacionado a la fatiga
Aceleración	mm/s^2 . G's (9.809m/s^2)	Relacionado las fuerzas presentes en los componentes de las maquinas

Fuente nivel de vibración 3, Vibration Institute 2013

El balanceo es un procedimiento para analizar fuerzas distribuida de masa, cuyo fenómeno llamado "Sacudimiento" es básicamente minimizar dichas fuerzas en los rotores, para reducir su desbalance, luego balanceando las redistribuciones así evitando que las fuerzas de las vibraciones sobrepasen los niveles recomendados para ciertas velocidades de operación

Desbalance es una condición existente en un rotor, cuyo producto de dichas fuerzas de inercia no compensadas podrían producir vibraciones, siendo una de las causas principales aproximadamente en un 40 % de las vibraciones excesivas, También se podría puede definir como la no coincidencia del eje de rotación y el eje longitudinal principal la inercia de rotor, este eje se une al centro de la gravedad al no coincidir inducirá cuatro tipos de desbalances

Desbalance estático: el eje principal de inercia se desplaza inicialmente paralelo al eje de rotación, siendo esto típico de rotores delgados como poleas y bombas de alta presión la corrección de realiza añadiendo o quitando pesos en un solo plano siendo este muy difícil que presente desbalance en rotores, cuya relación de longitud entre diámetro sean mayores de 0.5 ($L/D > 0.5$)

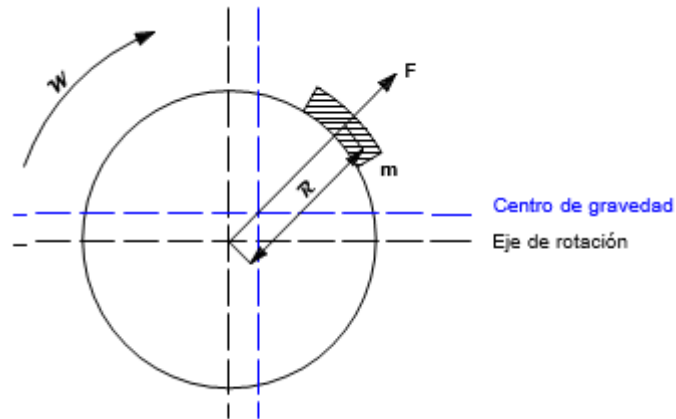


FIGURA N° 4: Representa el desbalanceo estático de un rotor producido por una masa “m” sin compensar

Desbalance por par de fuerzas (CUI, Yongcun, 2019) Se produce cuando el eje central principal, cruza el eje de rotación, justo en el centro de gravedad del rotor. Al tomar vibraciones (amplitud y fase) en un rotor que se encuentra apoyado entre cojinetes, los valores serán iguales pero desfasados a 180° . Raras veces se presenta este tipo de desbalance. Para minimizar este defecto, es necesario corregir en dos planos. (Fig. 4)

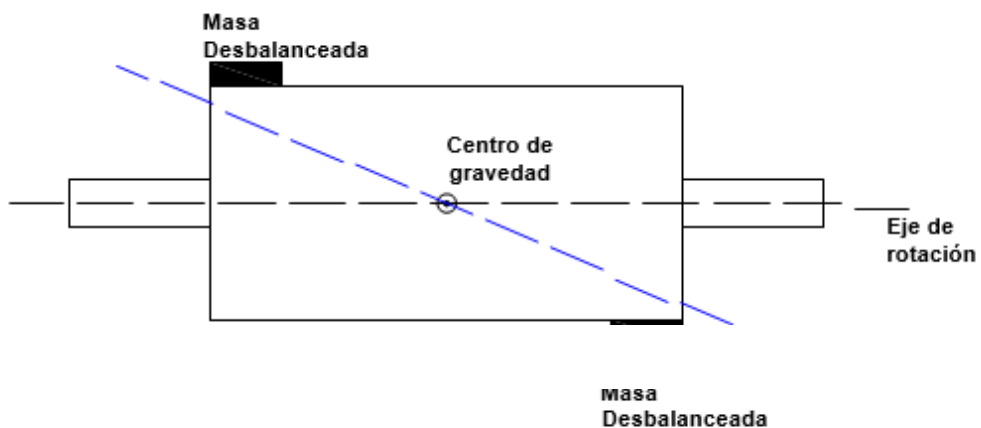


FIGURA N° 5: Desbalance por Par de Fuerzas (P. tournero 2017)

Desbalance Cuasi estático (HUDSON, y otros) Existe cuando el eje central principal, cruza el eje de rotación, pero no por el centro de gravedad. Este tipo de desbalance es la combinación del desbalanceo estático y por par de fuerzas. Las magnitudes vibraciones que se detectan entre apoyos son amplitudes diferentes y desfasadas a 180° (Fig. 6.).

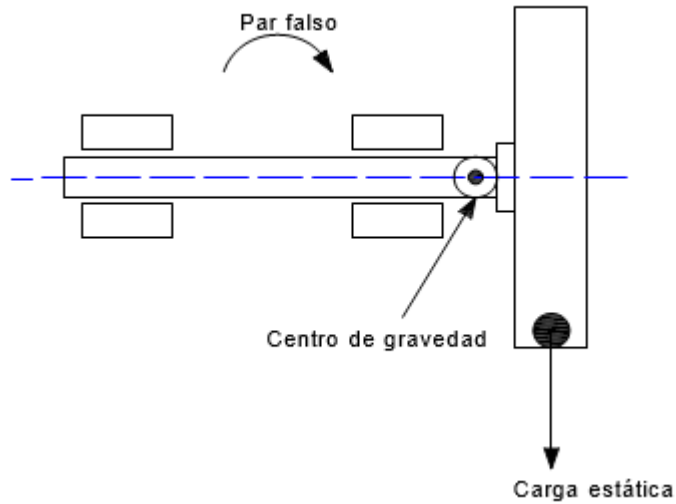


FIGURA N° 6: Desbalance cuasi estático (Gary, 2014)

Desbalance Dinámico (YANG, 2019), Es una condición de desbalance par fuerza e estático, Los pesos de balance no están en un solo plano, las vibraciones interpretadas y medidas entre puntos de apoyo tienen diferentes amplitudes y fases, para corregir este desbalance es necesario hacer correcciones de pesos en dos planos; siendo una característica más importante el eje central y principal de rotación que se cruza sin tocarse siendo el defecto más común en la mayoría de los rotores (Fig. 7).

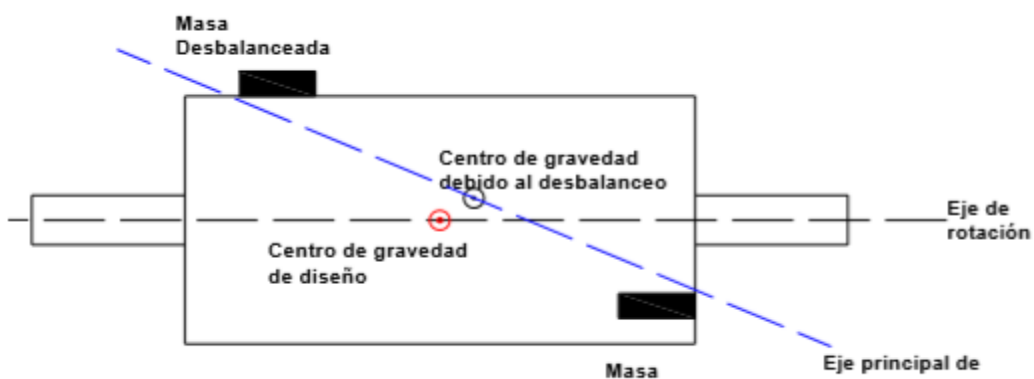


FIGURA N° 7: Balance Dinámico (Gary, 2014)

Así mismo muchas de las causas frecuentes de desbalance son corrosión y desgastes, burbujas o sopladuras, distorsión mecánicas o térmicas, tolerancias entre los cojinete o rodamientos, componentes excéntricos, defectos ocasionados en la fundición, mala aplicación de la chaveta y chavetero (cuñeros)(figura10).

36

F. Diez Torres, J. Dulón Gómez.

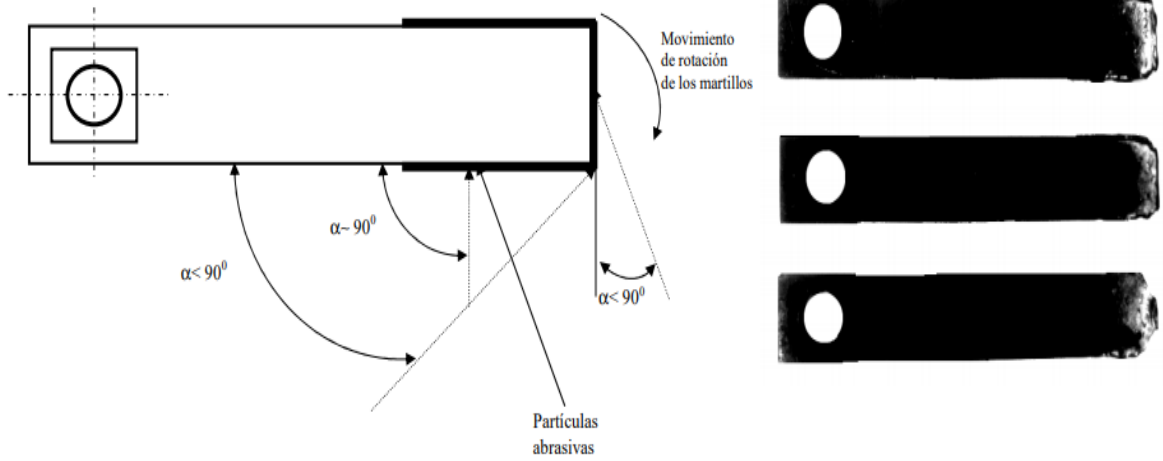


FIGURA Nº 8: Cuchillas de Molinos Recubrimiento con UTP-711 (Carburos de Cromo Formando Redes) (J. Gómez 2004)

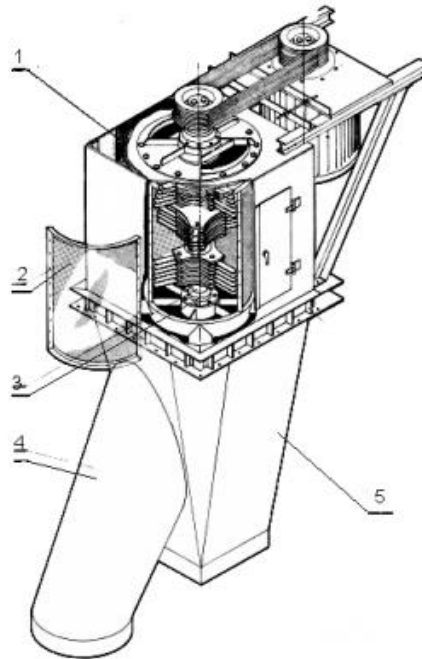


FIGURA Nº 9: Molino desmedulador

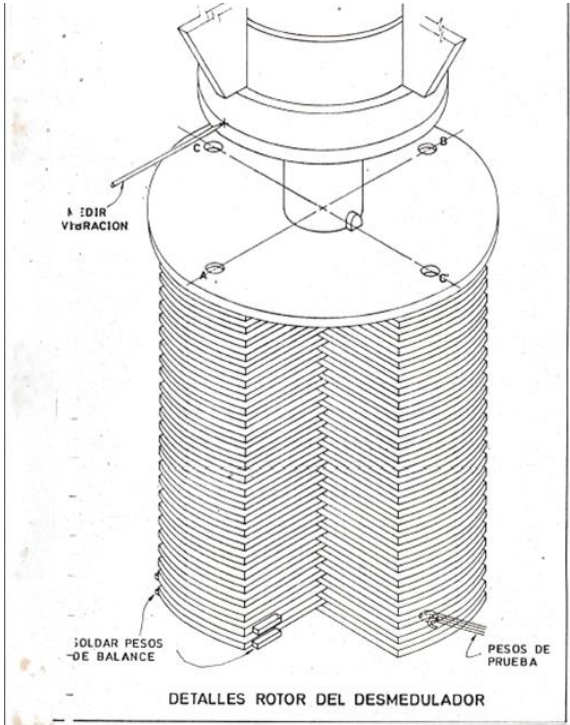


FIGURA Nº 10: Rotor de Molino

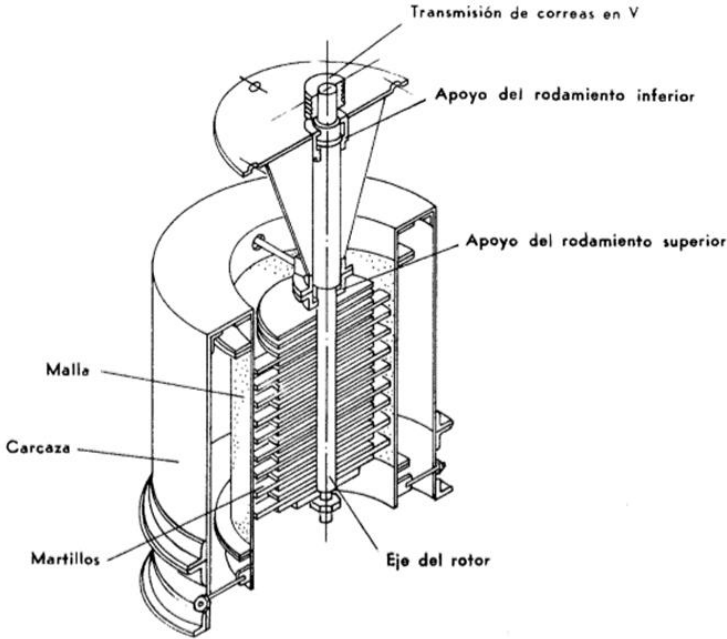


FIGURA Nº 11: Molino en Corte Lateral

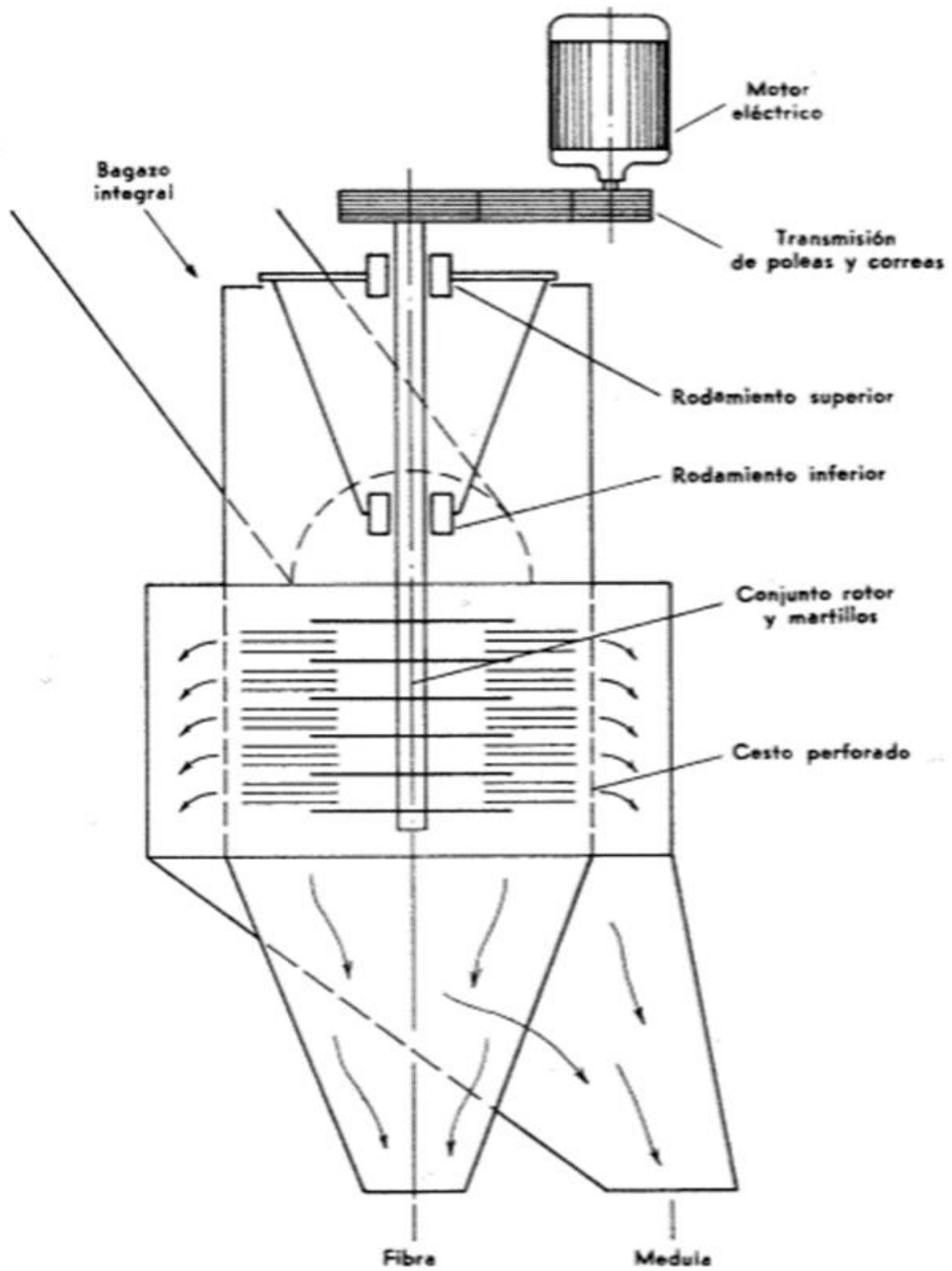


FIGURA Nº 12: Esquema de la maquia GUNKEL, Plano de Sociedad Paramonga Ltda. Perú

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de diseño de investigación

El tipo de nuestra investigación, de acuerdo al fin que se persigue es aplicada porque se utilizan conocimientos ya existentes y se conoce la realidad actual a través de sus variables o parámetros de operación para cambiarlos y mejorarlos. Encontrando un beneficio para las empresas; de acuerdo al régimen de investigación, es Orientada porque es un tema de interés científico y útil para las empresas en estudio y forma parte de los planes de la investigación de los tesisistas.

El estudio tiene un diseño de investigación Pre-Experimental porque se proyecta el cambio de sus variables en un determinado tiempo a través de un estudio y terminará en una proyección.

3.2 Variables y Operacionalización:

Variables independientes:

- Proceso de Análisis de Causa Raíz.
 - ✓ Análisis vibracional.

Variables dependientes:

- Confiabilidad de los activos de desmedulado
- Correcta operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo
 - ✓ Incremento de la disponibilidad de los molinos.
 - ✓ Reducción de la mantenibilidad de los activos (molinos)

Tabla 1. Operacionalización de variables independientes y dependientes

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Escala de medición
Proceso de análisis de causa raíz	Técnica que nos permite determinar el agente causal de un problema que genera daños o fallos a través del tiempo.	Diagrama Ishikawa o “espina de Ishikawa”	ACR	Cualitativa Ordinal
Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Escala de medición
	Probabilidad de que un activo cumpla con un tiempo específico de trabajo bajo condiciones establecidas.	$R = e^{\frac{-\lambda * T}{100}}$	Confiabilidad	Cuantitativa (%)
confiabilidad	Posibilidad de que un equipo pueda ser reparado en un tiempo determinado.	$M = 1 - e^{\frac{-\mu * T}{100}}$	Mantenibilidad	Cuantitativa (%)
	La confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado	$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	Disponibilidad	Cuantitativa (%)

Fuente: Elaboración propia

3.3 Población, muestra

La población la constituyen los molinos desmeduladores de bagazo de las planta de tratamiento de fibra/médula en las empresas agroindustriales del sector de producción de azúcar a partir de caña y las empresas papeleras que utilizan bagazo como materia prima para fabricación de papel; la muestra está conformada por cuatro molino desmeduladores, escogido para el evento de análisis vibracional y como piloto para el proceso de ACR y balanceo dinámico en el sitio, en una empresa papelera de la región; el muestreo.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos necesarios para la recolección de datos de la presente investigación son:

Tabla 2. Tecnicas e Instrumento de Estudio

Técnicas	Instrumentos
Análisis documental	Ficha de Registro

Análisis Documental, es la técnica por la cual se analizarán en este caso los reportes u hoja de trabajo de los operadores. En estos se muestran la cantidad de paralizaciones y fallas de los molinos desmeduladores.

Instrumentos: es la técnica donde se especifica el modo en que se realizan las actividades y el tiempo que se emplean hasta su culminación. Según (Caro , 2019), esta técnica consiste en el ordenamiento sistemático, valido y confiable de comportamientos o conductas que se manifiestan.

3.5 Procedimientos

Para recopilar la información necesaria, por el estado de emergencia y la coyuntura presentada en esta etapa del Covid 19, se solicitaron los datos vía internet a los Supervisores de la Planta de Pulpa de la empresa, donde se realizará el presente estudio y se encuentran trabajando las unidades denominadas molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar.

3.6 Método de análisis de datos

Para el análisis de los datos se utilizará el programa Microsoft Excel. Los datos que se recopilaron son para determinar las ocurrencias diarias de operación de los molinos, estos deberán ser tabulados para mostrar resultados de los tiempos de operación (MTBF), tiempos de reparaciones (MTTR) de cada molino, tiempos entorno a paradas por suficiente producción en la planta de Pulpa (full tank). Los datos serán también tabulados para poder determinar los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de las unidades. Asimismo, se incluirán registros de tendencias de falla por vibraciones determinadas por el operador al observar en el panel de control, variaciones en el amperaje del motor; a continuación, se verificará con las lecturas de un analizador de vibraciones del mantenimiento predictivo (Saci, 2014)

3.7 Aspectos éticos

Nuestro trabajo de investigación desarrollado, ha sido elaborado con datos fidedignos y las informaciones otorgadas, fueron reales y concretas de las operaciones de los molinos desmeduladores en la Planta de Pulpa de la empresa papelera de la región que nos acogió para hacer el presente estudio, como propuesta para mejorar el modelo de gestión de mantenimiento donde ésta es aplicada.

IV. RESULTADOS

4.1 Evaluación de las condiciones iniciales del sistema de desmeduladores de bagazo, para determinar los indicadores de mantenimiento

4.1.1 Evaluación de los equipos

La evaluación inicial se refiere a la solución de fallas de los molinos desmeduladores, contempladas en el siguiente cuadro y que son el reflejo del costo de reparaciones de los equipos, repuestos, accesorios y mano de obra empleados, cuando se realizan con el clásico mantenimiento correctivo, para lo cual existen desplazamiento de personal de mecánicos, personal de apoyo, electricistas e inspectores a la zona de molinos de la Planta de Pulpa de la empresa, traslado de materiales y repuestos de las unidades a intervenir (molinos) y el acarreo de equipos auxiliares como son máquina de soldar y equipo de oxi-acetileno

Tabla 3. Falla de los Activos Fijos

FALLA	DESCRIPCIÓN	ACCIÓN	DETALLE
Sistema de transmisión	Evaluación del sistema de transmisión, motor, revisión de las fajas o correas del motor-molino, chavetas de fijación de poleas, pruebas, monitoreo en operación	Revisión, monitoreo por 5 días, desplazamiento, diagnóstico y toma de decisiones.	Mediante inspección con herramientas predictivas (estetoscopio, vibrómetro, amperímetro y pirómetro).
Reparación del Sistema de transmisión.	Repuestos, accesorios y mano de obra	Reemplazo de componentes averiados.	Cambio de fajas, reparación de canales de poleas de transmisión, cambio de chavetas de fijación, meggado de motor y cables de conexiones.
Trabamiento del sistema de accionamiento de eje del molino por desperfecto de rodamientos a causa de vibraciones altas	Análisis de causas de fallarle rodamientos, mediciones de vibraciones y temperaturas; revisión de elementos de sellado (retenes) y empaquetaduras de las cajas.	Cambio de rodamientos, cambio de accesorios y balanceo dinámico del roto de molino desmedulador.	Desmontaje parcial del molino, izamiento en el lugar de operación, desmontaje de rodamientos y accesorios, reemplazo y proceso de balanceo dinámico en el sitio.
Desgaste/rotura de cuchillas (martillos) de los molinos desmeduladores y pines de fijación de estas cuchillas.	Reemplazo de cuchillas y pines de fijación x elementos nuevos y/o reparados.	Cambio de cuchillas y pines de fijación.	Al verificar vibración excesiva, se opta por reemplazar las cuchillas y pines, por unidades pesadas uniformemente.
Colapso de rotor de molino desmedulador.	Reparación general de molino desmedulador: Desmontaje completo,	Cambio de rotor completo del molino.	Generalmente se tiene un rotor stand by,

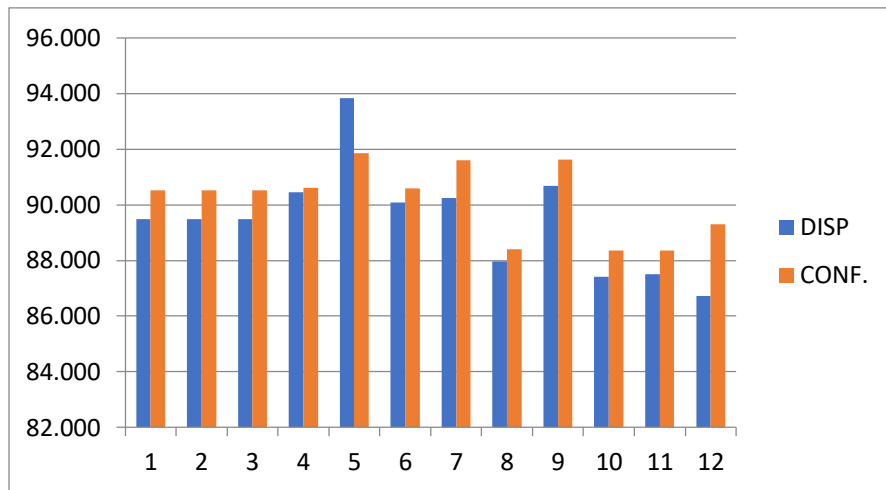
Rotura de crucetas porta cuchillas por desgaste y/o vibración alta.	cambio de crucetas, cambio de rodamientos y accesorios, verificación de linealidad de eje y recuperación de asientos del eje.	preparado con crucetas, rodamientos y accesorios nuevos.
---------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------

4.1.2 Análisis de fallas de los molinos desmeduladores, aplicando los indicadores de disponibilidad y confiabilidad.

**Tabla 4: Molino Desmedulador No 1
DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO**

	T. PARA OPERAC. DAS	T. REPARAC. MTTR	MTBF	DISP.	CONF.		
ENERO	649	9	68.3	7.59	72.11	89.48	90.53
FEBRERO	649	9	68.3	7.59	72.11	89.48	90.53
MARZO	649	9	68.3	7.59	72.11	89.48	90.53
ABRIL	657.2	9	62.8	6.98	73.02	90.44	90.61
MAYO	678.1	8	41.9	5.24	84.76	93.82	91.85
JUNIO	655.1	9	64.9	7.21	72.79	90.09	90.58
JULIO	634.1	8	61.9	7.74	79.26	90.24	91.59
AGOSTO	664.1	11	79.9	7.26	60.37	87.97	88.4
SETIEMBRE	658.6	8	61.4	7.68	82.33	90.68	91.62
OCTUBRE	660.8	11	83.2	7.56	60.07	87.41	88.35
NOVIEMBRE	640	11	80	7.27	58.18	87.50	88.36
DICIEMBRE	593.2	10	78.8	7.88	59.32	86.72	89.29
	7788.2	112	819.7	7.32	69.54	89.65	88.35

Fuente: Elaboración Propia

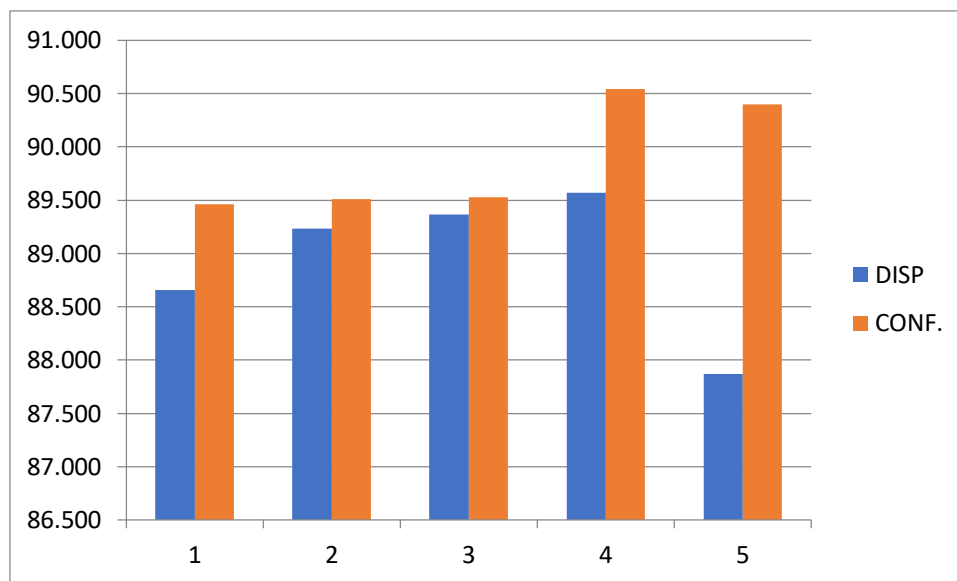


De la tabla N°04, determinamos que en el molino desmedulador No 1, la disponibilidad promedio es 89.65 % y confiabilidad promedio es 88.35%.

Tabla 5: Molino Desmedulador N° 2
DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO

	T. OPERAC	PARA DAS	T. REPARAC	MTTR	MTBF	DISP.	CONF.
AGOSTO	668.2	10	75.8	7.58	66.82	88.656	89.46
SETIEMBRE	650	10	70	7.00	65.00	89.231	89.51
OCTUBRE	672.5	10	71.5	7.15	67.25	89.368	89.53
NOVIEMBRE	652	9	68	7.56	72.44	89.571	90.54
DICIEMBRE	620.7	9	75.3	8.37	68.97	87.869	90.40
	7178.64	48	360.6	7.53	68.10	88.941	89.89

Fuente: Elaboración propia

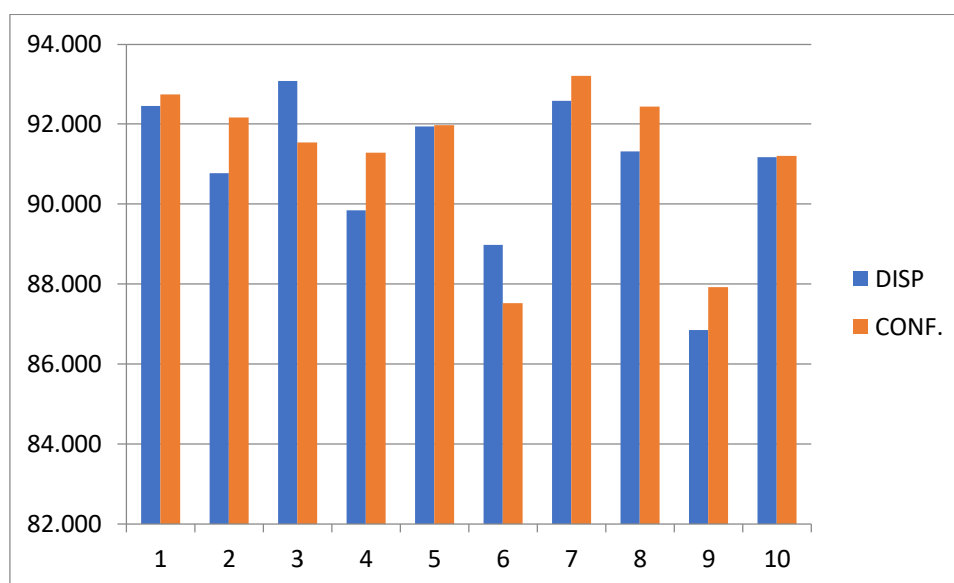


De LA TABLA N°05, determinamos que en el molino desmedulador N° 2, la disponibilidad promedio es 88.94% y confiabilidad promedio es 89.89%.

Tabla 6: Molino Desmedulador N° 3
DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO

	T. OPERAC.	PARA DAS	T. REPARAC.	MTBF	MTTR	DISP.	CONF.
ABRIL	669.5	7	50.5	95.64	7.21	92.46	92.75
MAYO	659.2	8	60.8	82.40	7.60	90.78	92.17
JUNIO	673.4	8	46.6	84.18	5.83	93.08	91.54
JULIO	631.8	8	64.2	78.98	8.03	89.84	91.29
AGOSTO	688.5	8	55.5	86.06	6.94	91.94	91.97
SETIEMBRE	648.5	12	71.5	54.04	5.96	88.97	87.53
OCTUBRE	692.6	7	51.4	98.94	7.34	92.58	93.21
NOVIEMBRE	662.5	7	57.5	94.64	8.21	91.32	92.44
DICIEMBRE	615.1	11	80.9	55.92	7.35	86.85	87.92
	5941.1	76	538.9	81.20	7.16	90.87	91.20

Fuente: Elaboración propia.



DE LA TABLA N°06, determinamos que en el molino desmedulador N° 3, su disponibilidad promedio es 90.87% en tanto su confiabilidad promedio es del 91.20%.

Tabla 7 Resumen:
DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO

MOLINOS DESMEDULADORES DE BAGAZO PARA PULPA DE PAPEL.	MTBF (TIEMPO PROMEDIO PARA FALLAR)	MTTR (TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR)	DISPONI BILIDAD	CONFIA BILIDAD
MOLINO DESMEDULADOR # 1	70.54	7.30	89.65	90.19
MOLINO DESMEDULADOR # 2	68.10	7.53	88.94	89.89
MOLINO DESMEDULADOR # 3	81.20	7.16	90.87	91.20
TOTAL	73.28	7.33	88.94%	90.43%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N°7 determinamos los indicadores de mantenimiento de los molinos de desmedulado N°1, N°2 Y N°3. Donde vemos el MTBF (tiempo promedio para fallar) es de 73.28 veces a fallar; y el MTTR (tiempo promedio para reparar) es de 7.33 veces, con una disponibilidad de 88.94% y una confiabilidad de 90.43%.

4.2 Efectuar un análisis de criticidad en la fase de operación para clasificar las fallas preponderantes de los molinos desmeduladores por efecto de vibraciones, elaborar las respectivas hojas del AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas) y realizar el proceso de Balanceo Dinámico de rotores en el sitio. (TABLA N°8)

4.2.1 Resumen del análisis de criticidad del molino desmedulador:

Tabla 8. Resumen del análisis de criticidad del molino desmedulador 3.

N°	Falla	Clasificación	Plan de Mtto.	Valor de criticidad
1	Ruptura de canastillas del molino.	Crítica	Preventivo	240
2	Bajo aislamiento en motores de molino y caja de conexiones	Crítica	Preventivo	320
3	Vibración alta en rodamientos del molino	Crítica	Predictivo	360
4	Desalineamiento de poleas / ruptura de fajas en sistema de transmisión	Semi crítica	Preventivo	54
5	Fuga de lubricante en cajas de rodamientos de motor y molino	Crítica	Preventivo	80
6	Desgaste/ruptura de pines de sujeción de cuchillas de molinos	Semi crítica	Preventivo	80
7	Desgaste de agujero y/o ruptura de cuchillas de molinos.	Semi crítica	Preventivo	40

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Fallas críticas preponderantes mediante Análisis de Modos y Efectos de fallas (AMEF)

Tabla 9. Establecer mediante el Análisis de Modos y Efectos de fallas (AMEF), las fallas críticas preponderantes.

Hoja de información RCM	Máquina: Molino desmedulador N° 3		Ubicación Pta. Pulpa 8	N° 3	Cód.:
Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla		
Separar durante el proceso de desmedulado, la fibra y el polvillo (médula) del bagazo	Ruptura de canastillas del molino.	Debido a la presencia de cuerpos extraños (piedras o maderas), o por desalineamiento y/o vibración del rotor del molino, se producen roturas en las planchas perforadas (canastillas)	La ruptura de canastillas, obliga necesariamente a parar las operaciones del molino agraviado, por lo que inmediatamente se arranca el stand by, pero existen consecuencias de retraso en la producción por baja de flujo de pulpa hacia la siguiente etapa.		
Suministrar energía eléctrica para el funcionamiento del motor del molino.	Bajo aislamiento en los motores de molino y caja de conexiones	Por baja temperatura del medio ambiente o por paralizaciones prolongadas, el aislamiento de cables y motor desciende a valores que no permiten el arranque.	Retraso en el arranque inicial de la Planta de Pulpa, por haber estado en paradas programadas y/o reparaciones emergentes. Se ha ido solucionando en parte, colocando resistencias eléctricas en los motores.		

Elementos principales para el correcto funcionamiento del rotor del molino	Vibración alta en rodamientos del molino	Debido a desgaste prematuro de crucetas del rotor, de las cuchillas y pines de molino, se produce desbalance del rotor cuya señal es transmitida hacia los rodamientos.	Esta constituye la falla más representativa en estos equipos, pues el efecto que resulta es la inmovilización total del molino y realizar el balanceo dinámico para no perjudicar los rodamientos de la unidad.
Trasmisión de potencia desde el motor eléctrico hacia el molino desmedulador.	Desalineamiento de poleas / ruptura de fajas en sistema de transmisión	Por desgaste de chavetas de fijación de las poleas de trasmisión de potencia del motor hacia el molino, se produce desalineamiento entre ellas y consecuentemente, desgaste irregular de las correas o fajas que terminan por romperse.	El efecto de esta falla, es también vibración del molino; pero es identificable rápidamente al verificar el "cabeceo" de una de las poleas que alojan a las correas o fajas.
Refrigerar y suavizar el desarrollo del sistema de rodadura del rotor de molino desmedulador.	Fuga de lubricante en cajas de rodamientos de motor y molino	Por falla en los retenes de las chumaceras de los rodamientos, continuamente se producen fugas de lubricante y consecuentemente obliga a la paralización de la unidad.	El efecto inmediato es el recalentamiento del rodamiento y si no se renueva o repara el retén y coloca nuevo lubricante, este rodamiento colapsa y paraliza la unidad.
Sujeción pivotante en un extremo de las cuchillas, para que realicen el "martillado" del bagazo.	Desgaste/ruptura de pines de sujeción de cuchillas de molinos	A consecuencia de la constante fricción con el "ojo" o agujero de las cuchillas o martillos y la abrasión del bagazo, los pines o ejes pivotantes (4) de los molinos sufren desgaste y luego	El efecto inmediato de esta falla es también presencia de vibración excesiva, comprobada en el tablero de control mediante el ascenso de amperaje del motor. Al romper el pin,

Golpe y corte en el proceso de separación de fibra y médula del bagazo.	Desgaste de agujero y/o ruptura de cuchillas de molinos.	<p>ruptura en la garganta formada, obligando a parar la unidad.</p> <p>En forma similar que, en los pines, el rozamiento continuo y la abrasividad del material (bagazo), las cuchillas o martillos desgastan el agujero donde va el pin y se produce alargamiento y muchas veces ruptura de la cuchilla al rozar con la canastilla.</p>	<p>libera a cuchillas que se rompen u ocasionan daño a las canastillas.</p> <p>Al igual que en los pines, al presentarse esta falla, el ojo o agujero de la cuchilla se hace ovalado y representa alargamiento de la misma, lo cual ocasiona rozamiento con la canastilla y rompe la plancha perforada.</p>
-------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Número de Prioridades de Riesgo (NPR).

En la siguiente tabla, se muestra la selección crítica de todas las fallas de los molinos desmeduladores de bagazo evaluadas. Para determinar los valores NPR para cada falla involucrada en el AMEF, se ha realizado la ponderación correspondiente para ser considerada como: Inaceptable, reducción deseable y aceptable. Se tiene:

Puntajes del AMEF

- NPR >200 **Inaceptable (I)**
- 200 > NPR < 125 **reducción deseable (R)**
- 125 > NPR **Aceptable**

Tabla 10. Análisis del NPR(Número de Prioridades de Riesgo)

Ítem	Descripción de la falla crítica	G	O	D	NPR
F1	Ruptura de canastillas de molino.	7	10	2	140
F2	Bajo aislamiento en motores y caja de conexiones de molino	9	7	4	252
F3	Vibración alta en rodamientos del molino.	10	8	5	400
F4	Desalineamiento de poleas y rotura de fajas de transmisión.	8	6	5	240
F5	Fuga de lubricante en cajas de rodamientos de motor/molino	6	5	7	210
F6	Desgaste/ruptura de pines de sujeción de cuchillas de molino.	8	6	4	192
F7	Desgaste de agujero y/o ruptura de cuchillas de molino	8	10	1	80

Fuente: Elaboración propia

Entonces, podemos manifestar que 4 fallas son indeseables (57.14%), 2 fallas son reducible a deseables (28.57%) y 1 fallas son aceptables (14.29%). Estos porcentajes, serán referentes para determinar, luego de nuestro Plan, la proyección de los nuevos indicadores de mantenimiento.

4.3 Elaborar un plan de mantenimiento preventivo basado en el ACR y determinar el proceso de Balanceo Dinámico del molino.

4.3.1 Jerarquización de problemas:

De acuerdo a la metodología del ACR, se toma como referencia el desarrollo del AMEF y la norma ISO 14224:2016 que, a pesar de ser referente a hidrocarburos, se utiliza con frecuencia para generalizar en la industria. Se inicia con la actividad de Jerarquización cuyo objetivo es dar un ordenamiento y estructuración de la gestión de la información técnica de los activos, ello constituirá la base para mejorar los procesos de planificación y ejecución de las actividades. El formato oficial está basado en la estructura de equipos de la norma ISO 14224, donde se acondicionará la información técnica necesaria de los equipos.



FIGURA Nº 13: Jerarquización de problemas (trupal 2019)

Fuente: (ISO, 2016)

Se ha utilizado la jerarquización mostrada, para determinar el alcance del AMEF, pues ello determina la funcionabilidad que se presenta en el desarrollo, donde existe un análisis a nivel de equipo como detalle general, luego si se hace un análisis de componentes, carecería de sentido pues éstos no tienen una definición específica como función orientada hacia el proceso. Se realizó entonces, un análisis a nivel de mantenibilidad, pues la definición de su función está orientada hacia el

proceso y el detalle hacia los modos de falla. Para catalogar el tipo de mantenimiento para la tarea propuesta en los planes, se usaron las categorías y tipos de mantenimiento que propone la norma, los cuales se muestran en la siguiente figura 11 y tabla 12.

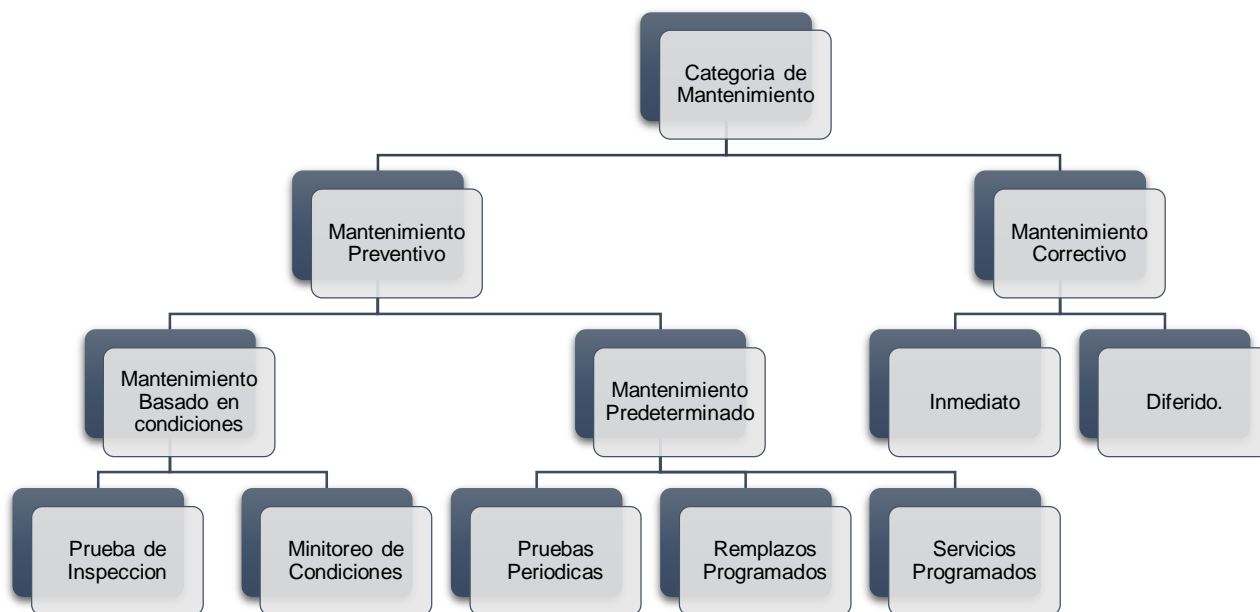


FIGURA Nº 14: Categoría de Mantenimiento (trupal .2019)

Tabla 11 Definiciones por tipos de mantenimiento de la norma ISO 14224:2016.

Categorías de Mantenimiento			
Mantenimiento preventivo: Mantenimiento para mitigar la degradación y reducir la probabilidad de falla.	Mantenimiento correctivo: Mantenimiento después de la falla con efectos de restablecimiento.		
Mantenimiento basado en la condición: Mantenimiento preventivo basado en la condición física.	Mantenimiento predeterminado: Mantenimiento preventivo de acuerdo a intervalos establecidos, sin saber la condición física.		
Prueba e inspección: Inspecciones de los equipos para verificar la condición y decidir si requiere mantenimiento preventivo.	Pruebas periódicas: Actividades ejecutadas en intervalos constantes de tiempo para detectar potenciales fallas ocultas.	Inmediato: Actividades correctivas para atender las emergencias.	Diferido: Actividades correctivas planificadas y programadas.
Monitoreo de la condición: Son actividades que corresponden al mantenimiento predictivo.	Reemplazos programados: Reemplazos de componentes en intervalos constantes.		
	Servicios programados: Actividades de servicios que prolongan la vida útil.		

Fuente: (ISO, 2016)

Ahora bien, de acuerdo a nuestro objetivo, utilizaremos el equipo con mayor criticidad y la falla con mayor valor, para establecer los planes de mantenimiento utilizando el ACR y así detallar la información característica.

Por lo tanto, en el contexto operacional del molino desmedulador es menester indicar que identificaremos el proceso al que pertenece el equipo y mostraremos un diagrama de bloques de los niveles respectivos a los que obedece la pirámide de jerarquización.

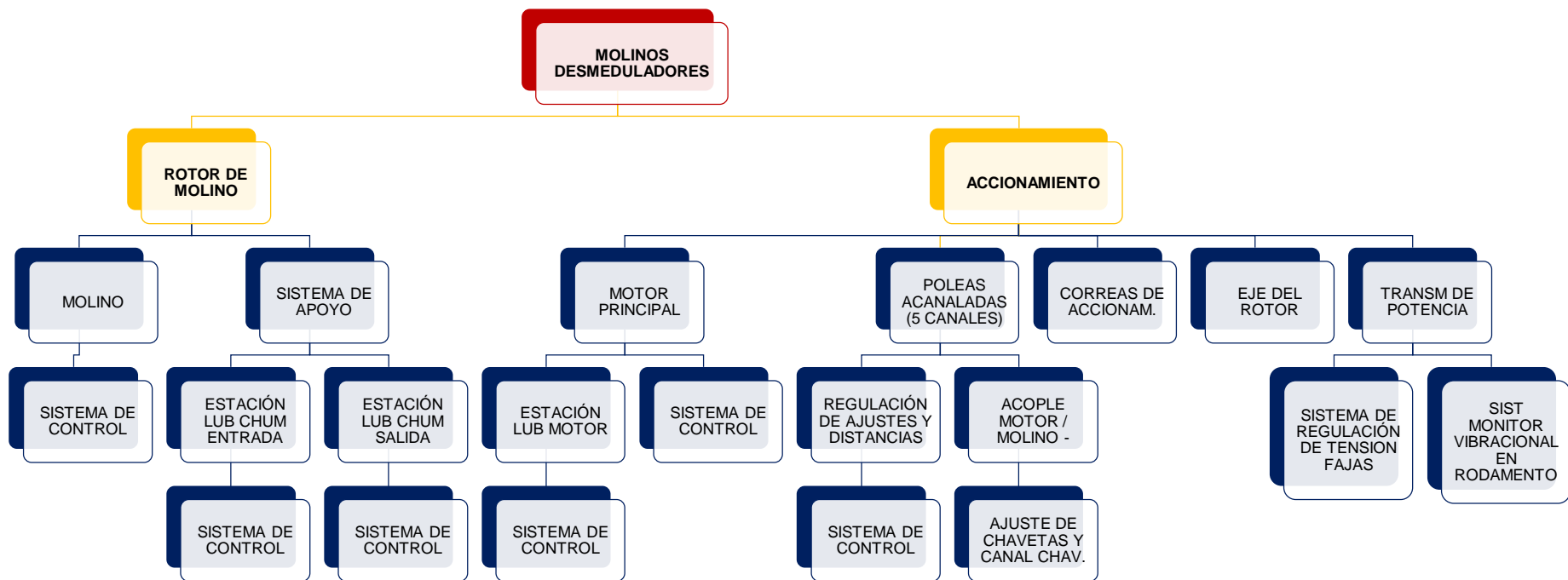


FIGURA Nº 15: Jerarquía de elementos para el equipo más crítico.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, la jerarquización quedaría de la siguiente manera:

Nivel 6 – Equipo (Rojo): Molinos desmeduladores

Nivel 7 – Sub equipo (Amarillo): Sistema de accionamiento (Poleas, correas, eje de rotor)

Nivel 8 – Ítem mantenible (Azul): Rodamientos, rotor, sistemas de control, sistema de apoyo, etc.

4.3.2 Contexto operacional de los molinos desmeduladores:

Describiremos el funcionamiento de los equipos.

Los molinos trabajan en el proceso, las 24 horas del día, en el tiempo programado teórico total de 8184 horas/año de operación (11 meses – 6 días no laborables); de los cuales, para el mismo periodo, se calcula un promedio de 1200 hrs de parada por fallas en el equipo de desmedulado.

La lubricación de las chumaceras, es realizada por personal especializado en el rubro. El objetivo de la lubricación es evitar el desgaste prematuro de los rodamientos de rotor de molino, permitir el libre giro rotor y mantener refrigeradas las chumaceras y así evitar elevadas temperaturas que puedan degradar el lubricante y los otros componentes.

Cada molino está provisto de un motor principal de corriente alterna, 440 Voltios y que gira a 1800 r.p.n. Para inicio de funcionamiento tiene un par de arranque de 4 veces su potencia nominal.

El rotor del motor está sostenido sobre chumaceras con rodamientos axiales, al igual que las chumaceras de los molinos, por lo que cuentan con el mismo sistema de lubricación.

El eje del motor está acoplado a una polea conductora de 5 canales y el eje del rotor del molino a una polea conducida también de 5 canales, cuya transmisión de potencia se realiza mediante correas o fajas tipo 5V-1250. Esta característica muy flexible, ayuda a absorber des alineamientos leves, en un rango aceptable.

El rotor del molino, compuesto por 25 juegos de crucetas de ½” de espesor, que describen un diámetro de 28”, es el componente principal del sistema. En los espacios que general el acomodo de las crucetas, se insertan las cuchillas o martillos para, mediante el impacto y corte, separar la fibra y el polvillo o médula del bagazo de caña de azúcar. Cuentan con un sistema de apoyos o rodamientos cuya función es facilitar el giro continuo de la unidad y son parte fundamental en la transmisión de vibraciones que pueden ocasionar daño crítico a todo el molino e incluso paralización de operaciones productivas. De acuerdo a nuestro estudio de criticidad, AMEF Y NPR, resultaron ser las fallas de mayor incidencia y valor crítico.

Los molinos también cuentan con su sistema de accionamiento, formado por un motor de 190 kW de potencia, controles automatizados y de parada de emergencia que evitan, muchas veces daños extremos de las unidades.

4.3.3 Análisis de las causas críticas.

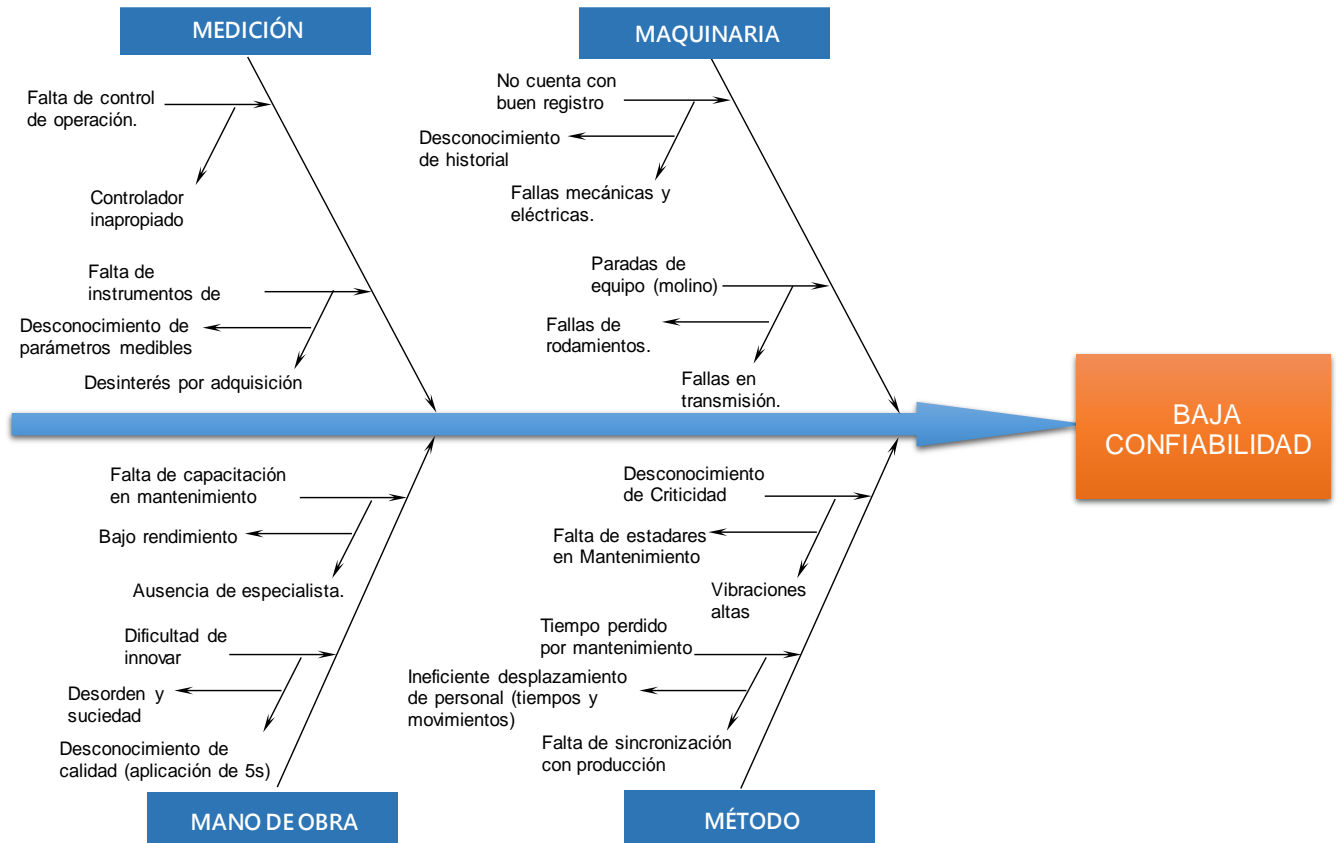


FIGURA Nº 16 Diagrama de Ishikawa de las causas críticas.

Tabla 12 Programa de Mantenimiento preventivo para el sistema de Molinos

Componentes	Diario	Semanal	Mensual	Semestral	Anual
Poleas acanaladas (5 canales)			Verificar desgaste – cambiar.		
Aceite de Motor	Verificar el nivel (completar)				
Sistema de Lubricación		Revisar cañerías y nivel de aceite.			
Unidad rotativa del molino desmedulador			Verificar medidas, ajustar (si fuera necesario)		
Transmisión del motor al molino.			Verificar/corregir el alineamiento.		
Rotor del molino (cruceas y cuchillas)				Revisar / reparar (Si fuera necesario)	
Lubricación de chumaceras		Verificar nivel y engrasar.			
Análisis Vibraciones de unidad.			Verificar en chumaceras de motor y molino.		
Motor principal de la bomba					Mantenimiento General.
Anclaje del sistema molino-motor		Verificar soltura mecánica.			
Sistema eléctrico y motor.			Verificar caja de conexiones y megado de motor/líneas.		
Sensores de tiempo				Inspeccionar su funcionamiento.	

Fuente: Elaboración propia (Plantillas Ingenio-empresa)

4.4 Determinar los nuevos indicadores de mejora, luego del proceso de Análisis Causa Raíz y Balanceo Dinámico de Rotores, para contrastar con los iniciales.

4.4.1 Proceso de Balanceo Dinámico de rotor de molino desmedulador.

El proceso se efectúa, teniendo en cuenta que, a través de la presente investigación, se ha determinado que es la falla más crítica o mayor en las unidades denominadas molinos verticales desmeduladores de bagazo de caña de azúcar, para obtención de la “fibra” utilizada como materia prima para la pulpa de papel. La parte complementaria y separada en estos equipos, se denomina polvillo o “médula” y es desechada para este proceso, pero utilizada como complemento combustible en las calderas de la empresa.

A continuación, se presenta el proceso de balanceo dinámico, en el sitio, para este tipo de rotores, que se efectuó en el molino N° 3:

EJEMPLO DE COMO PREPARAR EL DIAGRAMA Y DETERMINAR LA UBICACIÓN Y CANTIDAD DE LOS PESOS DE BALANCE (MOLINO 3)

- 1) Hacer andar el desmedulador sin cuchillas y sin pesos de prueba. Medir la vibración “O” = **250 micrones**. Trazar un círculo con centro “O” y radio 250, a una escala determinada. En los ejes vertical y horizontal marcar puntos A, B, C y C’.
- 2) Colocar dos pesos de prueba de 60 gr. cada uno en la plancha inferior (crucecita) lado “A”. Hacer andar el desmedulador y medir la vibración: “A” = 260 micrones. Con centro en “A”, trazar un arco con radio 260.
- 3) Retirar los dos pesos de prueba del lado “A” y reubicarlos en el lado “B”. Hacer andar el desmedulador y medir la vibración: “B” = 330 micrones. Con centro en “B”, trazar un arco de radio 330.
- 4) En el gráfico, anotar el punto donde cruzan los dos arcos (en un lado) y medir el largo del vector “V” = 160. Este punto determina la ubicación y cantidad del peso de balance requerido.

$$\text{Peso requerido} = \frac{\text{radio O} * \text{Peso de prueba}}{\text{Vector "V"}} = \frac{250 * 120}{160} = \mathbf{187.5 \text{ gr.}} \dots\dots\dots(\mathbf{x})$$

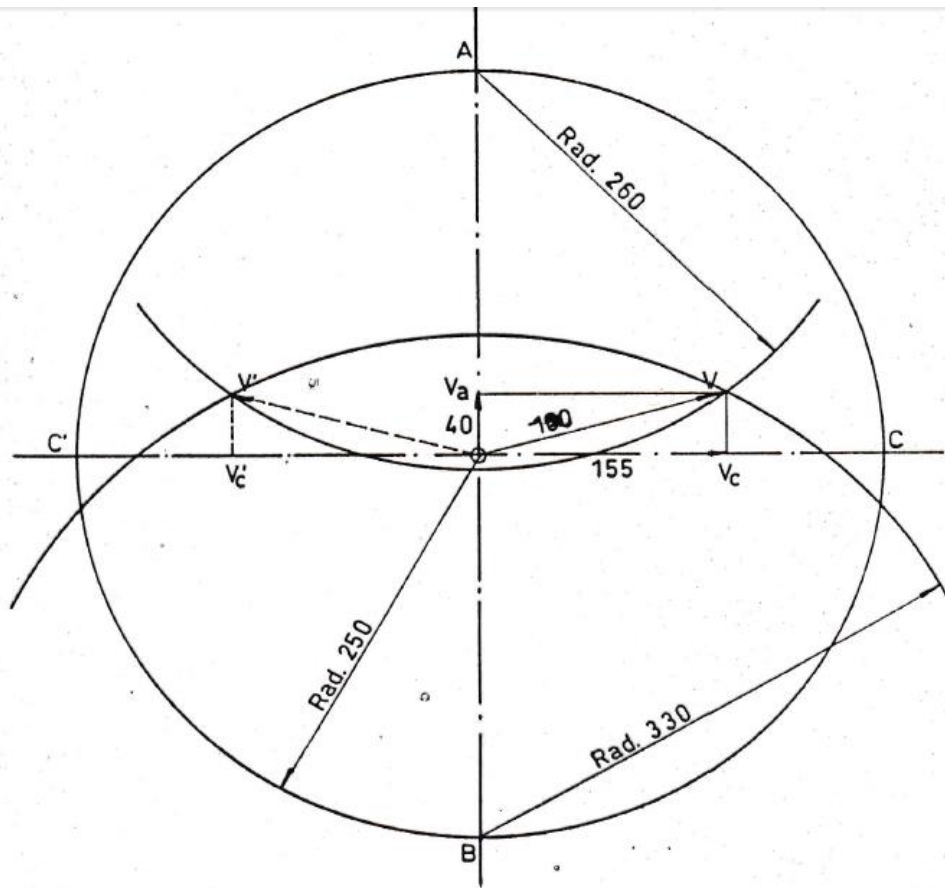


FIGURA N° 17 Diagrama de balanceo dinámico de rotor de molino

Fuente: Elaboración propia.

- 5) Con este tipo de rotor, con planchas cruzadas, solamente es posible agregar peso en las planchas (crucetas). Hay que distribuir, entonces, vectorialmente el peso en las direcciones “A” y “C”:

$$\text{Peso en la dir. A} = \frac{40}{160} * 187.5 = 47 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso en la dir. C} = \frac{155}{160} * 187.5 = 182 \text{ gr.}$$

Por lo tanto, se seleccionan pesos de varillas cuadradas aparentes para cada uno de los lados.

- 6) Antes de soldar estos pesos en la dirección “C” compruebe con el peso de 182 gr. en la dirección “C”, para ver donde ocurre la vibración mínima.
- 7) Al realizar la verificación, con los pesos de balanceo ya soldados, se verificó que la nueva lectura de vibración del rotor estuvo en 35 micrones, lo cual se consideró aceptable y eficiente.

4.4.2 Determinación de los nuevos indicadores de mejora, obtenidos a partir del Plan de mantenimiento.

En base a lo obtenido, proyectaremos según el NPR, lo siguiente: Se resolverá el 57.14% de todas las fallas existentes en los molinos desmeduladores de la empresa productora de papel, existiendo aún el 42.86% de fallas entre deseables y aceptables.

Por lo tanto, determinaremos los nuevos indicadores de mantenimiento:

Tabla 13. Determinación de nuevos indicadores de mantenimiento.

MOLINOS DESMEDULADORES DE BAGAZO PARA PULPA DE PAPEL.	MTBF	MTTR	DISPONI B.	CONFIA B.
MOLINO No 1	74.71	3.13	95.813	90.19
MOLINO No 2	72.40	3.23	95.542	90.00
MOLINO No 3	85.29	3.07	96.400	91.36
TOTAL	77.47	3.14	95.944	90.52

Fuente: Elaboración propia

Comentario:

La proyección la hemos realizado en base al porcentaje representativo de fallas entre deseables y aceptables (42.86%), que harían variar al MTTR; por lo tanto, el nuevo MTTR será el resultado del, y el nuevo MTBF será el resultado de así, para obtener el primer resultado. Usando el mismo método se pudo calcular el MTTR y MTBF de cada equipo en condiciones proyectadas; y, consecuentemente los nuevos indicadores de mantenimiento.

$$MTTR = 7.30 * 0.4286 = 3.13 \text{ horas/falla}$$

$$MTBF = (7.30 - 3.13) + 70.54 = 74.71 \text{ horas/falla}$$

Usando el mismo método se pudo calcular el MTTR y MTBF de cada equipo en condiciones proyectadas; y, consecuentemente los nuevos indicadores de mantenimiento.

Tabla 14 Cuadro comparativo de indicadores de mantenimiento (antes y después del Plan).

MOLINOS								
DESMEDULADORES	MTBF	MTBF	MTTR	MTTR	DISPONIB.	DISPONIB.	CONFIAB.	CONFIAB.
DE								
BAGAZO PARA	INICIAL	EN	INICIAL	EN	INICIAL	EN	INICIAL	EN
PULPA DE PAPEL.		MEJORA		MEJORA		MEJORA		MEJORA
MOLINO N° 1	70.54	74.71	7.30	3.13	89.65	95.81	90.19	90.19
MOLINO N° 2	68.10	72.40	7.53	3.23	88.94	95.54	89.89	90.00
MOLINO N° 3	81.20	85.29	7.16	3.07	90.87	96.40	91.20	91.36
TOTAL	73.28	77.47	7.33	3.14	88.94	95.94	90.43	90.52

Fuente: Elaboración propia

4.5 Evaluar la inversión, proyectar el beneficio económico y retorno operacional de la inversión, para el caso de implementación del sistema.

4.5.1 Beneficios económicos en reducción de horas pérdidas:

Tabla 15. Beneficios a la reducción de horas perdidas

Equipo	Tiempo parado inicial (hrs/año)	Tiempo parada mejora (hrs/año)	Ahorro en horas pérdidas (hrs/año)	Costos de operación (USD/hr)	Ahorro (USD/año)
Molino desmedulador N° 1	819.70	350.37	469.33	75.00	35200.08
Molino desmedulador N°	865.44	367.94	497.50	75.00	37312.46
Molino desmedulador N° 3	730.50	316.24	414.26	75.00	31069.50
Total	2415.64	1034.55	1381.09	75.00	103582.04

Elaboración propia

4.5.2 Costos para la implementación del mantenimiento predictivo

Tabla 16. Costos en mantenimiento predictivo en molinos desmeduladores

Acción	Frecuencia	Costo unitario (USD)	Costo total (USD/año)
Trabajos de alineamiento	12 veces/año	35.00	420
Análisis vibracional a los rodamientos	24 veces/año	45.00	1080
Total			1500.00

Fuente: Elaboración propia

Costo total en mantenimiento predictivo: 2 220.00 x 3 unidades = **4,500.00 US\$**

4.5.3 Costos para la implementación del mantenimiento preventivo.

Tabla 17. Costos en mantenimiento preventivo en molinos desmeduladores.

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Motor			
Mantenimiento de estator	1	180.00	180.00
Mantenimiento de rotor	1	150.00	150.00
Rodamientos	2	90.00	180.00
Aceite para motor (bidón 20 litros)	6	175.00	1050.00
Colector	1	40.00	40.00
Mantenimiento caja de conexiones	1	85.00	85.00
Linealidad de poleas	1	30.00	30.00
Limpieza y pintura	1	35.00	35.00
Molino Desmedulador			
Rotor de giro (molino de crucetas)			
Lubricante para rodamientos Grasa			
BRB 520 (balde de 40Kg.)	3	210.00	630.00
Mantenimiento de crucetas.	1	300.00	300.00
Rodamientos de accionamiento	2	320.00	640.00
Sellos mecánicos y empaquetaduras	2	250.00	500.00
Sistema hidráulico			
Tuberías	2	80.00	160.00
Válvulas	2	25.70	51.40
Drenajes	1	38.00	38.00
Elemento de control (manómetros)	1	30.00	30.00
Total:			4 099.40

Fuente: Elaboración propia.

Costo total en mantenimiento preventivo: 4 099.40 x 3 unidades = **12 998.40 US\$**

4.5.4 Beneficio útil.

Tabla 18. Resumen de los costos de mantenimiento

Ahorro en horas perdidas	+ 103 582.04 US\$/año
Costos predictivos	- 4500.00 US\$/año
Costos preventivos	- 12 998.40 US\$/año
Beneficio útil	86083.64 US\$/año

Fuente: Elaboración propia.

4.5.5 Inversión en activos fijos y tecnología para la implementación del ACR basado en el AMEF

Tabla 19. Inversión en activos fijos.

Activos fijos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Molinos desmeduladores de bagazo	03	15000.00	45000.00
Vibró metro PCE-VD 3	1	8000.00	8000.00
Equipo de alineamiento láser	1	3000.00	3000.00
Horno para secado de rotores y estatores	1	2000.00	2000.00
Instrucción al personal	5	200.00	1000.00
Costo total			59000.00

Fuente: Elaboración propia. Retorno operacional de la inversión.

4.5.6 Retorno operacional de la inversión.

$$\text{R. O. I} = \frac{\text{Inversion Inicial}}{\text{Beneficio Util}}$$

$$\text{R. O. I} = \frac{59000.00\text{USD}}{86083.64\text{USD/año}}$$

R.O.I = 0.68 años ≈ 5.16 meses

V. DISCUSIÓN

En función al desarrollo de nuestra investigación, podemos decir que se ha determinado la acción positiva de la estrategia del mantenimiento basado en el ACR (Análisis Causa Raíz), a través de la cual se ha podido establecer los indicadores de mantenimiento antes y después de la mejora del sistema de gestión; igualmente, se han determinado las partes fundamentales que conforman la parte crítica, se ha aplicado el AMEF como fundamento del plan de mantenimiento y se ha presentado la metodología de implementación del ACR para el proceso de mejora en mantenimiento.

A fin de debatir nuestros resultados, resaltamos como referencia lo estipulado por nuestros antecedentes para la correspondiente contrastación:

En el Artículo de la revista de Ingeniería Industrial “Bases de Gestión de Mantenimiento” España (Bases de Gestión de Mantenimiento, 2008), se da como alcance la realización de una encuesta para determinar pautas del desarrollo de un sistema de gestión el mejoramiento de indicadores y costos en un escenario industrial, lo cual significa un aporte a nuestro tema, para tomar como ejemplo este recurso en el desarrollo de nuestra investigación, pues además se debe tener en cuenta la cultura y la organización de la empresa, particularmente para comprender el nivel existente de gestión de la información en la industria, donde se pueden esperar cuellos de botella en la adquisición, transmisión o procesamiento de información relacionados con la confiabilidad y las operaciones de mantenimiento. También, en la investigación de (Moncada, 2012), tomamos como premisa el tratamiento sobre temas de análisis vibracional, enfocados al problema de fallas prematuras e incipientes en los rodamientos; pero equivocadamente asume condiciones particulares de defectos localizados solamente en los rodamientos, como si fueran responsables causantes de la vibración por lo que utiliza técnicas de dominio de la frecuencia y el método de la envolvente a fin de comprobar los espectros esperados en teoría. Discutiendo a ello, nuestro estudio no contempla a los rodamientos como agentes responsables de la vibración, sino como elementos transmisores, mediante la vibración, de alguna falla intrínseca del equipo que en nuestro caso es el conjunto motor-molino desmedulador y utilizamos la técnica

específica de solución de la falla crítica, mediante el balanceo dinámico del rotor de molino.

En contrastación con los resultados obtenidos por (Chiroque, 2017), quien utilizando el método de elementos finitos (MEF) con el fin de prevenir fallas mecánicas en máquinas rotativas asevera que es de vital importancia considerar la medición y control de las vibraciones torsionales en el programa de mantenimiento predictivo de las maquinas rotativas en la industria, a fin de evitar fallos mecánicos debido a esfuerzos torsionales que conlleven a fallas por fatiga, nuestra investigación recibe el aporte del movimiento torsional, sin embargo complementa el sentido predictivo de máquinas rotativas, realizando el seguimiento de fuerzas en desnivel producidas por la pérdida de peso de elementos secundarios como son las cuchillas y pines desgastados de los molinos desmeduladores, los cuales alertan el desbalance del rotor con la consecuente falla de los rodamientos, tan importantes en el correcto desempeño de los molinos.

Asimismo, respecto a la investigación de (Rojas, 2018), quien establece un sistema de detección de fallas para bombas centrífugas, basado en el análisis vibracional y método de alineamiento de ejes, únicamente especifica la elección del método para detectar las fallas, mas no para la solución respectiva; en nuestro estudio estamos plenamente identificando la falla más crítica (desbalance) y desarrollamos la metodología de solución mediante el balanceo dinámico de rotores en el sitio o lugar de operación de nuestros molinos desmeduladores. Esta metodología es innovadora por cuanto reta al concepto clásico de balanceo dinámico que especifica que solamente es válido para rotores cuyo diámetro sea mayor o igual a 1.5 veces la longitud de rotor, lo que hacía prever que en nuestro caso ello no era posible; sin embargo, se ha llegado a demostrar la validez de este balanceo, diferente al clásico que tomaba 3 puntos de referencia a 120° , por el presente con 4 puntos de referencia (2 a 2) en ensayos aleatorios y definidos.

Finalmente, en concordancia con lo especificado en la investigación de (Chávez, 2018), quien realizó un análisis de causa raíz en bombas; nosotros, hemos ejecutado también el análisis de causa raíz a los molinos desmeduladores, pero determinando mediante el estudio de criticidad y AMEF, como elementos notables a los rodamientos especiales no precisamente en falla, sino en forma preventiva apoyados por el análisis vibracional y salvaguardando el deterioro de estos

rodamientos tan importantes y onerosos en los equipos denominados molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar, en diferencia con el autor indicado quien considera primero la determinación como elementos más críticos a los sellos mecánicos y rodamientos por el mayor número de fallas, sin demostrar la importancia de prevención de estos repuestos claves en el funcionamiento de las máquinas.

VI. CONCLUSIONES

1. Evaluando el escenario inicial de los equipos molinos desmeduladores, hemos referido la presencia de fallas de diferentes tipos de las cuales hemos podido precisar los indicadores de mantenimiento que representan disponibilidades del 89.65%, 88.941% y 90.37% para los molinos 1, 2 y 3, respectivamente; asimismo confiabilidades de 90.19%, 89.89% y 91.20%; algo distantes de las óptimas consideradas por la teoría del mantenimiento que especifica que la disponibilidad y confiabilidad mínimas deben ser 90%.
2. De acuerdo a nuestro análisis de criticidad establecido para las fallas de las 7 fallas identificadas para los molinos desmeduladores, en base a los 5 criterios reglamentarios: frecuencia de fallas, impacto operacional, flexibilidad operacional, costos de mantenimiento, impacto de seguridad y medio ambiente, se estableció que de las fallas preponderantes generales que son 7, se identifican 4 como críticas y 3 mediamente críticas, para cada unidad en el cuadro respectivo.
3. Utilizando el Análisis de Modos y Efecto de Fallas, se trabajan las fallas críticas y mediamente críticas de los molinos desmeduladores, determinando a través del número de prioridad (NPR) de riesgos que 4 fallas (57.14%) son indeseables, 02 falla (28.57%) son reducibles a deseables y 1 falla (14.29%) se considera aceptable.
4. Elaborando el Plan de mantenimiento en base a ACR, se consideró adicionalmente al estudio del AMEF y NPR de las 7 fallas características de los molinos desmeduladores de Planta de Pulpa de la papelera seleccionada, el estudio de jerarquización de problemas, identificación del equipo más crítico en el contexto operacional y se ha realizado el análisis causa raíz utilizando el correspondiente Diagrama de Ishikawa como lo establece el ciclo de las etapas de implementación del ACR., lo cual definió como resultado de falla más crítica y motivo de prevención, al posible efecto de vibración censado por los rodamientos del rotor de molino, en cuyos componentes se realiza la toma de datos en el balanceo dinámico.

5. Se ilustró mediante el método gráfico-analítico, el proceso innovador de balanceo dinámico en el sitio para rotores de molinos desmeduladores, utilizando 4 lecturas (2 a 2) a fin de obtener preventivamente el menor número de fallas de las unidades que representan gran importancia para el desarrollo de actividades productivas de la Planta de Pulpa de la empresa papelera de la región. Este método es válido por la forma experimental a la cual se ha tenido acceso y comprobación de resultados.
6. Se determinó que, en estado de mejora, utilizando el método de mantenimiento en base al ACR, molinos desmeduladores tienen una disponibilidad mínima de 95.813%, 95.542% y 96.400%; confiabilidad de 90.19%, 90.0% y 91.36%, respectivamente para los molinos 1, 2 y 3; resultado de un tiempo promedio entre fallas de 74.71, 72.40 y 85.29 horas/falla, y un tiempo promedio para reparar de 3.13, 3.23 y 3.07 horas/falla, respectivamente para los 3 molinos desmeduladores, unidades en estudio.
7. En el análisis económico respecto a la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en el análisis causa – raíz para los molinos desmeduladores de bagazo de una empresa papelera, se tiene una inversión de, beneficio útil de con un periodo de retorno de la inversión de 9.14 meses, lo cual es satisfactorio para la empresa.
8. Se han considerado en Anexos, los cuadros de Evaluación del NPR: Número de prioridad de Riesgos, el desarrollo pormenorizado del estudio de criticidad de las fallas incluyentes en las unidades denominadas molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar, definiciones y términos de la metodología de análisis causa raíz (ACR), proceso de análisis de causa raíz, las 8 causas de los fallos y el diagrama del ciclo de etapas de implementación del ACR.

VII. RECOMENDACIONES

1. Recomendamos primeramente que el personal técnico de la empresa papelera seleccionada, deberá ser capacitado y concientizado en la importancia de la interpretación de los indicadores de mantenimiento e índices de criticidad; de esa forma podrán identificar continuamente, los puntos críticos de los activos denominados molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar, de su funcionamiento correcto y síntomas de desbalance para así establecer posibles planes de mejora continua en el sistema de gestión de mantenimiento.
2. Se recomienda, asimismo, revisar frecuentemente, por lo menos una vez al año, todas las actividades propias del sistema de gestión de mantenimiento basado en el análisis de modos y efectos de fallos, especialmente a los equipos determinados como críticos en el presente estudio, de los molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar, dando cumplimiento estricto a lo establecido en las hojas de decisiones del AMEF.
3. También se recomienda hacer el seguimiento correspondiente e inspecciones frecuentes, utilizando las herramientas de mantenimiento predictivo para optimizar el desempeño de las tareas de mantenimiento y llegar a los resultados esperados, que tiendan a la disminución de tiempos perdidos, los cuales tienen relación directa con el incremento de los costos por cambio/reparación de componentes claves y onerosos como son los rodamientos de los rotores de molinos desmeduladores, motores de corriente continua, poleas de transmisión, sistemas de lubricación, etc. que perturbarán el desempeño de actividades productivas.

REFERENCIAS

- ACHIG Cabrera, Rafael Antonio. *Evaluación del ruido y su incidencia en la salud laboral en el área del molino 5 de la empresa productos familia Sancela del Ecuador en el período 2015 - 2016*. Latacunga - Ecuador : LATACUNGA / UTC / repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/3100.
- ACOSTA, Johanny del Carmen Ovalles, SOLER, Victor Gisbert y MOLINA, Ana Isabel Pérez. *Herramientas para el análisis de causa raíz (ACR)*. s.l. : 3c Empresa: investigación y pensamiento crítico, 2017.
- ÁVILA. *Precisión del mantenimiento preventivo para evitar averías o fallas*. 1992.
- BENJAMIN, Gino. *Indicadores de Mantenimiento disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad*. 2016.
- CALDERÓN Rodríguez, Eder Eduardo. *Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para la línea de extracción trapiche de la empresa Casa Grande s.a.a. Casa Grande -trujillo : Universidad Nacional de Trujillo, 2016*. dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/8566.
- CARMEN, Carnero Moya María Del. *Programas de Mantenimiento Predictivo*. España : s.n., 2012.
- CARO , Laura. *7 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos*. Colombia : s.n., 2019.
- CARRASCO, Francisco Javier Cárcel. *Disponibilidad, incertidumbre y cadena de fallo en mantenimiento*. ESPAÑA : Universidad Politécnica de Valenci, 2016.
- CARRERA Pruna, Diego Amilcar. *Diseño e implementación de una estación didáctica para estudio de fenómenos oscilatorios en sistemas dinámicos*. Quito -Ecuador : Quito, 2018., 2018. /bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19543.
- CATALAN, Jorge popeda ,Mirela Guardiola. *Análisis de causa raíz*. 2019.
- CHÁVEZ. *La causa raíz en el mantenimiento*. 2018.
- CHÁVEZ, Bolaños . *Análisis causa raíz a bombas hidráulicas*. 2012.
- CHIROQUE, carlos. *Utilización de elementos finitos para prevenir fallas mecánicas en máquinas rotativas*. 2017.
- CONTRERAS Calderón, enrique, y otros. *Industrial Application of vibration analysis* . veracruz-mexico : Ingeniería Industrial, 2018.
- CUI, Yongcun, Yongcun. *Effect of cage dynamic unbalance on the cage's dynamic characteristics in high-speed cylindrical roller bearings*. 2019.
- ESPINOZA Ronquillo, Clemente Douglas. *Repotenciación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración enfocado a equipos rotatorios usados para el proceso de producción de una planta química*. Guayaquil - Ecuador : s.n., 2019. repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12483.

FABIŚ DOMAGAŁA y Joanna. Application of Ishikawa diagram for failure analysis of a car water pump. 2017. págs. 193-198.

FERNANDEZ, Alfonso. Holguras de elementos rotativos. 2017.

GALIETERO Olivares, JA. Implantación de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo en una nave industrial dedicada al almacenaje y distribución. Valencia-España : s.n., 2015.

GARY. *fundamentos de equilibrio*. Whitmore Lake, MI 48189 • USA : s.n., 2014.

GILBERTO, Cruz Ortega. Análisis de la influencia de las vibraciones en rodamientos de equipos rotatorios de la industria azucarera. 2018.

GORDILLO Calle, Joan Fred, Chavez Cuellar, Anibal Americo y Bejarano Meza, Maria Elizabeth. Prototipo de manillar a base de polisopreno para mitigar riesgo físico de las vibraciones en operadores que desarrollan actividades de compactación con apisonador vertical. Arequipa : Universidad Tecnológica del Perú, 2019. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/1937>.

GOTI. *Sound-based predictive maintenance: a cost-effective*. 2008.

GOTI. Bases de Gestión de Mantenimiento ingeniería Industrial 2008.

HUDSON, Andrew y CAMPARO, James. *Quantum System Dynamics and the Quasistatic Approximation*. 2020 : s.n. Vols. vol. 13, .

IBÁÑEZ Albalade, Marc. *Plan de mantenimiento predictivo de un turbogenerador de 8MW*. Union Europea -España : Universitat Jaume I, 2020 .

ISO. Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. *ISO 14224:2016*. USA, USA : International Organization for Standardization, 2016. pág. 272.

LOAYSAGA, A. *Defectos generados metalurgicos por los gases en la fundicion*. AZTERLAN : s.n., 2008.

MCQI, Geoff Vorley MSc. *MINI GUIDE TO ROOT CAUSE ANALYSIS*. s.l. : © Quality Management & Training, 2008.

MENDOZA Franco, Gabriel Armando. *Estudio y diagnóstico del estado de operación de motores eléctricos mediante análisis de vibraciones. Propuesta de guía de mantenimiento*. s.l. : Guayaquil-Ecuador, 2019. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13389>.

MONCADA. *Análisis de vibraciones - Mantenimiento Predictivo*. 2012.

OLARTE, Willian. *gestión del mantenimiento*. Lima Perú : universidad tecnológica del Perú, 2010.

ROJAS. *Sistema de detección de fallas para bombas centrífugas, basado en el método de análisis vibracional y alineamiento de ejes*. 2018.

- ROJAS Vasquez, Hemerson Omar. 2018. *REDUCCIÓN DE FALLAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS MEDIANTE TÉCNICAS PREDICTIVAS - PLANTA GOLD MILL - YANACOCHA*. Chiclayo : s.n., 2018.
- ROMERO GALLEGOS, Kimberly Nicolle y Rubio Mori, César Raúl Raúl. *Mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones para reducir costos de mantenimiento en COPEINCA S.A.C. CHimbote - Peru* : s.n., 2019. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/44453>.
- SACI, N. *Data collection methods. Research Methodology*. 2014.
- SAETEROS, Padron Y Diego, Fernando. *Propuesta de mejora del plan de mantenimiento del molino vertical de carbon de la industria cementera UCEM, Planta Guapan. CUENCA ECUADOR* : s.n., 2020.
- SANTIAGO, Garcia garrido. *Organización y gestión integral de mantenimiento. ESPAÑA* : s.n., 2013.
- SANTIAGO, Koval. *Convergencias Tecnológicas En La Era De La Integración Hombre Maquina. Mexico* : s.n., 2011. ISSN-e 1605-4806.
- SAUNDERS, Adam. *"Technology's Impact on Growth and Employment." In The Age of Perplexity. Rethinking The World we knew. Madrid-España* : Penguin Random House Grupo, 2017.
- TAVARES, Lourival Augusto. *administracion moderna del manteneinmiento. Brasil* : Novo Polo Publicaciones, 2014.
- TORRES ROJAS, Jaime Paul. *"Propuesta de implementación de un programa de mantenimiento preventivo para la disminución de costos de mantenimiento, aplicado en planta de pulpa en la empresa Trupal SA"*. Trujillo- Peru : s.n., 2018.
- YANG, Yi. *A general method to predict unbalance responses of geared rotor systems. Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vols. vol. 381, p. 246-263.
- YANG, Yang. *Dynamic performance of a rotor system with an initial bow and coupling faults of imbalance-rub during whirling motion. . s.l. : Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019.
- ZAPANA Flores, Brandon Angelo. *Proyecto de un procedimiento de diagnóstico de fallas por análisis vibracional en Bombas y Ventiladores. Arequipa -Peru* : universidad nacional de Arequipa , 2017.

ANEXOS

Anexo 01. Operacionalización de variables independientes y dependientes

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Escala de medición
Proceso de análisis de causa raíz	Técnica que nos permite determinar el agente causal de un problema que genera daños o fallos a través del tiempo.	Diagrama Ishikawa o “espina de Ishikawa”	ACR	Cualitativa Ordinal
Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Escala de medición
	Probabilidad de que un activo cumpla con un tiempo específico de trabajo bajo condiciones establecidas.	$R = e^{\frac{-\lambda * T}{100}}$	Confiabilidad	Cuantitativa (%)
confiabilidad	Posibilidad de que un equipo pueda ser reparado en un tiempo determinado.	$M = 1 - e^{\frac{-\mu * T}{100}}$	Mantenibilidad	Cuantitativa (%)
	La confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado	$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	Disponibilidad	Cuantitativa (%)

Fuente: Elaboración propia

Anexo 02. fallas en el año 2019 molino desmedulador n°1

MES	CANASTILLAS DE MOLINO	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA ELÉCTRICO	TIEMPO DE PARADA	REVISIÓN Y/O CAMBIO DE RODAMIENTOS	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE TRANSMISIÓN	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE LUBRICACIÓN	TIEMPO DE PARADA	PINES DE SUJECIÓN DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA	ROTURA DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA
ENE														
FEB														
MAR	2	10.2	0		1	14.4	1	7.6	1	4.3	0		0	
ABR	0		1	6.7	1	20.0	2	15.1	2	8.4	1	3.8	2	8.8
MAY	2	12.4	1	5.5	0		1	8.2	2	7.6	0		2	8.2
JUN	0		1	6.0	1	22.5	2	16.1	2	8.7	1	3.4	2	8.2
JUL	1	4.5	1	4.8	1	28.1	1	8.2	1	4.5	1	3.3	2	8.5
AGOS	2	10.1	1	5.1	1	27.8	2	16.7	2	7.8	1	3.6	2	8.8
SET	0		1	6.2	1	27.4	1	7.6	2	7.7	1	3.6	2	8.9
OCT	1	5.1	2	13.2	1	28.3	2	16.1	2	8.3	1	3.4	2	8.8
NOV	2	10.8	1	5.5	1	27.4	2	15.8	2	8.1	1	3.7	2	8.7
DIC	1	4.6	1	10.0	1	27.7	2	16.4	2	8.8	1	3.8	2	7.5
TOTAL	11	57.7	10	63.0	9	223.6	16	127.8	18	74.2	8	28.6	18	76.4

Fuente: Cuaderno de reportes – Mecánico de turno de Pta. de Pulpa

Anexo 3. Fallas en el molino N°1 en el año 2019

MES	HORAS OPERADAS	N° FALLAS/MES	N° HORAS/MES DE FALLAS
ENERO	649	9	68.3
FEBRERO	649	9	68.3
MARZO	140 (649)	5 (9)	36.2 (68.3)
ABRIL	657.2	9	62.8
MAYO	678.1	8	41.9
JUNIO	655.1	9	64.9
JULIO	634.1	8	61.9
AGOSTO	664.1	11	79.9
SEPTIEMBRE	658.6	8	61.4
OCTUBRE	660.8	11	83.2
NOVIEMBRE	640.0	11	80.0
DICIEMBRE	593.2	10	78.8
TOTAL	7788.2	112	819.7

Anexo 4. Total, de horas del año 2019.

DIAS/AÑO	HORAS/DIAS	HORAS/AÑO
365	24	8760

Anexo 5. Días no laborales anualmente.

DIAS NO LABORALES	FECHAS	HORAS/DIA
ENERO	1	24
MAYO	1	24
JULIO	2	48
DICIEMBRE	3	72
TOTAL	7	168

Anexo 6. Parámetros de operación promedio de molino N°1

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
TIEMPO PROGRAMADO	8592.0	HORAS/AÑO
OPERACIÓN	7778.0	HORAS/AÑO
REPARACIÓN	819.7	HORAS/AÑO
NUMERO DE FALLAS	112.0	FALLAS/AÑO

Anexo7. **Mensuales** horas /mes

PARÁMETRO	MENSUALMENTE/HORAS	DÍAS/HORAS
TIEMPO PROGRAMADO	716.0	23.87
OPERACIÓN	648.2	21.61
REPARACIÓN	68.3	2.28

Anexo 8. Total de fallas del año 2019 máquina, molino desmedulador N° 2

MES	CANASTILLAS DE MOLINO	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA ELÉCTRICO	TIEMPO DE PARADA	REVISIÓN Y/O CAMBIO DE RODAMIENTOS	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE TRANSMISIÓN	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE LUBRICACIÓN	TIEMPO DE PARADA	PINES DE SUJECIÓN DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA	ROTURA DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA
ENE	0		1		0		0		1		1		1	
FEB	2		2		1		1		2		1		2	
MAR	1		1		1		2		2		1		2	
ABR	1		1		1		1		1		1		2	
MAY	0		1		0		2		2		1		1	
JUN	2		1		1		2		2		1		2	
JUL	1		1		1		0		1		1		2	
AGOS	1	5.2	2	12.7	0	28.1	1	7.1	2	6.8	1	3.4	3	12.5
SET	1	5.0	1	6.2	1	27.8	2	13.5	2	6.0	1	3.2	2	8.3
OCT	2	10.3	1	6.1	1	27.4	2	12.8	1	3.2	1	3.6	2	8.1
NOV	1	5.1	1	6.5	1	28.3	2	12.4	1	4.0	1	3.8	2	7.9
DIC	2	11.0	2	13.0	0	27.4	2	13.0	1	3.4	1	3.2	1	4.3
TOTAL	14	26.5	24	44.5	8	139.0	8	58.8	20	23.4	12	16.6	22	41.1

Anexo 9. Fallas el molino N°02 en el año 2019

MES	HORAS OPERADAS	N°FALLAS/MES	N°HORAS/MES (DE FALLAS)
ENERO	652.54	9	72.12
FEBRERO	652.54	9	72.12
MARZO	652.54	10	72.12
ABRIL	652.54	10	72.12
MAYO	652.54	10	72.12
JUNIO	652.54	9	72.12
JULIO	652.54	9	72.12
AGOSTO	668.2	10	75.8
SEPTIEMBRE	650.0	10	70.0
OCTUBRE	672.5	10	71.5
NOVIEMBRE	652.0	9	68.0
DICIEMBRE	620.7	9	75.3
TOTAL	7831.18	114	865.44

Anexo10.Total, de horas del año2019

DÍAS/AÑO	HORAS/DÍAS	HORAS/AÑO
365	24	8760

Anexo11. Días no laborables anualmente

DÍAS NO LABORALES	FECHAS	HORAS/DIA
ENERO	1	24
MAYO	1	24
JULIO	2	48
DICIEMBRE	3	72
TOTAL	7	168

Anexo 12. Parámetros de operación promedio de molino N°2

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
TIEMPO PROGRAMADO	8592.0	HORAS/AÑO
OPERACIÓN	7831.18	HORAS/AÑO
REPARACIÓN	865.44	HORAS/AÑO
NUMERO DE FALLAS	114.0	FALLAS/AÑO

Anexo13. Parámetros de operación promedio de molino N°2

Mensuales horas/mes

PARÁMETRO	MENSUALMENTE/HORAS	DÍAS/HORAS
TIEMPO		
PROGRAMADO	716.00	23.87
OPERACIÓN	652.60	21.75
REPARACIÓN	72.12	2.40

Anexo14. Maquina: MOLINO DESMEDULADOR N° 3 Total, de fallas del año 2019

MES	CANASTILLAS DE MOLINO	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA ELÉCTRICO	TIEMPO DE PARADA	REVISIÓN Y/O CAMBIO DE RODAMIENTOS	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE TRANSMISIÓN	TIEMPO DE PARADA	SISTEMA DE LUBRICACIÓN	TIEMPO DE PARADA	PINES DE SUJECCIÓN DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA	ROTURA DE CUCHILLAS	TIEMPO DE PARADA
ENE.	1	5.4	1	6.1	1	24.0	1	6.0	1	3.2	1	4.0	1	4.5
FEB.	1	5.7	1	7.2	1	27.4	2	13.1	2	6.4	1	3.8	2	6.8
MAR.	2	10.4	1	6.5	1	26.2	1	6.5	2	6.5	1	4.2	2	7.7
ABR.	1	5.4	1	7.0	1	20.5	1	5.9	1	3.1	1	4.6	1	4.0
MAY	1	5.5	2	15.0	1	22.3	1	6.3	1	3.6	1	3.9	1	4.2
JUN.	2	11.0	1	6.8	0	0	2	12.8	1	3.4	0	4.5	2	8.1
JUL.	0	0	2	14.5	1	28.4	1	6.6	2	6.7	1	4.1	1	3.9
AGO	1	5.4	1	6.7	1	21.1	1	6.2	1	3.2	1	4.6	2	8.3
SEPT.	2	10.6	1	6.6	1	19.2	2	12.7	2	5.9	2	8.0	2	8.5
OCT.	1	5.5	1	5.9	1	21.8	1	7.0	1	3.0	1	4.3	1	3.9
NOV.	1	5.4	1	7.1	1	26.3	1	6.4	1	3.6	1	4.4	1	4.3
DIC.	2	10.8	2	13.8	1	27.4	2	13.4	1	3.1	1	4.6	2	7.8
TOTAL	15	81.1	15	103.2	11	264.6	16	102.9	16	51.7	12	55	18	72

Anexo15. Fallas en el molino #03 en el año

MES	HORAS OPERADAS	N fallas/MES	N horas/MES DE FALLAS
ENERO	666.8	7	53.2
FEBRERO	601.6	10	70.4
MARZO	676	10	68
ABRIL	669.5	7	50.5
MAYO	659.2	8	60.8
JUNIO	673.4	8	46.6
JULIO	631.8	8	64.2
AGOSTO	688.5	8	55.5
SEPTIEMBRE	648.5	12	71.5
OCTUBRE	692.6	7	51.4
NOVIEMBRE	662.5	7	57.5
DICIEMBRE	615.1	11	80.9
TOTAL	7885.5	100	730.5

Anexo16.Total, de horas del año 2019

DÍAS/AÑO	HORAS/DÍAS	HORAS/AÑO
365	24	8760

Anexo17. Días No Laborales Anualmente

DÍAS NO LABORALES	FECHAS	HORAS/DIA
ENERO	1	24
MAYO	1	24
JULIO	2	48
DICIEMBRE	3	72
TOTAL	5	168

Anexo18. Parámetros de Operación Promedio del Molino 03

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
TIEMPO PROGRAMADO	8592	HORAS/AÑO
OPERACIÓN	7885.5	HORAS/AÑO
REPARACIÓN	730.5	HORAS/AÑO
NUMERO DE FALLAS	100	FALLAS/AÑO

Anexo19. Parámetros de operación promedio de molino N° 03. Mensuales
horas/mes

PARÁMETRO	MENSUALMENTE/HORAS DÍAS/HORAS	
TIEMPO		
PROGRAMADO	716.00	23.87
OPERACIÓN	657.13	21.90
REPARACIÓN	60.88	2.03

Anexo 20. criterios de evaluaciones análisis de criticidad

Frecuencia de fallas	
Elevado mayor a 40 fallas/año	4
Promedio 20-40 fallas/año	3
Buena 10-20 fallas/año	2
Excelente menos de 10 fallas/año	1

Impacto Operacional	
Parada total del equipo	10
Parada parcial del equipo y repercute a otro equipo o subsistema	7-9
Impacta a niveles de producción o calidad	5-6
Repercute en costos operacionales asociado a disponibilidad	2-4
No genera ningún efecto significativo	1

Flexibilidad Operacional	
No existe opción igual o equipo similar de repuesto	4
El equipo puede seguir funcionando	2-3
Existe otro igual o disponible fuera del sistema (stand by)	1

Costo de mantenimiento	
Mayor o igual a US\$ 400 (incluye repuestos)	2
Inferior a US\$ 400 (incluye repuestos)	1

Impacto a Seguridad Ambiente e Higiene	
Accidente catastrófico	8
Accidente mayor serio	6-7
Accidente menor e incidente menor	4-5
Cuasi accidente o incidente menor	2-3
Desvío	1
No provoca ningún tipo de riesgo	0

Fuente: Amendola, 2012.

En la siguiente FIGURA N°20, “Matriz de Criticidad” se muestra la intersección de la consecuencia y la frecuencia de falla ponderada dando como resultado una falla media crítica para el elemento.

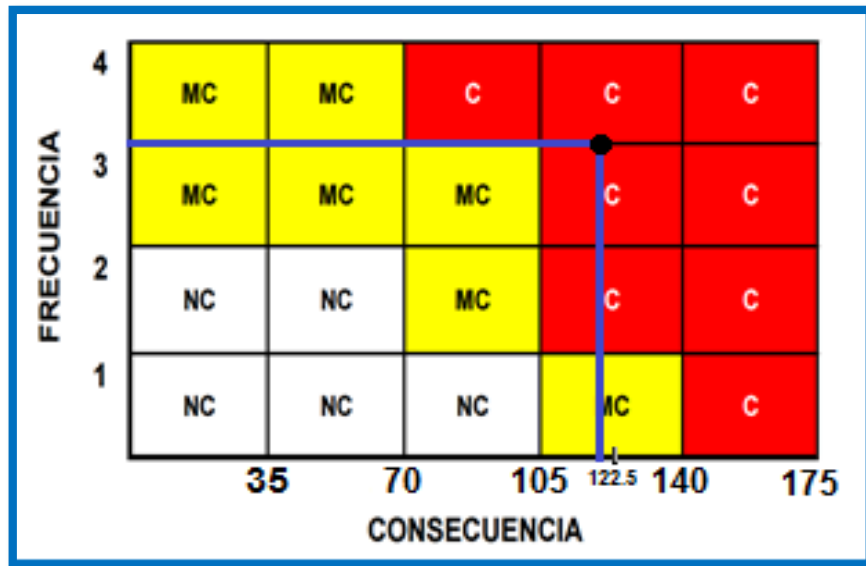


Figura N° 20. Intersección de la falla según la frecuencia y la consecuencia.
Fuente: Carlos Parra & Adolfo Márquez, 2012

Anexo.21. Análisis de criticidad, valores críticos de las fallas según los elementos o componentes de los molinos desmeduladores de bagazo.

N° Fallas	Características de Falla	Elemento en Falla	Frecuencia de Fallas	I.O	F.O	C.M	I. S.y MA	CONSECUENCIA	NIVEL DE CRITICIDAD
								IOxFOxCMxISMA	
F1	Ruptura de canastillas del molino.	Plancha perforada	3	10	3	2	4	240	C
F2	Bajo aislamiento en motores de molino y caja de conexiones	Cables eléctricos	2	10	4	2	4	320	C
F3	Vibración alta en rodamientos del molino	Desbalance de rotor	4	10	3	2	6	360	C
F4	Desalineamiento de poleas/ ruptura de fajas en sistema de transmisión	Chaveta de fijación	3	9	1	2	3	54	MC
F5	Fuga de lubricante en cajas de rodamientos de motor y molino	Retenes de cajas de rodamientos	4	10	1	2	4	80	C
F6	Desgaste/ruptura de pines de sujeción de cuchillas de molinos	Ejes verticales	2	10	1	2	4	80	MC
F7	Desgaste de agujero y/o ruptura de cuchillas de molinos.	Alojamiento de pines.	3	10	1	2	2	40	MC

Nivel de Criticidad	Cantidad
Críticos	4
Medio Crítico	3
No Crítico	0

Anexo 22. Índices de riesgos o número de prioridad de riesgos NPR

Ocurrencia	
Descripción	Puntaje
1 falla en más de 2 años	1
1 falla cada 2 años	2-3
1 falla cada 1 año	4-5
1 falla entre 6 meses y 1 año	6-7
1 falla entre 1 a 6 meses	8-9
1 falla al mes	10

Gravedad	
Descripción	Puntaje
Ínfima, imperceptible	1
Escasa, falla menor	2-3
Baja, fallo inminente	4-5
Media, fallo, pero no para el sistema	6-7
Elevada, falla crítica	8-9
Muy elevada, con problemas de seguridad, no conformidad	10

Detección (dificultad de detección)	
Descripción	Puntaje
Obvia	1
Escasa	2-3
Moderada	4-5
Frecuente	6-7
Elevada	8-9
Muy elevada	10

Fuente: Moubray, 2004.

$I(R) \leq 125$	Falla Aceptable.
$125 < I(R) \leq 200$	Falla reducible a deseable.
$I(R) > 200$	Falla Indeseable.

Fuente: Moubray, 2004.

Anexo 23. Análisis de falla/valor de criticidad.

Nº	FALLA	CLASIFICACIÓN	PLAN DE MTO	VALOR DE CRITICIDAD
1	Ruptura de canastillas del molino	Critica	Preventivo	240
2	Bajo aislamiento en motores de molino y caja de conexiones	Critica	Preventivo	320
3	Vibración alta en rodamientos del molino	Critica	Preventivo	360
4	Desalineamiento de poleas/rotura de fajas en sistema de transmisión	Semi Critica	Preventivo	54
5	Fuga de lubricante en caja de rodamiento del motor y molino	Critica	Preventivo	80
6	Desgaste /Rotura de pines de sujeción de cuchillas de molino	Semi Critica	Preventivo	80
7	Desgaste de agujero y o ruptura de cuchillas de molino	Semi Critica	Preventivo	40

Anexo 24.RCM del Molino N°3

Hoja de información RCM	Máquina: Molino desmedulador N° 3		Ubicación Pta. Pulpa 8	N° 3	Cód.:
Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla		
Separar durante el proceso de desmedulado, la fibra y el polvillo (médula) del bagazo	Ruptura de canastillas del molino.	Debido a la presencia de cuerpos extraños (piedras o maderas), o por desalineamiento y/o vibración del rotor del molino, se producen roturas en las planchas perforadas (canastillas)	La ruptura de canastillas, obliga necesariamente a parar las operaciones del molino agraviado, por lo que inmediatamente se arranca el stand by, pero existen consecuencias de retraso en la producción por baja de flujo de pulpa hacia el siguiente etapa.		
Suministrar energía eléctrica para el funcionamiento del motor del molino.	Bajo aislamiento en motores de molino y caja de conexiones	Por baja temperatura del medio ambiente o por paralizaciones prolongadas, el aislamiento de cables y motor desciende a valores que no permiten el arranque.	Retraso en el arranque inicial de la Planta de Pulpa, por haber estado en paradas programadas y/o reparaciones emergentes. Se ha ido solucionando en parte, colocando resistencias eléctricas en los motores.		
Elementos principales para el correcto funcionamiento del rotor del molino	Vibración alta en rodamientos del molino	Debido a desgaste prematuro de crucetas del rotor, de las cuchillas y pines de molino, se produce desbalance del rotor cuya señal es transmitida hacia los rodamientos.	Esta constituye la falla más representativa en estos equipos, pues el efecto que resulta es la inmovilización total del molino y realizar el balanceo dinámico para no perjudicar los rodamientos de la unidad.		
Trasmisión de potencia desde el motor eléctrico hacia el molino desmedulador.	Desalineamiento de poleas / ruptura de fajas en sistema de transmisión	Por desgaste de chavetas de fijación de las poleas de transmisión de potencia del motor hacia el molino, se produce desalineamiento entre ellas y consecuentemente, desgaste irregular de las correas o fajas que terminan por romperse.	El efecto de esta falla, es también vibración del molino; pero es identificable rápidamente al verificar el "cabeceo" de una de las poleas que alojan a las correas o fajas.		
Trasmisión de potencia desde el motor eléctrico hacia el molino desmedulador.	Fuga de lubricante en cajas de rodamientos de motor y molino	Por falla en los retenes de las chumaceras de los rodamientos, continuamente se producen fugas de lubricante y consecuentemente obliga a la paralización de la unidad.	El efecto inmediato es el recalentamiento del rodamiento y si no se renueva o repara el retén y coloca nuevo lubricante, este rodamiento colapsa y paraliza la unidad.		
Sujeción pivotante en un extremo de las cuchillas, para que realicen el "martillado" del bagazo.	Desgaste/ruptura de pines de sujeción de cuchillas de molinos	A consecuencia de la constante fricción con el "ojo" o agujero de las cuchillas o martillos y la abrasión del bagazo, los pines o ejes pivotantes (4) de los molinos sufren desgaste y luego ruptura en la garganta formada, obligando a parar la unidad.	El efecto inmediato de esta falla es también presencia de vibración excesiva, comprobada en el tablero de control mediante el ascenso de amperaje del motor. Al romper el pin, libera a cuchillas que se rompen u ocasionan daño a las canastillas.		
Golpe y corte en el proceso de separación de fibra y médula del bagazo.	Desgaste de agujero y/o ruptura de cuchillas de molinos.	En forma sismilar que en los pines, el rozamiento continuo y la abrasividad del material (bagazo), las cuchillas o martillos desgastan el agujero donde va el pin y se produce alargamiento y muhas veces ruptura de la cuchilla al rozar con la canastilla.	Al igual que en los pines, al presentarse esta falla, el ojo o agujero de la cuchilla se hace ovalado y representa alargamiento de la misma, lo cual ocasiona rozamiento con la canastilla y rompe la plancha perforada.		

Anexo 25. Metodología del análisis causa raíz (Wigner y Paniagua, 2017)

Definiciones y términos de la metodología de análisis causa raíz (ACR)

1. **Acción:** Con el enfoque de mantenimiento, es el efecto que causa un agente (físico, químico o humano, entre otros) sobre algo, debido a la ejecución de actividades específicas.
2. **Activo:** Término contable para cualquier recurso que tiene un valor, un ciclo de vida y genera un flujo de caja. Puede ser humano, físico y financiero intangible. Por ejemplo: el personal, centros de trabajo, plantas y equipos, entre otros.
3. **Análisis Causa-Efecto:** Es una herramienta utilizada en la Metodología del ACR para ordenar gráficamente el análisis de manera secuencial.
4. **Análisis Costo-Beneficio (AC-B):** Estima el beneficio económico de la realización de un cambio, modificación o reparación mayor.
5. **Causa de Falla (Causa Raíz):** Las causas de las fallas pueden ser físicas, humanas u organizacionales. En general, pueden ser derivadas de procesos de deterioro por razones físicas o químicas, defectos de diseño, malas prácticas operacionales o de mantenimiento
6. **Causas Raíces Físicas:** En los Análisis Causa Raíz, se refiere al mecanismo de falla del componente. Su solución resuelve las situaciones de falla. Ejemplo de causas raíces físicas: material de le empaquetadura inadecuado.
7. **Causas Raíces Humanas:** Por ejemplo, la selección inadecuada de la empaquetadura.
8. **Causa Raíces Latentes:** En los Análisis de Causa Raíz, representan las manifestaciones de los procesos organizacionales que explican la ocurrencia de las causas raíces humanas.
9. **Confiabilidad:** Es la probabilidad de funcionamiento libre de fallas de un equipo o sus componentes, durante un tiempo definido bajo un contexto operacional.
10. **Confiabilidad Operacional:** Es la capacidad de una activo (representado por sus procesos, tecnología y gente) para cumplir sus funciones o el propósito que se espera de este.
11. **Consecuencia:** Resultado de un evento. Puede existir una o más consecuencias de un evento, las cuales sean expresadas cualitativa o cuantitativamente.
12. **Defecto:** Causa inmediata de una falla: desalineación, mal ajuste, fallas ocultas en sistemas de seguridad, entre otros.

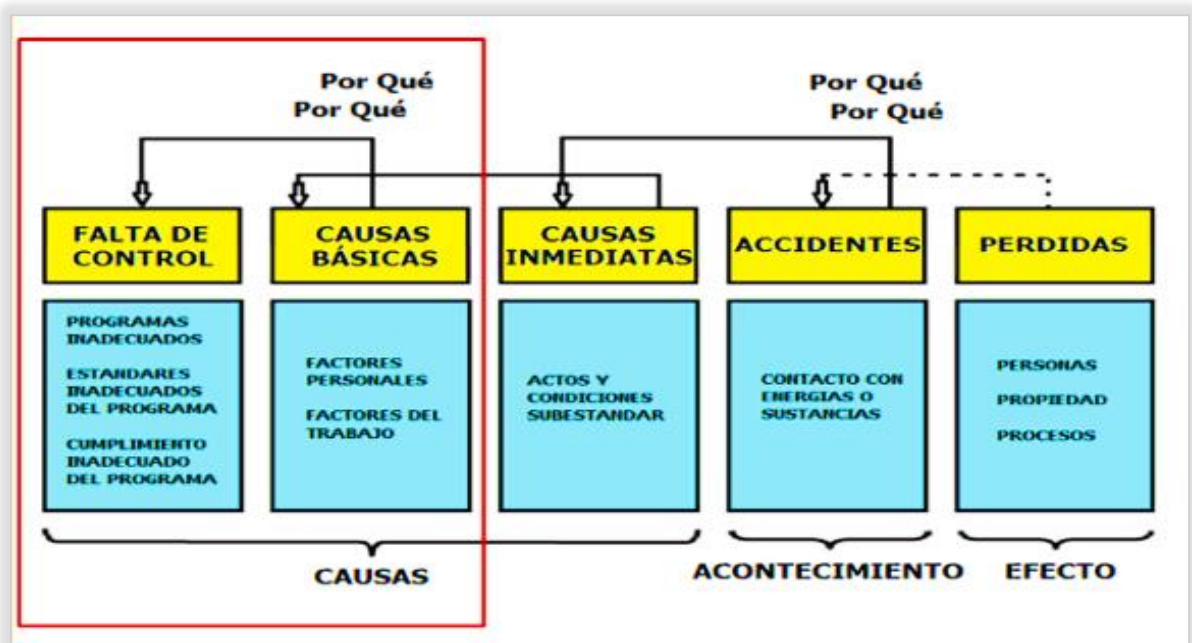
13. Efecto de falla: Describe lo que ocurre cuando acontece cada modo de falla.

14. Falla: Terminación de la habilidad de un ítem para ejecutar una función requerida.

Proceso de análisis de causa raíz

- 1) Recopilación de información.
- 2) Inspección in situ.
- 3) Entrevista con los usuarios y técnicos habituales.
- 4) Determinación de los daños y síntomas de fallos.
- 5) Listado de todas las posibles causas que pudieran provocar cada uno de los daños observados.
- 6) Descarte de las causas imposibles.
- 7) Establecimiento de las hipótesis de trabajo.
- 8) Establecimiento de la secuencia del fallo.
- 9) Establecimiento de la causa raíz a del fallo. Los 5 por qué.
- 10) Determinación de las medidas correctivas.
- 11) Determinación de las medidas preventivas.

Los 5 por qué:



Las 8 causas de los fallos.

- 1) Fallos de diseño.
- 2) Fallos de operación.
- 3) Fallos de montaje.
- 4) Fallos de mantenimiento.
- 5) Fallos de un componente
- 6) Condiciones externas anómalas.
- 7) Fallos en las condiciones de los suministros.
- 8) Fallo como consecuencia de otro fallo.

Anexo 26. Etapas de implementación del ACR

