

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS DE FALLAS DE UNA CHANCADORA
CÓNICA PARA MEJORAR LA RENTABILIDAD EN
UNA PLANTA DE AGREGADOS**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR

Luis Brandon Cancino Espinoza (ORCID: 0000-0001-8322-092X)

ASESOR

Mg. Luis Hurtado Campos (ORCID: 0000-0001-8782-9310)

Lima – Perú

2022

Dedicatoria:

Dedico esta tesis a mi familia y amigos quienes brindaron un gran apoyo incondicional. A Dios por guiarme y cuidarme en esta etapa de mi vida profesional.

Agradecimientos:

Al Ing. Luis Hurtado que a través de su experiencia en Plantas Industriales me asesoró para la realización de la tesis. A la Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC, por ser mi casa de estudio para mi desarrollo profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	15
MARCO TEÓRICO	15
1.1. Críticidad de Equipos.....	16
1.2. Análisis de los modos de falla y sus efectos (FMEA).....	20
1.2.1. Tipos de FMEA	21
1.2.2. Procesos en la elaboración del FMEA.....	22
1.3. Jerarquización de Modos de falla	25
1.3.1. Diagrama de Pareto de costos.....	25
1.3.2. Método Jack Knife	27
1.4. Métodos de determinación de la causas raíces	31
1.4.1. Diagrama Ishikawa.....	31
1.4.2. Árbol lógico.....	33
1.5. Propuesta de soluciones	38
1.6. Indicador Retorno de Inversión (ROI).....	45
CAPÍTULO II.....	47
METODOLOGÍA.....	47
2.1. Análisis del FMEA	50

2.2.	Diagrama de Pareto de costos	52
2.3.	Aplicación del Árbol Lógico	58
2.4.	Solución	64
CAPÍTULO III		67
RESULTADOS		67
3.1.	Análisis del FMEA	71
3.2.	Diagrama de Pareto de costos	74
3.3.	Árbol Lógico.....	79
3.4.	Solución	82
CONCLUSIONES.....		88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		90
ANEXOS		97

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Tabla comparativa de las técnicas del RCA.....	37
Tabla 2.1. Tabla de base de datos.....	49
Tabla 2.2. Muestra del registro de datos de fallas correctivas.....	49
Tabla 2.3. Formato para el desarrollo del FMEA.....	51
Tabla 2.4. Formato para el diagrama de Pareto de costos.....	56
Tabla 2.5. Cuadro para priorizar modos de fallas.....	57
Tabla 3.1. Partes del sistema de chancado.....	68
Tabla 3.2. Partes del sistema de transmisión.....	69
Tabla 3.3 Partes del sistema de soporte.....	69
Tabla 3.4. Partes del sistema de lubricación.....	70
Tabla 3.5. Partes del sistema de enfriamiento.....	71
Tabla 3.6. FMEA de la Chancadora cónica.....	73
Tabla 3.7. Cuadro de frecuencias por año.....	74
Tabla 3.8. Cuadro del tiempo total de reparación por año.....	75
Tabla 3.9. Cuadro del Pareto de costos.....	77
Tabla 3.10. Modos de fallas críticos.....	78
Tabla 3.11. Costo falla anual del cojinete semiesférico.....	82
Tabla 3.12. Inversión para la solución de alternativa 1.....	83
Tabla 3.13. Costo de la solución de la solución de la alternativa 1.....	84
Tabla 3.14. Inversión para la solución de alternativa 2.....	85

Tabla 3.15. Costo de la solución de la solución de la alternativa 2.....	86
Tabla 3.16. Resumen del ROI.	87
Tabla a.1. Cuadro de ponderación de los equipos.	99
Tabla a.2. Puntaje de criticidad por equipo.	100
Tabla a.3. Historial de fallas correctivas.	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Partes del análisis de criticidad.	17
Figura 1.2. Factores importantes para el impacto en el equipo.	18
Figura 1.3. Matriz de criticidad.	19
Figura 1.4. Zonas de criticidad.	19
Figura 1.5. Fallas crónicas vs. Fallas esporádicas.	20
Figura 1.6. Flujograma del FMEA	22
Figura 1.7. Diagrama de Pareto.	27
Figura 1.8. Diagrama de Jack Knife de Disponibilidad.	28
Figura 1.9. Diagrama de Jack Knife de costo global.	30
Figura 1.10. Diagrama Ishikawa.	32
Figura 1.11. Estructura del Árbol lógico.	33
Figura 2.1. Procedimiento de Metodología.	47
Figura 2.2. Sistemas de la Chancadora Cónica.	50
Figura 2.3. Diagrama de Pareto de costos.	58
Figura 2.4. Fases del análisis causa raíz.	58
Figura 2.5. Caja principal del Árbol Lógico.	61
Figura 2.6. Hipótesis del modo de falla.	62
Figura 2.7. Causas raíces del modo de falla.	63
Figura 2.8. Alternativas de la Solución de la causa raíz latente.	65
Figura 2.9. Solución rentable envase a ROI.	66

Figura 3.1. Gráfico de Pareto de los modos de fallas en la chancadora.	78
Figura 3.2. Caja principal para la chancadora cónica.	79
Figura 3.3. Hipótesis del modo de falla.	80
Figura 3.4. Hipótesis validada.	80
Figura 3.5. Causa raíz física, humana y latente.	81
Figura a.1. Diagrama de flujo de la Planta de Agregados.	98
Figura a.2. Resultado de la matriz de criticidad.	100

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Circuito de la Planta de Agregados	98
Anexo 2: Cuadro de Ponderación en los equipos de la planta	99
Anexo 3: Criticidad de los equipos de la Planta de Agregados.....	100
Anexo 4: Historial de Fallas.....	101

RESUMEN

La presente investigación se realizó en una planta de agregados de la cantera del Río Chillón, ubicado en el distrito de Carabaylo, para resolver la problemática actual concerniente a las paradas de las máquinas, los cuales ocasionan inactividad en la producción de la planta de agregados.

Como parte inicial en la investigación del análisis de fallas, se procedió en la recolección de datos de producción de piedras trituradas y las fallas en los equipos. Además, se tuvo entrevistas a los propietarios y técnicos mecánicos de la industria de agregados, así como la consulta en diversas fuentes de información. Luego, para definir el equipo en estudio, se procedió a realizar un análisis de criticidad en los equipos, el cual permitió encontrar que la chancadora cónica, era el equipo crítico en la planta de agregados.

La metodología de investigación a realizar para la solución de este problema, consistió en la identificación de los modos de fallas que ocasionan que la chancadora cónica se detenga, utilizando la herramienta FMEA. Luego, se jerarquizó los modos de fallas con el diagrama de Pareto en base a costos. Después, se determinó las causas raíces físicas, humanas y latentes del modo de falla crítico, en este caso el cojinete semiesférico, a través del Árbol Lógico. Para concluir, se propuso una solución, después se realizó un análisis de costo-beneficio a dos alternativas de la solución propuesta para obtener la solución rentable. Por el cual, la segunda alternativa es la que logra una mejora en la rentabilidad de la planta de agregados, ya que se obtuvo un ROI de 151%, el cual indica que la inversión en la solución se recupera en ocho meses.

PALABRAS CLAVES:

Análisis de Fallas; Chancadora Cónica; Falla del Equipo

ABSTRACT

FAULT ANALYSIS OF A CONE CRUSHER IN ORDER TO IMPROVE THE RENTABILITY IN AN AGGREGATES PLANT

The present investigation was carried in an aggregates plant in the quarry from Chillón river, Carabayllo district, to solve the current issue due to the equipment stops, whom are causing the downtime in production from an aggregates plant.

At the initial part of the research of fault analysis, this was proceeded with the data collection of the production of crushed stone and equipment breakdowns. In addition, interviews with owners and mechanical technicians of aggregates industry as well as the consultation on several sources of information. Afterward, to define study machinery, this was proceeded carry out the equipment criticality analysis, which allowed to find that the cone crusher, this was the critical machinery of an aggregates plant.

Research methodology to carry out solution this problem, it was consisted in failure modes identification, whom causes Cone Crusher stop, using FMEA. Then, failure modes are ranked with the Pareto Chart from costs. After, it was determined physical, human and latent root causes of critical failure mode, in this case the Socket line through the Logic Tree. In conclusion, a solution was proposed, then a cost-benefit analysis was carried out on two alternatives of the proposed solution to obtain the profitable solution. There, the second alternative achieved an improvement in the profitability of the aggregates plant because ROI was of 151%, which indicates that the investment in the solution is recover in eight months.

KEYWORDS:

Fault Analysis; Cone Crusher; Equipment Fault

INTRODUCCIÓN

A inicios de 1980 el mantenimiento industrial ha mostrado un crecimiento importante en los nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento, por los cuales han desarrollado técnicas que predicen cuando va a fallar el equipo, para esto una de las técnicas es el mantenimiento predictivo, el cual permite diagnosticar y analizar a la máquina cuando este en modo operativo. Sin embargo, utilizar estas técnicas predictivas no asegura que las fallas vuelvan a aparecer. Por ello, más adelante surge el mantenimiento proactivo, el cual abarca los mantenimientos tipo preventivo, predictivo y mejora continua [1]. Esto garantiza una reducción en los costos del mantenimiento correctivo de forma que se incrementa la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de la máquina [2].

Hoy en día las empresas de agregados han trascendido, de manera que sus productos se han vuelto indispensables en la participación de los materiales de construcción. Por esta razón, tener a los equipos en óptimas condiciones da una mayor confiabilidad para la producción de agregados. Por tal motivo, esto repercute en el cumplimiento que tiene la empresa a sus clientes, con regirse a las especificaciones normalizadas basado en el ASTM C-33.

En la construcción de edificios se requiere de materiales para formar el concreto armado, el cual está conformado por las varillas de acero, cemento, agua y los agregados¹, siendo la piedra triturada la que representa el 75% de la composición del concreto, porque permite tener un mejor soporte y resistencia a los edificios. Inclusive, la Norma ACI 318-19 (American Concrete Institute) hace referencia a que la granulometría adecuada para la piedra triturada debe permitir obtener la máxima densidad del concreto, un aproximado de 2300 Kg/m³ [3], con una trabajabilidad en función de la cantidad de mezcla. Por tanto, esto evita la formación de vacíos y mejora la calidad del concreto [4].

¹ Agregados: Son aquellos minerales no metálicos que pueden ser de piedra triturada y arena, los cuales son usados para hacer el concreto.

Para conseguir la dimensión adecuada de la piedra triturada, cuyo tamaño rigen entre 1'' a ½'' [5], es clave la sección de chancado, de manera que se cuenta con dos etapas por las cuales pasan las rocas, la chancadora de mandíbulas, la cual hace la primera reducción del tamaño de la roca, para así poder pasar a la chancadora cónica, la que finalmente reduce el tamaño de las piedras, pero es importante mencionar que la chancadora cónica presenta baja confiabilidad en la empresa, lo que conlleva a que la planta deje de producir piedras trituradas.

En el presente trabajo se realiza un análisis de fallas de la chancadora cónica, la cual apunta a disminuir la falla del componente crítico que representan costos elevados en la chancadora. Para ello se emplea herramientas de mantenimiento como el FMEA² para encontrar las maneras en que puedan ocasionar la falla en el equipo, después se aplica el Análisis de Pareto, la cual sirve para jerarquizar los modos de fallas. Luego, se utiliza el Árbol Lógico para detectar la causa raíz física, humana y latente del modo de falla crítico. Por último, se propone alternativas de solución óptimas para eliminar la falla crítica de la chancadora cónica, y con esto mejorar la rentabilidad en la planta de agregados, por ende se aplica el indicador ROI³, para encontrar la solución viable, el cual muestre un mayor beneficio respecto a otra alternativa de solución.

Alcance

La planta de agregados en estudio, se ubica en el distrito de Carabayllo, el cual tiene diferentes máquinas, una de estas son las chancadoras que se encargan de triturar las piedras. El primer tipo de chancadora es de quijada, este se alimenta de rocas de 16'' y las reduce hasta 3'', permitiendo que la chancadora cónica entre piedras de 3'' y las triture a un tamaño de ½''. De acuerdo a lo mencionado en esta sección, el ANEXO 1 explica la distribución de los equipos en la planta de agregados. Previamente, la empresa para que defina el tamaño

² FMEA: Es el Análisis de los modos de fallas y sus efectos, que permite identificar las maneras en la que pueda darse la falla en el equipo.

³ ROI: Es el Retorno de Inversión, el cual este indicador financiero permite predecir la solución que pueda traer beneficios a la empresa.

adecuado de las piedras, estos son llevadas a un laboratorio, donde se utilizan dos tamices diferentes para determinar las dimensiones de las piedras. De tal modo que, las piedras trituradas son retenidas en el tamiz⁴ 3/8”. En segundo lugar, la arena chancada pasa por el tamiz N°100 y queda retenida en el tamiz N°200.

Este trabajo de investigación se enfoca en realizar un análisis de fallas a la chancadora cónica, el cual comprende de unas dimensiones de: Largo: 3.05 m, Ancho: 1.64 m, Alto: 2.35 m [6]; para erradicar las fallas críticas, y con esto mejorar la rentabilidad en la planta de agregados.

El análisis de fallas consiste en determinar las causas raíces que generan improductividad en los equipos, los cuales para el caso de estudio son dirigidos al equipo crítico de la planta, por el cual en los ANEXOS 2 y 3 explican la ponderación y la matriz de criticidad en los equipos de la planta de agregados, los cuales identifica el equipo crítico. Por esto, las herramientas de mantenimiento servirán para encontrar los problemas que ocasionan daño al equipo. Primero, se utiliza el FMEA, que permite identificar los modos de fallas de la chancadora cónica. Luego, el Análisis de Pareto, el cual permite jerarquizar los modos de falla que presentan un estado crítico en base a costos. A continuación, se aplica el Árbol Lógico, el cual facilita encontrar las causas raíces física, humana y latente proveniente del modo de falla crítico. Por último, se propone dos alternativas de solución de acuerdo a los requerimientos que necesite mejorar dicho equipo, los cuales estas se van a comparar utilizando el indicador ROI, para luego encontrar la alternativa de solución que brinde beneficios a la empresa. Por esta razón, los datos requeridos para realizar el análisis de fallas en la chancadora cónica, se trabajarán desde el 2015 hasta el 2019.

Antecedentes

En esta parte se procede a considerar la bibliografía de investigaciones relevantes o relacionado al tema y problema en estudio. En ese sentido, se presentan distintos trabajos,

⁴ Tamiz: Es una malla que se utiliza para separar el tamaño de las piedras trituradas. Estos son analizados en un laboratorio.

por lo cual se demuestra el éxito de la aplicación del análisis de fallas u otros temas asociados con la mejora del equipo.

Eda [7], en su tesis titulada “Análisis de Fallas de una máquina Extrusora de Electrodo”, se enfoca en identificar las causas que ocasionan las paradas dentro del proceso de prensado para la empresa Soldexa S.A., por lo cual la máquina extrusora forma parte de ello y con esto tomar las acciones necesarias para eliminar esas fallas.

Según el desarrollo de la investigación el autor, primero se enfoca en el tiempo de reparación y el número de paradas no programadas que afectan al equipo correspondiente a cada sección de la producción, material, calidad y mantenimiento. Por tanto, con la data de fallas recopiladas en los meses de setiembre y octubre, se pudo elaborar diagramas de Pareto, los cuales muestran que las secciones afectadas por la indisponibilidad de la máquina corresponden a las secciones de producción, material y calidad, ya que entre ellas representan más del 80% del tiempo total de paradas del mes de octubre a comparación del mes pasado. Además, la disponibilidad entre esos meses disminuyó un 5.17%.

Gracias al diagrama de Pareto, se logra priorizar las fallas crónicas dentro de la sección de producción como en el caso del tiempo de demora para el cambio de línea de producción y falla del operario; para la sección de material se ve afectado por la falta de consumibles, fallas por los consumibles y fallas semi elaboradas; en la calidad se da la falla por excentricidad. Por otro lado, para determinar las causas raíces se utilizó la herramienta diagrama Ishikawa, dando así poder proponer e implementar soluciones.

Los resultados de esta investigación lograron incrementar la disponibilidad de 70.52% a 81.52% para el mes de diciembre, puesto que las horas de parada en producción, material y calidad disminuyeron. Por otro lado, hubiera sido favorable que se aplique el árbol lógico en vez del diagrama Ishikawa, puesto que esta herramienta permite de manera estructurada y ordenada, evaluar diferentes causas desde el punto de vista hacia la máquina, humano y administrativo. Además, para poder determinar las causas raíces, estas tienen que ser validadas por las suposiciones hechas por el departamento de mantenimiento. Por tanto, para la aplicación del trabajo de investigación, se hará un enfoque en la parte crítica que

necesite atenderse, y para esto el análisis de fallas ayudará a tener un mejor alcance de lo que se necesite para mejorar la chancadora cónica.

Algorta [8], en su tesis titulada “Análisis de Fallas de una pieza en una empresa automotriz”, explica que las fallas que se dan en el rubro automotriz, no solo intervienen las que están dentro del proceso de fabricación, sino que también se encuentran reflejados en las incomodidades de los usuarios a través de las encuestas de satisfacción al cliente.

Según el trabajo expuesto, para que se pueda identificar e investigar una falla, aplican prueba y error, esto quiere decir que al indagar un suceso en la falla ya sea para el sistema, equipo o pieza; no estudian a fondo el problema, ya que no tienen un procedimiento para investigar las causas raíces del suceso, por ende, esto hace que la gestión del mantenimiento no cumpla con el rol de implantar mejoras a los equipos de una manera efectiva, por el cual conlleva a que las soluciones brindadas por dicho departamento demore en dar respuestas a las soluciones después de dos años, y eso trae una mala imagen a la empresa para sus clientes incondicionales. No obstante, la empresa da a conocer que maneja varios indicadores que pertenecen a la voz del proceso y otro dirigido a la voz del cliente. Por esta razón, el tiempo de respuesta que da a conocer y analizar la falla dura hasta siete meses, y esto con lleva a que los costos de garantía y producción aumenten por los reclamos del cliente.

El autor al analizar estos inconvenientes logra crear el indicador IPF⁵, para el caso de identificar los inconvenientes presentados por los clientes, los cuales fueron los burletes de las puertas. Por último, el autor aplica el análisis de fallas para determinar las causas raíces y dar solución al problema, el cual detectaron que la mala posición del burlete en los automóviles se originaba por el dispositivo Roll-Forming, y al cambiar el rodillo se tuvo una mejora en la etapa de montaje. Gracias al indicador y el uso del análisis de fallas se consiguió reducir el tiempo de resolución de fallas a cuatro meses, y esto hace que los costos de garantía y los costos de fallas en la producción disminuyeran un 40%.

Con respecto a la identificación de las fallas sería recomendable tener una data histórica, ya que el indicador IPF solo monitorea datos actuales y se podría pasar de alto

⁵ IPF: Es el índice de priorización de fallas, el cual este KPI sirve para identificar las fallas en base al reclamo de los clientes.

algunos inconvenientes o problemas que perjudicarían en el proceso o fabricación de piezas. Para la aplicación del trabajo, el análisis de fallas que abarca el diagrama de Pareto y la herramienta del FMEA, van a ser utilidad para el desarrollo de la investigación de la chancadora cónica.

Aguiar y Rodríguez [9], en su tesis titulada “Análisis de modos y efectos de Falla para mejorar la disponibilidad operacional en la línea de producción de gaseosas N°3”, expone que en la empresa Gaseosas Colombianas Sur presenta problemas en la línea de producción N°3, el cual muestra una baja eficiencia mecánica que varía entre 78% a 84%, y esto ocasiona irregularidades en las líneas de producción.

La investigación hace mención que para incrementar la eficiencia mecánica, hay que identificar los equipos críticos que afecta a la línea N°3, para esto se utiliza el diagrama de Pareto, el cual muestra que los equipos críticos está el inspector de envase y la llenadora de botellas, los cuales representan más del 50% del tiempo fallas en la producción. Después, se establece las fronteras para cada equipo y con esto buscan identificar las variables de entradas y salidas, según el funcionamiento de cada equipo, etc. Además, hacen la codificación y especificación de las máquinas, con el propósito de mejorar el plan de mantenimiento de la planta. A parte de ello, realizan una codificación de los modos y efectos de falla, puesto que les permite identificar si afectan directamente a la disponibilidad y confiabilidad. También, usan la distribución de Weibull a una confiabilidad del 75%, el cual con esto se logra ver que tan confiable es operar sin presentar fallas crónicas y/o esporádicas en el tiempo de operación.

Con el desarrollo de la investigación, ellos aplican el diagrama de Pareto para los modos de fallas de los equipos críticos antes mencionados. Asimismo, utilizan el análisis de RPN⁶, el cual muestra que modos de fallas se deben priorizar respecto a cada equipo. Gracias a estas herramientas, se mejoró el plan de mantenimiento y se logró un incremento de la eficiencia mecánica en un 3%, el cual este KPI indica el rendimiento que tiene los equipos para la utilización de la producción. Según las técnicas expuestas, no sería útil realizar la codificación de los modos de fallas si es que se cuenta con poca cantidad de componentes.

⁶ RPN: Es el número de riesgo prioritario. Está siendo una técnica cualitativa, indica los modos de fallas críticos.

Por otro lado, estas técnicas del análisis de fallas como el diagrama de Pareto y el FMEA van a servir para analizar los problemas que causan daño a la chancadora cónica.

Vera [10], en su tesis titulada “Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz (RCA), para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM – ECOPEPETROL S.A.”, presenta que los equipos críticos en la empresa ECOPEPETROL S.A., es la flota de compresores de gas natural (33 compresores) que están en la etapa UPSTREAM⁷, los cuales presentan una pérdida anual de 183,204,800 USD en costos de mantenimiento correctivo.

Según el autor para encontrar las fallas que ocasionan paradas en la flota de compresores, se dividió en niveles desde el sistema, equipo, elementos que componen la compresora. También, utilizó el diagrama de Pareto, el cual encontró que el ventilador representaba el 19.11% de problemas correspondientes a 7389.5 horas en mantenimiento correctivo. Además, aplica el árbol lógico, el cual encuentra que unas de las causas latentes era que no se contaba con procedimiento de montaje y desmontaje, después propone soluciones a dichas causas raíces. Gracias a la herramienta del árbol lógico se encontró las causas y se pudo verificar los problemas concernientes con esas fallas. Para el uso de esta herramienta en la investigación, será fundamental para encontrar las causas de manera precisa y determinar las soluciones a la chancadora cónica.

Vilcapoma [11], en su tesis titulada “Análisis de Fallas mecánicas en el brazo B26XLB del Jumbo Emperador J0129YA en la Compañía Minera Volcán S.A.A. unidad Andaychagua”, analiza las fallas de los componentes que conforma el Jumbo Emperador, el cual este al ser un equipo indispensable en la minería subterránea, es necesario conocer las causas originadas a estos problemas constantes, ya que presenta una disponibilidad de 80.42% de la flota de jumbos.

El autor realiza un desmontaje de los componentes, después utiliza el diagrama de Pareto para visualizar y clasificar cuales son los componentes importantes y triviales. Con el diagrama de Pareto se detecta que el brazo B26XL presenta siete paradas por semana al equipo. Luego, continua con el desmontaje del brazo B26XL y aplica el diagrama de Pareto

⁷ UPSTREAM: Primera fase en la extracción del petróleo y gas natural, el cual abarca la exploración y explotación de esos recursos naturales.

para priorizar los subcomponentes críticos. Después, analiza las fallas en los subcomponentes críticos como en los cilindros (basculado, rotación de 360°, divergencia, extensión, levanta brazo) y el tubo telescópico, realizando evaluaciones de prueba e inspecciones sensoriales. También, utilizan las herramientas de medición (vernier, micrómetros, entre otros), los cuales se apoyan de los datos históricos de fallas que contienen los reportes técnicos. Con esto se pudo encontrar anomalías como el desgaste en varias piezas, la presencia de fugas de aceite de los sellos y conectores. Gracias a este análisis, se logra encontrar las fallas, los cual eran la falta de lubricación y el control de medición de desgaste de las piezas. Finalmente, se implementa estas técnicas, y con esto logra un incremento de disponibilidad a 89.2%.

Según esta investigación, el autor aplica el diagrama de Pareto para encontrar las fallas, y analiza esas fallas críticas con la data histórica, pero sería mejor que se haga una investigación profunda utilizando la técnica del FMEA y el árbol lógico, ya que permiten encontrar las causas raíces. Para la investigación de la chancadora cónica, el diagrama de Pareto es la segunda etapa para priorizar los modos de fallas, además la data histórica va a ser útil antes y después de la aplicación del diagrama de Pareto.

Pariona [12], en su tesis titulada “Análisis de las fallas de los equipos críticos de flotación, para reducir las pérdidas de producción en la unidad Minera de Yauliyacu”, explica que las paradas que presenta los equipos en el proceso de flotación, son provenientes de la mala gestión de mantenimiento.

El autor utiliza el análisis de criticidad por el método de puntos, el cual encontró que los equipos críticos son las dos celdas Bulk, dos bombas de 10’’x 8’’ y el molino de bolas de 7’’x10’’. Luego, se realiza el FMEA para los equipos y componentes. Después, con los indicadores de MTBF (Tiempo promedio entre fallas), el MTTR (Tiempo promedio de reparación) y con la evaluación del ciclo de vida de los equipos, encontraron que las máquinas estaban en la etapa de envejecimiento, obteniendo como resultado una confiabilidad de 3.36% en la línea de producción. Gracias al uso de estas herramientas se mejoró el plan de mantenimiento preventivo encontrando el ciclo óptimo para la intervención de los equipos. Además, se logró un ahorro en los costos anuales en mantenimiento de un total de 76,703 USD.

El autor al encontrar la situación de la línea de producción en estado crítico aplicó la herramienta de análisis de criticidad y el FMEA para encontrar los modos de fallas de los equipos y con esto evaluar con las herramientas de RCM (Mantenimiento centrado en la confiabilidad) un nuevo plan de mantenimiento. En la presente investigación, el uso del análisis de criticidad por ponderación es la que va a permitir encontrar y verificar el equipo crítico en la planta de agregados, además de utilizar la herramienta del FMEA para encontrar los modos de fallas de ese equipo.

Huancaya [13], en su tesis titulada “Mejora de la disponibilidad mecánica y confiabilidad operacional de una flota Cosechadoras de Caña de Azúcar de 40 TPH⁸ de capacidad”, presenta una disponibilidad de 80% en uno de sus equipos de la flota de cosechadoras de caña de azúcar, los cuales estos equipos cumplen un rol importante en el sector agropecuario, ya que se encargan de producir etanol.

Según el autor, para abarcar el problema del equipo, se realiza el análisis de criticidad por métodos de puntos, ya que se obtiene que la cosechadora de oruga N°12 es la crítica de la flota. Después, se aplica el FMEA, el cual obtiene 178 modos de fallas. Además, utilizando el RPN, se observa que los modos de fallas críticos son el paquete de enfriamiento y el motor rodillo tumbador flotante. Por otro lado, se usó la distribución de Weibull para analizar el ciclo de vida del motor, el cual se obtuvo una confiabilidad de 45%. Así mismo, se encontró que el equipo está en la etapa de mortalidad infantil, el cual las fallas podrían estar involucradas por diseño, instalación, etc. Luego, se analizó el indicador de la disponibilidad mecánica en los últimos diecisiete meses, y se obtuvo una caída de hasta 16.49% de ese KPI. Además, se ve que OEE (Efectividad global del equipo) resultó 45.2% respecto a los anteriores meses.

Por lo tanto, Huancaya propone una serie de recomendaciones para que el equipo mejore su productividad a largo plazo, como en el caso de un análisis fractográfico, análisis de aceite, otros parámetros como el control del % de desgaste, la temperatura del aceite y por

⁸ TPH: Es la unidad que representa la producción por hora, el cual se refiere a la tonelada métrica por hora.

último realizar un mantenimiento autónomo al equipo. Por lo cual, con todo esto se espera un incremento de disponibilidad desde 48.99% a 49.06% para la flota de cosechadoras.

Según lo expuesto en la investigación, la criticidad y el FMEA fueron herramientas esenciales para que se empiecen a realizar una investigación en los modos de fallas, para el cual haciendo un buen análisis de fallas va a servir como base para aplicar el árbol lógico de fallas y encontrar las causas raíces, y con esto proponer soluciones optimas a la chancadora cónica.

Justificación y motivación

En el PBI, el sector de la construcción aporta el 5.6% en la economía del Perú, dado que, en el mes de octubre del año 2019, se registró un incremento del 1.8% del consumo interno del cemento. Puesto que, el cemento al ser un material indispensable, va de la mano con los agregados, ya que este representa el 75% de la composición del cemento, lo cual en las canteras de Lima del distrito de Carabayllo producen un promedio de 200 m³/día de piedras trituradas [14]. En la industria de agregados, el propósito de cumplir con los objetivos, es de vital importancia, ya que esto asegura rentabilidad, posicionamiento, confianza, dado que la Piedra H67⁹ como producto principal, sirve para la construcción de edificios, colegios, entre otros. Este producto pasa por diferentes fases, desde la obtención de los ríos, el transporte, almacenamiento y trituración a través de dos chancadoras, la chancadora de quijada y la chancadora cónica, estando estas en la línea de producción en el orden mencionado, por lo que se requiere que el último equipo que define el tamaño de las piedras esté operativo y en buena condición.

Por esto, a través de la data histórica y la técnica de análisis de criticidad, se concluye que es la segunda etapa de chancado donde se encuentran mayores problemas en producción de piedras trituradas, siendo este la chancadora cónica. En consecuencia, en el 2017 se registró una disponibilidad de 58.87%, el cual la intervención del mantenimiento correctivo generó un elevado costo en mantenimiento, a su vez perjudica que la planta este inoperativa,

⁹ Piedra H67: Es una piedra grava que es obtenido del proceso de chancado. Esta piedra tiene un tamaño de 1/2”.

registrando un costo de 320,659.78 USD anuales en pérdida de producción, puesto que no solo implica un gasto en la compañía, sino un desembolso adicional. Puesto que, para cumplir con los pedidos del cliente, la compañía recurre a la compra de piedras ya trituradas de otras canteras generando esto muchas.

Además, en [15] hace mención que aplicar solo el mantenimiento correctivo implica que a largo plazo se acorte la vida del equipo. También, es importante mencionar que el cambio repetitivo de las partes críticas hace que el costo de mantenimiento sea alto.

Es importante mencionar que la chancadora cónica toma un papel importante en el proceso de conminución, esto quiere decir, es de relevancia para otros sectores como la industria minera, puesto que el proceso de conminución implica la reducción del tamaño del mineral, con el objetivo de separar la ganga¹⁰ de la mena¹¹, es decir, dependiendo del tamaño de partículas como en la sección de chancado que se encarga de triturar partículas mayores a 2'' y en la otra etapa llamada molienda que afina las partículas menores de 1/2'' y 3/8 '' [16].

Por todos los motivos expuestos, es de vital importancia determinar el análisis de fallas de los componentes críticos de la chancadora cónica, ya que esto permite a partir de las causas, proponer soluciones que beneficiará a mejorar la rentabilidad en la planta, enfocándose en atacar las fallas críticas que represente un alto costo.

Objetivo general

Analizar las fallas en una chancadora cónica marca Truemax modelo pyb-900 para determinar las causas raíces, y mejorar la rentabilidad en una planta agregados del sector de construcción.

Objetivos específicos

- Identificar los modos de fallas de la chancadora cónica, realizando un Análisis de los modos de falla y sus efectos (FMEA).

¹⁰ Ganga: Material inerte que carece de valor, puesto que disminuye la ley del metal.

¹¹ Mena: Mineral valioso que por medio de procesos de conminución y etapas posteriores genera un valor agregado a la industria minera para su correspondiente comercialización.

- Jerarquizar los modos de fallas, utilizando el diagrama de Pareto de Costos.
- Determinar las causas raíces de un modo de fallas crítico, elaborando un árbol lógico como técnica del análisis de causa raíz (RCA).
- Realizar el análisis económico de la propuesta de solución.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

El análisis de fallas ha brindado mejoras en los diferentes sectores como en la aeroespacial, el cual la NASA aplicó la metodología llamada FMEA en los años 60 para el programa Apolo, con el cual se buscó eliminar las fallas críticas de los equipos y ver la seguridad de la tripulación [17]. También, hoy en día en otras industrias como el sector automotriz, hidrocarburos, tanto en Perú para el caso de la minería, agropecuario y manufactura, le han dado uso de estas herramientas como el FMEA, el cual forma parte del RCM (Mantenimiento Centrado de la Confiabilidad), para encontrar los modos de fallas que provocan altos costos, de modo que puedan dar soluciones, y mejoren la rentabilidad de las empresas.

Las herramientas de análisis de fallas como la técnica de criticidad, el análisis de los modos de fallas y el análisis de causa raíz, han mejorado a lo largo de los años desde que se necesitó realizar investigaciones sobre las máquinas que ocasionaban muertes a las personas, como se dio en el caso de Gran Bretaña, que sucedió una catástrofe en 1866, ya que al año generaba 50 explosiones en las calderas [18]. Es por ello, que el estudio de los casos de fallas permite analizar la complejidad de nuevos casos, y con esto se ha logrado mejores técnicas de fabricación, diseño y la mejora en los materiales para disminuir los riesgos en las máquinas.

Según una investigación reciente para el sector de energías renovables como en el caso de la energía eólica afirma que el FMEA es una de las técnicas más relevantes para crear transparencia en los escenarios de fallas de los activos físicos [19]. En el presente capítulo, describe los conceptos teóricos que servirán en la investigación. Estas técnicas de mantenimiento consisten en conceptualizar previamente la criticidad de los equipos, seguido el desarrollo del FMEA, encontrar los modos de falla crítico, determinar la causas raíces y por último la propuesta de soluciones que generen un beneficio a través del indicador ROI.

1.1. Criticidad de Equipos

La técnica de análisis de criticidad es una herramienta que permite jerarquizar los sistemas, equipos o componentes (ISED's) desde el más importante al menos relevante, con el fin de tomar decisiones y centrarse en mejorar la rentabilidad del negocio [20]. Esta criticidad se calcula con la ecuación 1.1.

$$C = F_f \cdot I_f \quad (1.1)$$

Donde:

C = Criticidad

F_f = Frecuencia de fallas

I_f = Impacto ocasionado por la falla

Según la ecuación explica que, para establecer la criticidad en los equipos, estos son evaluados según la frecuencia de fallas que se registran al año. Estos eventos repetitivos se pueden dar por diferentes motivos, como por ejemplo el desconocimiento del equipo por parte de los técnicos, entre otros. Por otro lado, el impacto ocasionado por las fallas, hace mención a que se tiene en cuenta el costo total de reparación, el impacto que puede generar en la producción al estar detenido la planta. También, el impacto ambiental y de seguridad, los cuales indican que tan perjudicial pueden ser para la salud del operario, y los daños que puedan ocasionar al medio ambiente [20]. Dentro del análisis de criticidad, la ecuación de criticidad anteriormente explicada, es proporcional a la ecuación de riesgo:

$$R = P_f \cdot C_f \quad (1.2)$$

Donde:

R =Riesgo

P_f = Probabilidad de fallas

C_f = Consecuencia de fallas

Para la ecuación de riesgo, menciona que a través del tiempo, una falla no esperada puede hacerse realidad con la consecuencia de que pueda ocurrir. Además, el riesgo es de naturaleza probabilística [20]. Por tanto, estas magnitudes ya sea Frecuencia y/o probabilidad y el impacto o consecuencia que corresponde a cada ISED, se registran en una matriz diseñada a base de códigos de colores, estos expresándolos en “No Crítico (Verde)”, “Semi-Crítico (Amarillo)”, “Crítico (Naranja)” y “Muy Crítico (Rojo)”. Por consiguiente, en la figura 1.1 se muestra los pasos para realizar una priorización de equipos.



Figura 1.1. Partes del análisis de criticidad.

Fuente: R. Huerta. El Análisis de Criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional [21].

Por ello, para establecer los criterios en la criticidad, se toma en cuenta la seguridad, ambiente, producción, costos (operacionales y mantenimiento), el tiempo que demora en reparar y la frecuencia de fallas. En segundo lugar, para la selección del método depende del grado de madurez de la organización, objeto de estudio y de la información disponible en cuanto a su contexto operacional. En tercer lugar, en conjunto con la data histórica de los criterios antes mencionados, se aplica el método de criticidad. Por último, se jerarquiza detectando el equipo más crítico [21].

Para esto, el método de los puntos es una técnica cualitativa que sirve para estimar la frecuencia de los eventos y su respectivo impacto utilizando una escala relativa, donde este se establece en rangos numéricos explícitos a base de puntos [22]. Por consiguiente, el equipo seleccionado para el trabajo de investigación, siendo la chancadora cónica debe cumplir con criterios fundamentales para la evaluación de criticidad, los cuales se hacen mención en el método de los puntos.

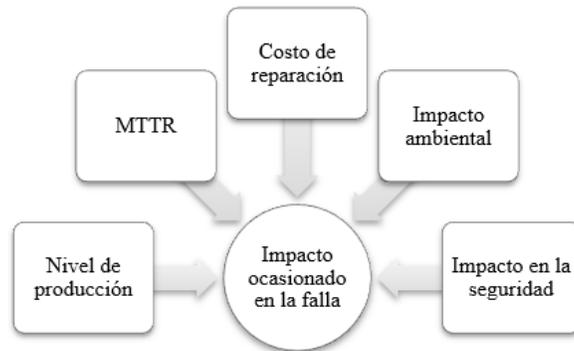


Figura 1.2. Factores importantes para el impacto en el equipo.
Elaboración propia basado en [22].

Según la figura 1.2, la falla de una máquina puede afectar severamente en distintos ámbitos de una industria. Para esto, una de los factores importantes como la producción, puede verse perjudicado por el impacto que pueda ocasionar una falla, ya sea proveniente de un sistema o equipo, por lo cual conlleva a provocar pérdidas de producción, el cual se ve reflejado en la rentabilidad de la empresa [22]. Además, según sea la complejidad de una falla, puede tomar tiempo para la reparación, el cual la reparación genera costos de falla. Por otro lado, los impactos por medio ambiente, pueden verse afectados severamente, contaminando a la naturaleza; y el impacto en la seguridad, el cual pueda afectar la salud del personal técnico. Por lo cual, se requiere ponderar, de tal manera que para el cálculo de esta metodología se aplica la ecuación 1.1. Además, se da a detalle en la siguiente ecuación para el cálculo del impacto.

$$I_f = I_p \cdot MTTR + C_R + I_S + I_A \quad (1.3)$$

Donde:

I_p = Impacto en la producción o Nivel de producción

$MTTR$ =Tiempo promedio de reparación

C_R = Costo de Reparación

I_S = Impacto en la seguridad

I_A = Impacto ambiental

En la siguiente imagen se muestra la matriz de criticidad que relaciona el puntaje de la frecuencia (los cuales son eventos repetidos de las fallas durante un año) y el impacto, los cuales ayudan a ubicar a los equipos en los diferentes cuadros de colores, con esto se busca establecer cuál es la máquina crítica del sistema. El estado con el que puede encontrarse el equipo, puede ubicarse en una zona muy crítica, crítica, semi crítica o no crítica [22].

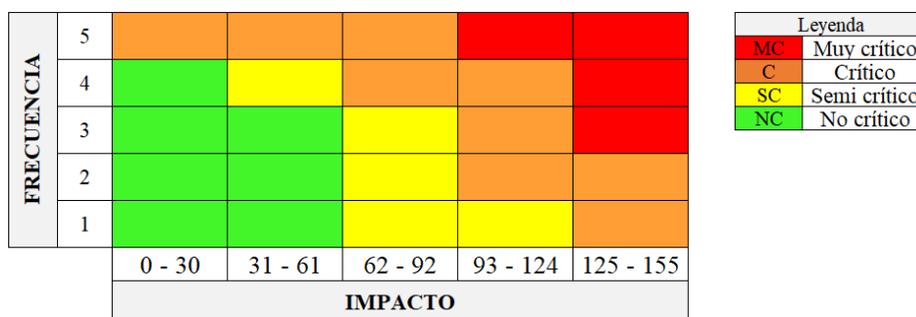


Figura 1.3. Matriz de criticidad.

Fuente: J. Santos, E. Gutiérrez, M. Agüero y M. Strefezza. Análisis de criticidad integral de activos físicos [22].

Por otro lado, el análisis de criticidad basado en puntos permite establecer jerarquías ya sea en los procesos, sistemas o equipos que se vean afectados en la industria. Dado que, se genera una lista ponderada desde el más crítico, hasta el menos crítico. Según la figura 1.4 explica el gráfico de barras mostrando como resultado tres zonas de criticidad (Alta, mediana y baja) [21]. Por ello, la puntuación que le corresponde a cada equipo se ordena de mayor a menor.

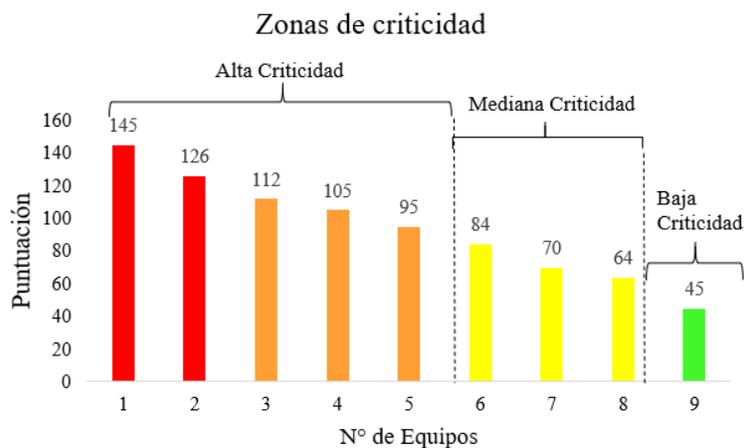


Figura 1.4. Zonas de criticidad.

Fuente: Elaboración propia basado en [21, 22].

1.2. Análisis de los modos de falla y sus efectos (FMEA)

Es una herramienta que determina los modos de fallas que han afectado la funcionalidad del equipo [19, 23]; de tal manera que permite conocer los sucesos provocados por esas fallas que ocasionan parálisis (parcial o total) en la industria.

Esta técnica anticipa los posibles modos y efectos de fallas que puedan ser originados de cada falla funcional, ya sea del sistema o equipo [24]. Por tanto, con esto se busca mitigar o reducir el riesgo, para así mejorar a corto plazo la rentabilidad de la empresa, asimismo para el largo plazo satisfacer al cliente con la calidad de los productos finales elaborados por la empresa.

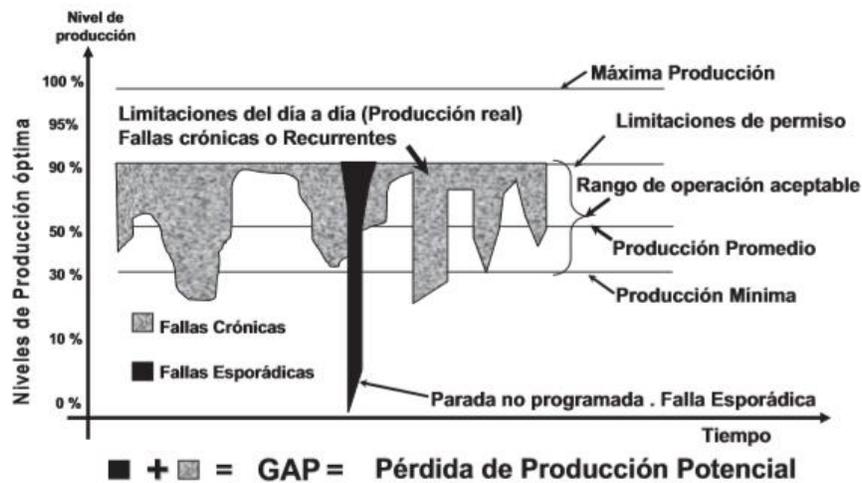


Figura 1.5. Fallas crónicas vs. Fallas esporádicas.

Fuente: A. Mora. Mantenimiento: Planificación, Ejecución y Control [24].

El FMEA es útil para conocer el equipo, desde la identificación del sistema, componentes que lo conforman, así como determinar las fallas que perjudican la funcionalidad del equipo. No obstante, en la presente investigación, el aplicar el análisis de fallas sirve para identificar y erradicar las fallas en base al tiempo. Estas fallas que perjudican a la máquina son de dos tipos, las fallas críticas y fallas esporádicas, por esto se busca erradicar fallas críticas, más que las fallas esporádicas, ya que, en este último se presenta de manera atípica durante la operación de la máquina, puesto que son pocos frecuentes y no se llegan a repetir la misma falla. En cambio, las fallas crónicas implican tiempos consecutivos

de inactividad al activo físico, que pueden generar hasta diez veces más costos que el tiempo de operación normal de un equipo [24].

Por esta razón en la figura 1.5 se observa que las fallas crónicas pueden generar impacto en la pérdida de producción, perjudicando en la rentabilidad de la empresa, respecto a las fallas esporádicas. Por otro lado, el personal de mantenimiento siempre busca que los equipos no pierdan el funcionamiento deseado dentro del contexto operacional donde va a ser utilizado [25].

1.2.1. Tipos de FMEA

Esta herramienta se utiliza en diferentes rubros de la industria, ya sea para el ámbito de producción como los electrodos, productos químicos, alimenticias, o también para la fabricación de equipo pesado, automotriz, etc. Para esto, el FMEA se aplica en diferentes campos, estos pueden darse por diseño, procesos y sistemas de acuerdo a las necesidades de la empresa [26].

- FMEA de diseño (D-FMEA):

Se utiliza para analizar los componentes o elementos afectados por el diseño [26]. Este se enfoca en la etapa de diseño del producto, ya que analiza los modos de fallas que no dejan que el componente pueda cumplir con la función establecida. Sin embargo, la aplicación del D-FMEA ayuda a prevenir el mal funcionamiento del componente y asegurar la vida de este.

- FMEA de Procesos (P-FMEA):

Se aplica en los procesos de producción como en manufactura y ensamblajes [26]. Puesto que, se enfoca en el desempeño de los equipos que no alcanzan la función deseada. Además, ocasiona que la producción no cumpla con lo planificado ya sea a corto, mediano o largo plazo. El análisis de modos y efectos de fallas en procesos de fabricación busca asegurar la calidad del producto deseado, ya que es de vital importancia cumplir con la satisfacción del cliente. La investigación se centra en la chancadora cónica, el cual presenta fallas en sus operaciones, por lo cual, el FMEA se va a desarrollar en procesos, dado que el equipo cumple

un rol de importancia en la obtención de las piedras trituradas dentro de una planta de agregados para el sector de construcción.

- **FMEA de Sistemas (S-FMEA):**

Es aquel informe, el cual está vinculado a los modos de fallas para los niveles de función de sistemas y subsistemas. Esta herramienta sirve para detectar posibles fallas en los sistemas y subsistemas [27]. Por otro lado, este método solo se usa cuando el producto está en fase de planeamiento.

1.2.2. Procesos en la elaboración del FMEA

Los puntos importantes para la elaboración del FMEA, consta primero en definir y seleccionar la máquina, dentro del proceso de producción, el cual se hace un análisis de criticidad [28]. Esta criticidad de equipos permite identificar el equipo principal que da por efecto una parada en la planta de producción, al ser este equipo parte de una línea de producción continuo, al no tener este a disposición para la producción, puede generar pérdidas de dinero, y por ende se ve reflejado en la baja rentabilidad de la empresa.

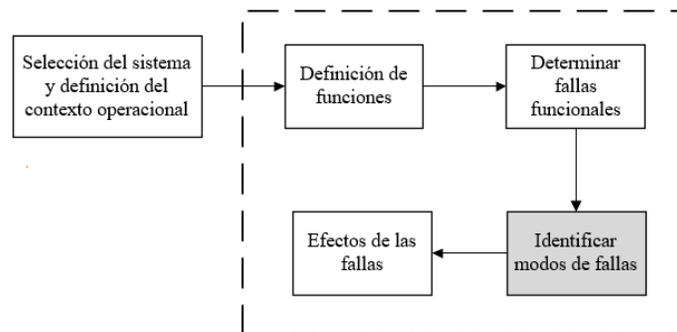


Figura 1.6. Flujograma del FMEA

Fuente: S. Morales. Generación y Desarrollo de un Plan de Mantenimiento preventivo en base a criticidad, según criterios de estadísticas de falla en empresa Química Clariant [28].

Por tal motivo, para la implementación del análisis de los modos de fallas y sus efectos, en la figura 1.6, el cual indica los pasos a seguir para una correcta elaboración de este. Estos pasos son el definir la función del equipo, determinar las fallas funcionales, identificar los modos de fallas y por ultimo los efectos que producen esos modos de fallas. A

continuación, se explica los criterios principales para la elaboración del FMEA, los cuales son la base para la realización de la técnica del FMEA:

a. Función del equipo

Se debe conocer la función del activo físico, el cual ha sido diseñado. Este debe cumplir la función determinada para un propósito deseado. Sin embargo, una maquinaria puede cumplir más de una función deseada [25]. Para esto, se debe conocer el diagrama de flujo de procesos de la planta, data técnica, conocer el ámbito operativo y las funciones deseadas por la organización.

Esto se puede ver en un estudio realizado en una fábrica de cementos, el cual utiliza el RCM para la reducción del inventario de las piezas que no son frecuentes en la rutina de cambio para un molino vertical de rodillos, el cual como modelo de aplicación del FMEA, para la determinación de la función del equipo, es controlar el tamaño del material que se libera, separando el material fino y el material grueso [29].

b. Falla Funcional

Se describe las fallas en el sistema y/o equipo que no cumplan con el objetivo de la organización. Por otro lado, la falla funcional es la incapacidad que una máquina presenta y no pueda cumplir lo establecido por el usuario según sea el parámetro como la velocidad, producción, volumen o calidad [25].

Se define la falla funcional en términos de pérdida de función, más que la falla del activo físico como un todo. Por el cual se deben registrar todas las fallas funcionales que correspondan a cada función. No obstante, algunos de los diferentes aspectos de las fallas funcionales pueden darse por falla total y parcial, la cual la falla total puede perjudicar que el equipo detenga la producción al 100% o el caso que su capacidad de producir se reduzca por otros motivos como el deterioro [25].

Continuando con el caso en estudio del molino de rodillos en una fábrica de cementos, una vez que se define la función del equipo, la falla funcional debe describir la pérdida de la función, por lo cual el autor define que la rotación del separador dinámico no está dando la máxima velocidad [29].

c. Modos de Falla

Una vez que se defina la falla funcional, lo que sigue es analizar los posibles modos de fallas de cada falla funcional [25]. El modo de falla es cualquier evento que pueda causar una falla funcional ya sea de una máquina, sistema o proceso.

Los modos de fallas pueden ocasionarse por un mal montaje, deterioro de los componentes o equipos ya sea por corrosión, envejecimiento [26]. También, debido a un mal diseño, inadecuada selección de los materiales en el equipo o repuestos. Además, se puede dar por errores humanos (operadores y mantenedores). Por esto, se requiere establecer todos los modos de fallas potenciales y reales que afecten a la operación del equipo.

Como tercer paso del desarrollo del FMEA, el caso en estudio del molino de rodillos, el autor plantea que los modos de fallas que podrían generar que el separador dinámico no gire adecuadamente, es debido a que existe un desbalance en el separador dinámico o un desalineamiento en el acoplamiento [29].

d. Efectos de falla

En esta parte consiste en describir lo que pasa o puede pasar cuando ocurre un modo de falla. Por tal razón, el efecto de falla se enfoca en lo que puede ocurrir la causa de la falla funcional, dado que para estos efectos se debe tener en cuenta la evidencia de la falla en caso hubiera, además las maneras en el que la falla puede ser una amenaza para la seguridad o medio ambiente. Inclusive, cuando afecta a la operación y producción. En resumen, un problema se hace notar cuando ese modo de falla no se previene ni corrige [26] a tiempo, dando así que la máquina pueda verse afectada a futuro, ya que perjudicaría a la rentabilidad de la empresa.

Por último, para el caso en estudio del molino de rodillos, algunos de los efectos de fallas que generan el desbalance del separador dinámico y el desacoplamiento, es por la alta vibración [29].

1.3. Jerarquización de Modos de falla

Los modos de fallas elaborados por el FMEA, son evaluados por herramientas cuantitativas que facilitan y en listan los modos de fallas severos que puedan presentarse en el equipo [19]. Por consiguiente, la herramienta de diagrama de Pareto, tanto como el diagrama de Jack Knife permiten establecer a través de costos los modos de fallas críticos del activo físico.

Para estos modos de fallas críticos, encontrados por la elaboración de un análisis de modos de fallas, efectos y criticidad (FMECA), es una herramienta que jerarquiza los daños perjudiciales que se puedan encontrar en los procesos para la elaboración de un producto, ya sea por error en diseño o fabricación, el cual tendrá como utilidad ser una herramienta esencial en el apoyo del análisis de causas raíces y con esto erradicar o minimizar los riesgos causados por esas fallas [19].

1.3.1. Diagrama de Pareto de costos

Es una herramienta cuantitativa que permite identificar los modos de fallas críticos, debido a que la gráfica de barras verticales separa los problemas importantes de los menos importantes, estableciendo un orden de prioridades [30].

Para esto, el principio de Pareto indica que solucionando el 20% de las causas que originan esos problemas, se puede eliminar el 80% de esos problemas. Esto es establecido según el principio de Pareto de la Regla 80:20, el cual se plantea de la siguiente manera: “La menor parte de los aportes produce la mayor parte de los resultados” [31].

Asimismo, la aplicación del diagrama de Pareto se puede ver en un estudio elaborado en Indonesia, el cual se hizo un control de calidad del aceite crudo suministrado de las palmeras, encontrando que los controles de calidad estaban fuera de lo estándar. Estos controles de calidad deben estar por niveles bajos de lo requerido, como en el caso del libre del ácido graso, esto no debe superar del 5%; el contenido de agua, debe ser menor a 0.15% y el contenido de impurezas debe estar por debajo del 0.02%. Por tal motivo, el autor aplica el diagrama de Pareto para indicar cuales son los controles de calidad que se deben priorizar primero, para esto se realizó 312 muestras del aceite de palmera, de los cuales se encontraron

463 defectos, por tanto, los 182 defectos de la muestra de aceite representan los niveles de ácidos grasos, luego encontraron 164 defectos por el contenido de impurezas y por último el contenido de agua era de 117 defectos. Dando lugar, a que el 80% de los defectos eran por niveles de ácidos grasos libres y contenido de impurezas [32]. Por tanto, esto demuestra que el utilizar esta herramienta es esencial para dar énfasis a lo importante, ya sea el ámbito de estudio del que sea requerido.

Por otro lado, referente a la tesis, el diagrama de Pareto no solo jerarquiza los modos de fallas por la cantidad de eventos presentes por esos eventos, sino que esta herramienta puede graficarse, identificando los modos de fallas en base a costos, ya que los costos correctivos afectan a la rentabilidad de la empresa. Los costos de mantenimiento involucrados en las fallas, es el costo por reparar la máquina y la pérdida de dinero por no producir. El primero, involucra la cantidad de técnicos de mantenimiento que van a reparar la falla, por el cual se tiene un costo por la mano de obra, además se tiene en cuenta la utilización de suministros de consumos para la reparación (electrodos, grasa para los rodamientos) o por el contrario el tener que reemplazar componentes deteriorados; estos representan costos de repuestos. Sin embargo, el tiempo en el que deja de producir la planta, depende si la máquina se detuvo al 100% o de manera parcial [33]. Por tanto, los datos esenciales para la elaboración del diagrama de Pareto en base a costos son:

Se empieza por identificar los modos de fallas, por el cual originan la falla funcional, ya que el equipo pierde su funcionalidad debido a ello. También, se cuenta con la frecuencia de fallas registrados por cada evento durante un periodo de tiempo estudiado. Este periodo puede tomarse de manera anual, trimestral, entre otros. Asimismo, por cada frecuencia se tiene en consideración el tiempo para la reparación, este puede identificarse como un indicador, el cual es el tiempo promedio que toma una falla para reparar (MTTR). No obstante, cada modo de falla representa un costo, el cual este costo de falla depende del costo de reparación y el costo por la pérdida de producción.

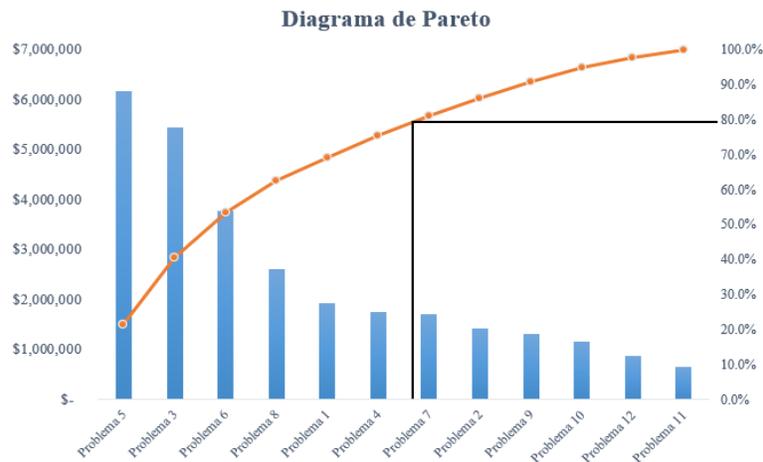


Figura 1.7. Diagrama de Pareto.

Fuente: F. Vilcapoma. Análisis de Fallas mecánicas en el brazo B26XLB del Jumbo Empernador J0129 en la Compañía Minera Volcán S.A.A. unidad Andaychagua [11].

Con estos datos, en base al costo total, que se obtiene del costo de falla por la frecuencia de eventos de falla; se elabora el diagrama de Pareto. Este gráfico de barras mostrado en la figura 1.7, el cual detalla en los ejes verticales, el costo total y el costo relativo porcentual, a su vez en el eje horizontal donde se ubica los modos de fallas, en listados desde los críticos al menos importante, empezando desde la izquierda hacia la derecha. Por tanto, este gráfico explica que el 20% de los modos de fallas críticos representan el 80% de los costos en mantenimiento correctivo.

1.3.2. Método Jack Knife

El método Jack Knife es una técnica de priorización que sirve para encontrar los problemas que originan la detención de paradas en los equipos [28], y los clasifica de acuerdo a las fallas más frecuentes y el tiempo de reparación que se les da a estos. Para su respectivo desarrollo del método se tiene en cuenta los modos de fallas, los cuales son determinados por la herramienta del FMEA. Después, se contabiliza la frecuencia de fallas durante un periodo de tiempo, este tiempo puede ser en base a un año, bimestre; asimismo cada falla toma un tiempo para hacer intervenido, lo cual se calcula con el tiempo promedio de reparación (MTTR). Este indicador indica cuanto tiempo le toma al técnico reparar esa falla correctiva. Por otro lado, la tasa de fallas (λ) representa la frecuencia de fallas que se puede dar por hora.

Por lo cual, al disponer de la tasa de fallas (λ) y el tiempo promedio para reparar (MTTR), se puede determinar la indisponibilidad, ya que representa el tiempo en que el equipo se encuentra inoperativo [34]. Para el cálculo de la indisponibilidad, se da a detalle en la siguiente ecuación:

$$D_i = MTTR \cdot \lambda \quad (1.4)$$

Donde:

D_i = Indisponibilidad (%)

$MTTR$ =Tiempo promedio de reparación (horas / falla)

λ = Tasa de fallas (fallas / hora)

Como se muestra en la ecuación 1.4, los parámetros esenciales para el desarrollo de la gráfica de dispersión logarítmica, se toma en cuenta la tasa de fallas (frecuencia), el tiempo promedio de reparación (MTTR) y finalmente la indisponibilidad. Esta indisponibilidad representa el tiempo que el área de mantenimiento realiza las actividades como el cambio de repuestos o reparación de la máquina debido a fallas crónicas o aleatorias [34].

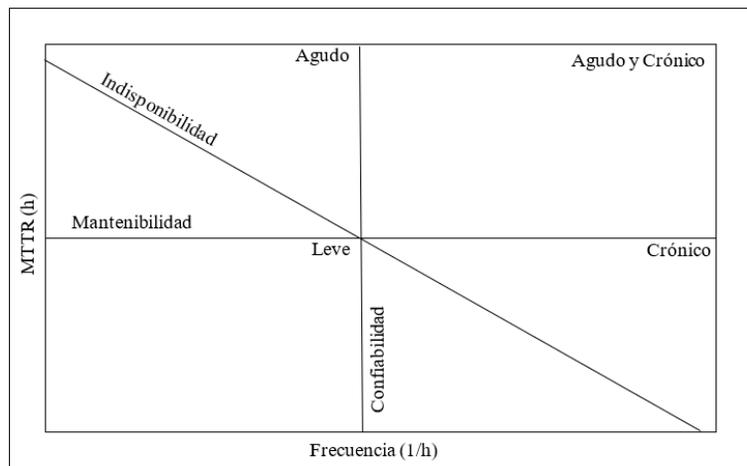


Figura 1.8. Diagrama de Jack Knife de Indisponibilidad.

Fuente: M. Díaz. Análisis de datos en servicio de confiabilidad prestado a una Planta de Remoción de Ripios [35].

Según la gráfica de dispersión se tiene un eje horizontal que representa la tasa de fallas por hora, el cual explica que mientras incrementa la frecuencia de fallas, entonces la

confiabilidad tiende a disminuir, perjudicando la vida de la máquina. Por otro lado, en el eje vertical está el tiempo de reparación (MTTR). Este indicador representa que tan mantenible es el equipo, quiere decir que, si el tiempo de la parada de reparación incrementa, la mantenibilidad tiende a ser menor. Asimismo, este gráfico establece cuatro cuadrantes, los cuales se clasifica por la intensidad de fallas.

Las fallas agudas es el cuadrante que representa el tiempo fuera de servicio que se encuentra el equipo producido por las fallas, pero con un nivel bajo en la frecuencia de esas fallas. Luego se tiene las Fallas agudas o crónicas, el cual explica que la reparación de las fallas toma demasiado tiempo, volviéndolo menos mantenible, además estos contienen altas frecuencias de fallas. Después, la falla leve corresponde a un menor tiempo en reparación de la máquina y baja frecuencia de esas fallas, ya que en esta zona la mantenibilidad que se da en los equipos es mejor, tanto, para la confiabilidad. Por último, fallas tipo crónicas son aquellas fallas que tienen un bajo nivel de MTTR y una alta tasa de frecuencia de fallas, por ende tienden hacer más costosos para la empresa poder controlar esas fallas.

Por otro lado, dentro de esta metodología también se puede realizar la jerarquización de las fallas por costos, los cuales analiza el impacto económico que tiene esos equipos por fuera de servicio [31]. Para su respectivo desarrollo del diagrama de dispersión de costos, se tiene en cuenta el costo de reparación, el cual involucra los costos de mano de obra y los repuestos emitidos por el almacén. También, los costos de producción, este costo depende de la pérdida de producción originada por el tiempo que la planta esta inactiva y factor por pérdida de producción (varia de 0 a 1). Este factor es el que representa la parada total y/o parcial de la línea de producción. De esta manera, tanto los costos de reparación y producción están incluidos dentro del costo de falla. Asimismo, el costo global específico, que indica el costo de la falla por el tiempo que el equipo está detenido, se calcula de la siguiente manera:

$$C_{ge} = \frac{C_f}{MTTR} \quad (1.5)$$

Donde:

C_{ge} = Costo global específico (dólares / hora)

C_f = Costo de fallas (dólares)

Por lo cual, al disponer de esos datos, y de la ecuación 1.4 y 1.5 se puede encontrar el costo global. Para el cálculo de este parámetro, se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_g = D_i \cdot C_{ge} \quad (1.6)$$

Donde:

C_g = Costo global (dólares / hora)

D_i = Indisponibilidad (%)

Teniendo en cuenta la ecuación 1.5, los parámetros principales para el desarrollo de la gráfica de dispersión de costos, se toma en cuenta la indisponibilidad, el costo global específico y el costo global total.

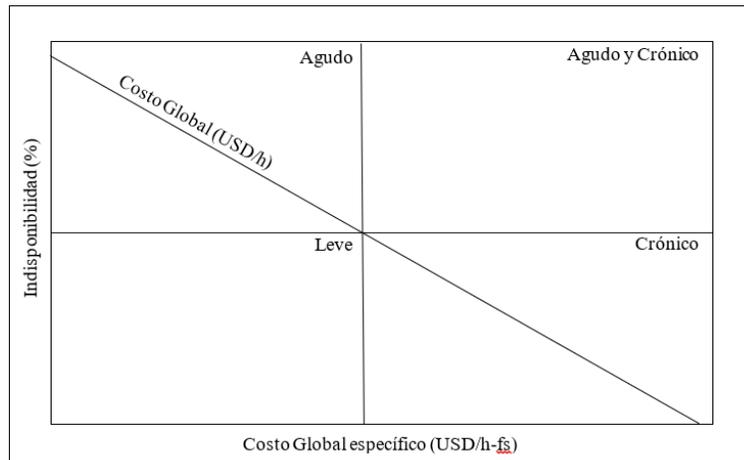


Figura 1.9. Diagrama de Jack Knife de costo global.

Fuente: G. Salazar y J. Puma. Optimización del stock de componentes críticos para reducir costos e incrementar la disponibilidad de las Palas Hidráulicas en minería [31].

En suma, expuestos los métodos de jerarquización desde el enfoque cuantitativo, el beneficio del Diagrama de Pareto permite clasificar gráficamente a través de barras, la información relevante utilizando la regla 80/20. No obstante, el método Jack Knife, clasifica las fallas por su intensidad (leve, agudo, crónico y agudo-crónico), usando el diagrama de dispersión. Además, ambas técnicas se pueden priorizar los modos de fallas a base de costos y llegar al mismo resultado. Por el contrario, la resolución del Método de Jack Knife es más tedioso, ya que se tiene que considerar el cálculo de la indisponibilidad y la tasa de fallas. Asimismo, este es una técnica no tan común en la jerarquización de fallas [36].

1.4. Métodos de determinación de la causas raíces

Los accidentes, eventos catastróficos o anomalías que se dan en organizaciones, son de origen desconocido. Esto se debe a que las fallas dadas en los equipos no permiten que en este caso las máquinas cumplan con la función establecida por el fabricante o el rol por el cual estos han sido adquiridos. Por tal motivo, identificar las causas raíces que provienen de los modos de fallas críticos van a servir no solo para resolver los problemas encontrados, sino que proporciona una guía valiosa de lo que se debe hacer para evitar la recurrencia de fallas similares en las fábricas [37].

Para la investigación de estas causas raíces, se emplea la metodología Análisis de Causa Raíz (RCA), el cual siendo un método analítico, sirve para determinar esos problemas, ya que logra mejorar la confiabilidad de los equipos y procesos, tanto como la calidad, seguridad, costos asociados que están implicados en las fallas crónicas, y disminución en la frecuencia del mantenimiento correctivo [28]. Por tal motivo, las metodologías expuestas a continuación sirven para determinar las causas raíces que provocan fallas en el equipo.

1.4.1. Diagrama Ishikawa

El diagrama Ishikawa también conocido como el diagrama de causa y efecto, es una técnica del análisis de causa raíz (RCA), el cual es utilizado para analizar los problemas y encontrar soluciones, con la finalidad de mejorar procesos, productos y servicios [27].

Esta técnica consiste en una representación gráfica de una espina de pescado. Puesto que, según se muestra en la figura 1.9, esta gráfica para el lado izquierdo se ubica las causas que son establecidas según las categorías ya sea por Medio ambiente (Entorno), Mano de obra (Hombre), Maquinaria (Máquina), Método (Procedimiento), Material y Medida, los cuales las causas pueden tener varios niveles según sea relevante el criterio del investigador [8].

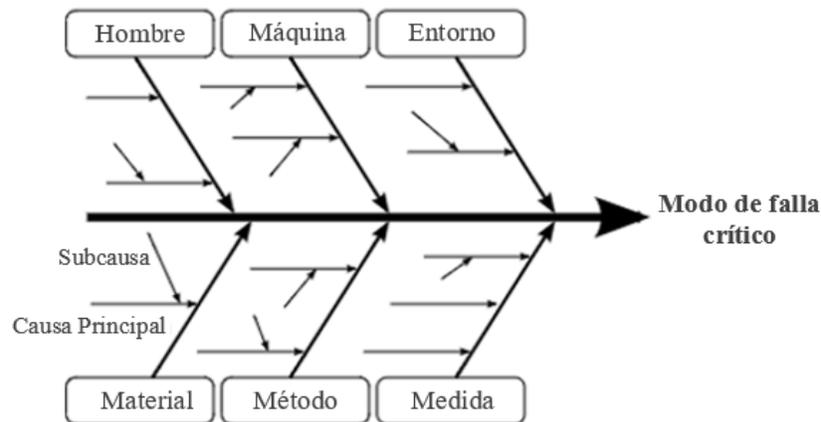


Figura 1.10. Diagrama Ishikawa.

Fuente: A. Mora. Mantenimiento: Planificación, Ejecución y Control [24].

Para el caso de la categoría “Medio ambiente”, explica las condiciones de trabajo que está sometido el equipo en estudio, como la ubicación, la hora, temperatura, etc. En “Mano de obra”, este representa cualquier persona involucrada en el proceso, los cuales por motivos diferentes se analiza las causas que provocan que los técnicos no lleguen a cumplir con el objetivo del trabajo. Para la categoría de “Maquinaria” se toma en cuenta las fallas que impiden que el equipo siga produciendo, por ende, esto provoque una paralización de la producción. En la categoría “Método” describe como se realiza el proceso y los requisitos específicos para realizarlo, como procedimiento de trabajo, reglas, etc. En la categoría “Material”, representa la materia prima utilizada en el proceso, los cuales sirven para obtener el producto final. También, en la categoría “Medida”, explica los datos generados a partir del proceso que se utilizan para evaluar la calidad [24].

Por otro lado, en el lado derecho de la imagen se ubica el efecto, el cual indica el problema presentado por la máquina, ya que para el tema en estudio se utiliza el modo de falla crítica como partida a la determinación de las causas raíces según sea las categorías.

Además, la aplicación de esta herramienta se aprecia en un estudio realizado en la industria de fabricación de prensas, por el cual el autor aplica el diagrama de Ishikawa para determinar las causas que originan el tiempo elevado del proceso de mecanizado, lo cual el problema es por el buje de émbolo, dando como solución a implementar dos bridas en ambos extremos con sus tuercas y pernos, que sirven como apoyo a este. Esto dio como resultado

un ahorro anual en el costo de mecanizado de 1,221.67 USD. Con esta solución se logró que se minimice las vibraciones y un incremento en los RPM, tanto en la velocidad y profundidad del corte del torno [38].

1.4.2. Árbol lógico

Es un análisis cualitativo que permite encontrar las causas raíces a través del modo de falla crítico del activo físico [10]. Esta herramienta eficaz busca obtener las causas de la falla de la manera acertada y precisa de una forma organizada. De tal manera que, esta técnica evite llegar a deducir, percibir o suponer causas sin hechos reales, ya que el árbol lógico se basa de registros pasados tanto como el estado en que se encuentra el equipo.

El árbol lógico representa las relaciones de causa-efecto, el cual sirve para encontrar la causa raíz del problema [39], puesto que este análisis busca mejorar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del equipo. Para la elaboración del árbol lógico consta de una estructura como se ve en la siguiente figura:

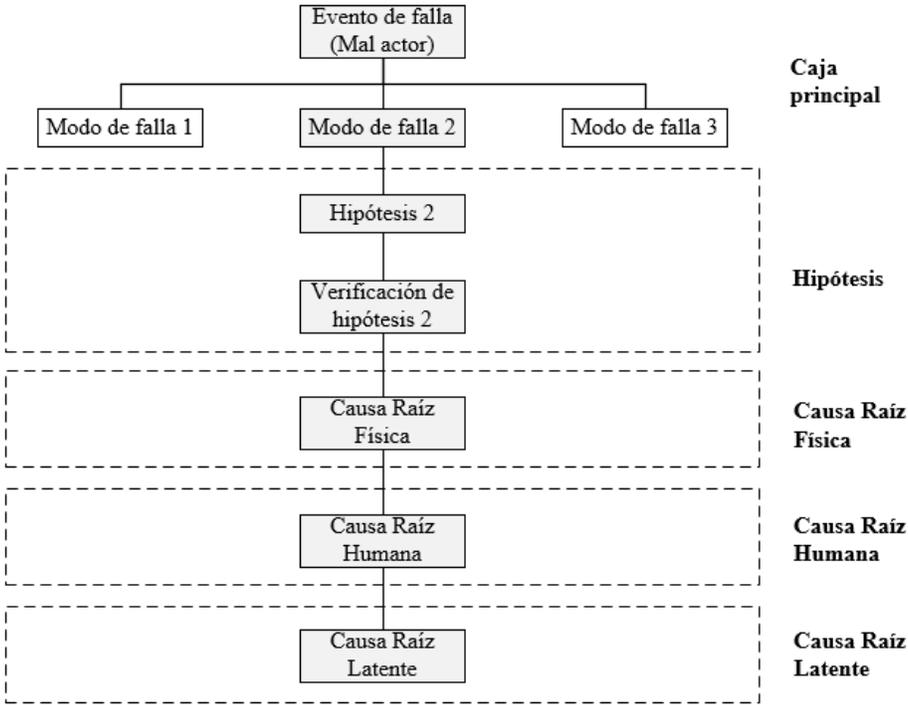


Figura 1.11. Estructura del Árbol lógico.

Fuente: H. Vera. Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz (RCA), para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM – ECOPELROL S.A. [10].

Según este esquema, para su respectiva elaboración, consta de pasos a seguir para determinar las causas raíces. Para esto la herramienta cuenta con la información del evento y modo de falla que se encontró con el FMEA y el análisis de Pareto, dando así a conocer las siguientes partes:

- **Hipótesis:**

Las hipótesis son argumentos o suposiciones que el investigador realiza, con el fin de comprender las posibles causas de cómo pudo haber originado ese modo de falla [10]. De tal manera que, estas hipótesis son imprescindibles para encontrar la verdad de todo ello, a través de un sustento, es decir una verificación del hecho o suceso ocurrido utilizando evidencia como la inspección visual o herramientas predictivas, sea el caso con la información que se disponga por parte de la empresa. Estas hipótesis pueden tener varios niveles de verificación, pero esto depende de la asertividad que se busque [40]. Este al ser un enunciado, da como base la investigación para que pueda ser confirmado o negado la validez de aquella.

De este modo, la aplicación del Árbol Lógico se puede ver en un estudio realizado en Colombia, para la empresa ECOPETROL S.A. Como primer paso para el desarrollo del Árbol Lógico, se definió la caja principal. Este comprende el evento y el modo de falla crítico. El evento era las fallas en los ventiladores de la flota de compresores, ya que estos representaban un total de 7389.5 horas en mantenimiento correctivo. Segundo, los dos modos de fallas descritos por el autor eran las paradas en los equipos debido a la vibración y el ruido fuerte que hacía el enfriador. Asimismo, respecto de la hipótesis, el autor plantea que puede darse por la soldadura mecánica, el cual es ocasionado por el desajuste de elementos dinámicos [10].

- **Verificación de hipótesis:**

Una vez que se tenga la hipótesis a evaluar, se tiene que comprobar dichas suposiciones, por ende, se hace la verificación, el cual recurre a métodos de validación [40]. Estos métodos pueden ser desde el uso de herramientas predictivas tales como el análisis vibracional, termografía, ultrasonido o alineamiento láser. También, por análisis sensorial, el cual abarca la observación humana, fotografías, cámaras de video y registro en la

documentación histórica de fallas [10]. Con esto se busca dar sustento que la suposición hecha sea la correcta.

Por tal razón, expuesto en lo anterior como parte de la validación de la hipótesis se debe de disponer de data, para esto se realiza una recolección de información de las 5P (Partes, posición, personas, papel y paradigmas). La recopilación por partes, hace referencia a los componentes, herramientas que originaron problemas a la máquina en estudio o en caso contrario que hayan sido afectados por el evento ocurrido. Asimismo, en la recolección por posición, la cual indica el lugar del incidente y/o accidente, la ubicación del trabajador, herramientas o los materiales. Para la recopilación por personas hace explicación del personal de trabajo que estuvo involucrado o los testigos que presenciaron el evento. Para la recolección por papel se enfoca en todos los registros relacionados por el accidente. Por último, el paradigma explica sobre las creencias o percepción que tienen los colaboradores respecto de las cosas, ya que sirven como base para tomar decisiones [33].

Continuando el caso de estudio, de la hipótesis planteada, se realiza la verificación de esa hipótesis. De tal manera que, el autor encontró apas y tornillos de sujeción partidos, y para validarlos se basó en la observación visual y las imágenes tomadas de los elementos afectados [10].

- **Causas físicas:**

Una vez que se compruebe la veracidad de la hipótesis, se procede a encontrar las causas físicas, los cuales pudieran dar con el origen de falla [10]. Por otro lado, estas causas pueden venir de raíz humana o latente, ya que son estas las que puedan producirse por error humano o gestión administrativa [12]. Por lo tanto, el análisis de la causa raíz todavía sigue con el proceso de análisis hasta encontrar las otras causas. La causa física describe las fallas del equipo, el cual puedan ser fallas por piezas en mal estado, por error de diseño, mala instalación, etc. Estas fallas técnicas provocan que el activo físico no pueda cumplir con la meta diarias que establece operaciones [41].

Continuando con la investigación en [10], después de validar la hipótesis, se procede a determinar la causa raíz física. Como primer planteamiento, el autor describe que la causa

física es debido a la falla en los tornillos de sujeción. Para esto, el investigador indaga sobre las causas que pueden originar la falla del tornillo, y determina que puede darse, porque el tornillo ha cumplido el tiempo del ciclo de vida. No obstante, otra forma que puede fallar los tornillos, es por la fatiga del material, y esta fatiga es causada por el desbalanceo dinámico del ventilador.

- **Causas humanas:**

Estas causas provienen de errores humanos, los cuales pueden ser por inapropiadas intervenciones a la máquina [12]. Además, la ausencia de decisiones acertadas que son tomadas por el técnico, puede llegar a perjudicar a largo plazo la vida del equipo [41]. No obstante, se evita utilizar nombres individuales o grupales del equipo de trabajo, el cual puedan perjudicar la reputación del mantenedor.

Estas raíces pueden ser causantes de manera directa e indirecta [10], como en el caso de lubricar, selección de repuestos, control de desgaste mediante herramientas de medición (vernier, micrómetro), ya que, si se tiene un mal registro de datos, entonces se puede tomar malas decisiones a la hora de planificar la intervención del equipo, o ya sea priorizar la operación.

En las causas humanas, según [10], la causa del desbalanceo del ventilador y el ciclo de vida que cumplió el tornillo, corresponden al torque inadecuado que se hace a los tornillos de sujeción del Hub, tanto como que no se realiza mantenimiento preventivo a los elementos del ventilador y la falta de balanceo estático en campo [10].

- **Causas latentes:**

La causa latente, también llamado causa organizacional, es aquella raíz que involucra las deficiencias que se presentan en la gestión y toma de decisiones de la empresa [41]. Puesto que, esto proviene de los errores humanos, dado que, al no actuar a tiempo en la corrección de la falla presentada en el equipo, pueden volver crónico esa falla, por ende, podrían verse reflejado en la rentabilidad de la empresa. Estas causas afectan considerablemente al problema en estudio, ya que pueden ocasionar nuevas fallas [12]. En suma, estas causas

pueden darse por la falta de procedimientos, capacitación inadecuada y problemas de comunicación [10].

Como parte final de la investigación en [10] para determinar las causas raíces, se tiene que encontrar la causa raíz latente, el cual se construye en base a la causa física, que en este caso son las partiduras de tornillos del Hub. Por tal motivo, algunas de las causas latentes son debido a la falta de herramienta para comprobar el balanceo estático y dinámico, además no se cuenta con mantenimiento preventivo, tanto como la falta de procedimiento de montaje y desmontaje.

Por último, se añade una tabla comparativa de los métodos encontrados en diversas revistas internacionales. Esta tabla explica la técnica con el que se utilizó para determinar la causas raíces, así como el resultado obtenido por dicha aplicación.

Base de datos	Revistas	Año	Títulos	Técnicas	Resultados
Science Direct	Materials Today: Proceedings	2020	Application of root cause analysis to increase material removal rate for productivity improvement: A case study of the press manufacturing industry	Diagrama de Ishikawa	Se logró un ahorro anual de 1,221.67 USD del costo de mecanizado.
IOP Science	IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	2020	Root cause analysis of newsprint waste using pareto analysis and cause and effect matrix	Matriz de causa y efecto	Se redujo un 60.43% en el desperdicio del papel.
IOP Science	IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	2019	Closed Drain Transfer Pump Failure Analysis using Root Cause Failure Analysis (RCFA) Method	Diagrama de Ishikawa y Árbol lógico	Se recomendó el reemplazo de la tubería en U por una tubería recta, para evitar pérdidas y atrapamiento de aire.
Springer	The international Journal of advanced Manufacturing Technology	2018	Introduction to cause-effect chain analysis plus with an application in solving manufacturing problems	Diagrama de causa y efecto plus (CECA+)	Se logró desaparecer las 58 alarmas falsas producidas por la máquina, utilizando grasa conductora.

Tabla 1.1. Tabla comparativa de las técnicas del RCA.
Fuente: Elaboración propia basado en [38, 42, 43, 44].

1.5. Propuesta de soluciones

En esta sección, se presentan diversas propuestas de solución de acuerdo a la causa raíz encontrada. De tal manera que, se mencionan las soluciones favorables que puedan erradicar o minimizar las fallas críticas. Estas soluciones permiten combatir los problemas que puedan presentarse en la máquina, los cuales buscan llegar a una mejora en la confiabilidad operacional del activo físico, puesto que, esto se verá reflejado en la rentabilidad de la empresa.

- Reingeniería:

El realizar una reingeniería a una máquina, indica un cambio total o la mejora en el aspecto del equipo, ya que esto se enfoca en hacer modificaciones y variaciones de la forma actual en la que operaba la máquina, lo cual es útil para aumentar el rendimiento deseado del equipo según los requerimientos exigidos por producción, como en el caso de la velocidad, calidad, entre otros [45]. Esto se puede ver en un estudio realizado en [16], el cual el autor aplica reingeniería a una chancadora de mandíbulas, que presentaba desgaste excesivo en los aceros del equipo, por tal motivo realizó variaciones en el perfil de chancado, sistema de alimentación y regulación de la abertura. Por tanto, estas modificaciones reflejaron un incremento del 25% en su rendimiento del equipo.

Por otro lado, el rediseño como parte de la reingeniería, hace la modificación en una zona específica del equipo, de acuerdo a las fallas consecutivas presentadas en el ámbito operacional [46]. El rediseño de un componente es cualquier cambio en la especificación de la pieza de un equipo, asimismo puede ser el agregar un elemento nuevo, cambiar de lugar la máquina, la sustitución de la máquina por una marca distinta u otro tipo de máquina diferente [25], como por ejemplo el cambiar una chancadora de martillos que opera dentro del proceso del carbón por otra chancadora de tipo rodillos, con el fin de reducir las fallas que tenían alto impacto en el costo de mantenimiento.

- Gestión de repuestos críticos:

El contar con un nivel adecuado de los repuestos en el almacén, garantiza que no se tenga parada la máquina por mucho tiempo, ya que el adquirir repuestos toma tiempo. Puesto

que, este tiempo puede llevar hasta días, meses de conseguir los componentes [25]. Por tal motivo, una mala gestión de repuestos refleja una inadecuada disposición de los elementos. Además, conlleva a que la rentabilidad de la empresa no sea viable a largo plazo [41].

De hecho, la disponibilidad de los componentes en las actividades de mantenimiento se convierte en un problema, dado que, por parte del área de mantenimiento, estos requieren que los componentes estén siempre en stock cuando la máquina falla. No obstante, por parte del área de logística desean tener el stock mínimo y necesario de los componentes críticos. Por esto, el propósito de la gestión de inventario de repuestos es mantener el nivel de inventario de repuestos óptimo con un costo de inventario mínimo.

El manejar un inventario corresponde a un desembolso de la empresa, sin embargo, el no contar con los repuestos en los momentos oportunos, pueden generar un elevado costo de mantenimiento respecto así se dispone de los repuestos críticos cuando se ejecuta el mantenimiento. Por tal motivo, esto se ve en un estudio realizado en una empresa de cementos, el cual se determinó que del total de 87 componentes que conforma el molino de rodillos, 19 componentes son los más críticos. Además, estos componentes críticos se dan por fallas en diseño y el desgaste que generan deterioro al mismo [29].

- **Capacitación al personal de trabajo:**

La capacitación al personal de mantenimiento es de utilidad para su formación, ya que les sirve para conocer el funcionamiento y la mantenibilidad del equipo en base al contexto operacional y lo establecido por el fabricante. También, les facilita identificar oportunidades de mejora, para esto el tener los conocimientos, habilidades y actitudes requeridas a los técnicos, les ayuda a tener una comunicación y cooperación con los superiores, con respecto a la toma de decisiones y la planificación en la intervención del mantenimiento [47].

Además, el entrenamiento al personal en diversas aptitudes generales como el conocimiento en lubricación, rodamientos o soldadura son importantes para tener criterio en el momento de identificar la falla y realizar la actividad de mantenimiento de forma adecuada. Por otro lado, el poseer conocimiento sobre seguridad y salud en medio ambiente, son

esenciales para identificar los incidentes o accidentes que se puedan producir ya sea por la prisa, frustración, cansancio o exceso de confianza en las tareas diarias de mantenimiento.

- **Procedimiento de montaje y/o desmontaje:**

La disposición de los procedimientos de trabajo para el respectivo desmontaje y montaje de las máquinas, sirven para realizar una adecuada ejecución del trabajo [10], utilizando de la mejor manera las herramientas de mantenimiento (llaves mixtas, extractor de garras, torquímetros), y con esto evitar fallas ya sea por posición incorrecta de los componentes, ajuste inadecuado de los pernos, tanto como el desalineamiento de los ejes, el cual este último puede llegar a perjudicar daños a los rodamientos y partes de los componentes que conforman el equipo [26].

En las industrias manejan documentos para la ejecución de mantenimiento como los PETS (Procedimiento escrito de trabajo seguro), el cual indica los pasos necesarios para intervenir el equipo, tanto, así como identificar la condición subestándar (zona de trabajo que puede exponer a la inseguridad del trabajador provocando incidentes y/o accidentes). Por tal motivo, los procedimientos de trabajos están basados en los manuales por el fabricante, y las mejores prácticas de mantenimiento ejecutadas por el técnico, ya que al poseer experiencia pueden hacer de una manera efectiva pasos útiles o dejar de lado pasos innecesarios que alarguen la intervención de la máquina. Esto se trabaja en conjunto con el supervisor y los técnicos.

- **Aplicación de la Metodología 5S:**

La aplicación de la metodología 5S, va a permitir tener un área de trabajo eficiente y organizada, además de mejorar el rendimiento de trabajo del operario respecto a la máquina. Este método que se basa en cinco conceptos (seleccionar, orden, limpiar, estandarizar y disciplina). El primero paso de la metodología es seleccionar, el cual explica que el área de mantenimiento tiene que desechar lo que no sirve o está en desuso. Segundo consiste en organizar la tarea, el cual es identificar la ubicación de las cosas y ponerlas en el mismo lugar una vez terminada la intervención de la máquina, como por ejemplo tener las herramientas en un lugar establecido. También, considerar el estado de las herramientas, ya sea por factores

externos como la corrosión en los metales o el desgaste por un mal manejo de las herramientas. Después, se realiza la limpieza en la zona de trabajo, evitando acumulación de polvareda. Otro paso consiste en estandarizar los procesos, evitando los errores y mantener el nivel alcanzado por mantenimiento, esto indica que se tiene que mantener las cosas de manera organizadas, clasificadas y limpias. Ultimo paso, se tiene que disciplinar, haciendo las cosas correctamente y practicar el hábito de las 5S [48].

Por lo tanto, esta metodología sirve para la reducción de costos, accidentes y una mejor conservación de las máquinas, equipos y herramientas. En suma, poniendo a la empresa a través de la productividad y calidad, se pueda conseguir que la planta sea más preparada en la demanda del mercado y la competencia. Esto se puede apreciar en un estudio realizado en un taller de soldadura, el cual se implementó las 5S y se logró minimizar la actividad de búsqueda en un 18.75% y el uso de espacio en el taller de equipos y materiales en desuso se redujo en 11.2%, con esto se logró el cuidado y limpieza del área y de la máquina, haciendo que los técnicos sean eficientes y eficaces en sus labores [49].

- **Implementación del Mantenimiento Autónomo:**

El mantenimiento autónomo es una actividad realizada por el operador. Este trabajador al tener conocimiento de las actividades de mantenimiento, tiene como tareas el realizar limpieza, lubricación, ajustes de pernos, reporte de fallas que no puedan repararse en el momento e inspección de máquina, sin interrumpir el trabajo de la máquina. Con esto se busca que el operador tenga un alto sentido de propiedad del equipo. Asimismo, el operario tiene la capacidad de identificar el deterioro del rendimiento de la máquina antes que se produzcan daños graves [50].

Un estudio realizado en Indonesia, para la industria de bebidas, se implementó el mantenimiento autónomo, el cual como principales tareas diarias era la limpieza del equipo y zona de trabajo. También, la inspección y verificación del estado del equipo, entre otros, con esto logra una mejor comunicación entre operaciones y mantenimiento [51].

- **Establecer u optimizar el programa de plan de mantenimiento:**

Tener un plan de mantenimiento es vital, ya que estos son conjuntos de acciones que tiene como propósito mantener un componente, equipo o sistema, en un estado actual según las funciones establecidas desde el punto de vista operacional. De tal manera que, las decisiones efectivas que tome el área de mantenimiento para la intervención del equipo ya sea por mantenimiento preventivo, correctivo programado o predictivo estén basados por KPI's, los cuales indican el estado que se encuentra el equipo, y con esto mostrar una buena mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad [52].

El tener un plan de mantenimiento va a permitir atender un proceso de producción en base a un costo adecuado en la intervención de la maquinaria. Estos costos de mantenimiento (Mano de obra, repuestos) deben estar alineados con los objetivos de la empresa, por lo que la programación y planificación de las tareas de mantenimiento deben indicar una correcta ejecución de las tareas de mantenimiento [41]. De acuerdo a la norma ISO 14224 y la aplicación que se da esta norma en la industria, se tiene los mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo. Estas tareas de mantenimiento van a servir para evitar que las fallas crónicas se tornen realidad y perjudiquen a la planta de producción de las fábricas, de tal modo que, dependiendo de la necesidad que se requiera dar al equipo, estas actividades se explican a continuación:

- **Mantenimiento Preventivo:**

Las actividades por mantenimiento preventivo permiten anticiparse a los eventos de los modos de fallas, con el propósito que estas no dañen a la máquina, y poder reducir la incidencia de esas fallas crónicas. Sin embargo, el periodo de intervención del equipo, el cual está dado por inspección general, ya que se da por revisión del estado que se encuentra los componentes mecánicos, además de lubricación y cambio de grasa de los rodamientos; deben estar asociados con los costos de mantenimiento, para así tomar la decisión correcta para dicha intervención en un periodo razonable [53].

Este tiempo de intervalo establecido por el mantenimiento preventivo, hace que la confiabilidad de la máquina en la operación no se detenga y pueda seguir su funcionamiento

hasta antes que sea intervenido nuevamente. Esto trae consigo una coordinación con producción para que no afecte severamente en sus operaciones, y que la empresa pueda cumplir con el pedido establecido por los clientes. Como ejemplo, se tiene una investigación realizada en [54], se aplica el mantenimiento preventivo a una trituradora de piedra caliza, tipo martillo de impacto con una capacidad de producción de 1,300 toneladas por hora, permitiendo lograr un ahorro mensual de 28,877.59 USD en costos de falla.

- **Mantenimiento Predictivo:**

Realizar un mantenimiento predictivo, permite al área de mantenimiento predecir errores futuros para un equipo en particular, facilitando la reducción frecuente del mantenimiento por inspección general. El mantenimiento predictivo es aplicado a industrias, dando así a una mejora en la confiabilidad, ya que, al detectar la falla a tiempo, facilita tomar la decisión de programar el cambio del componente en un turno de reparación sin interferir con la producción [55]. Estas fallas encontradas se les conoce como fallas potenciales, dado que indica que una falla funcional está a punto de que pueda ocurrir. Por tanto, para la detección de la falla potencial se basa en dispositivos para realizar el mantenimiento cuando el equipo está operativo. Estos dispositivos como el análisis vibracional, termografía; sirven para monitorear el estado actual de equipo.

El analizador vibracional, sirve para analizar a los equipos rotativos, como el caso de analizar el balanceo de un rotor del ventilador, con el propósito que este componente no tenga desequilibrio, es decir que la distribución de masas en todo el estator sea equivalente. Asimismo, el análisis vibracional se puede utilizar para revisar el estado actual de un rodamiento, respecto a las fisuras o desgastes internos dentro el elemento. Otro dispositivo utilizado para la detección de fallas potenciales, es usando la termografía, el cual permite ver el sobrecalentamiento de ciertas piezas o máquinas, que se puede dar por malas conexiones o sobrecarga [56].

Por otro lado, el mantenimiento predictivo se vale de realizar inspección sensorial, el cual el personal de mantenimiento utiliza los sentidos comunes como la audición, la vista, el tacto y el olfato para poder encontrar la anomalía que se puede dar por ruidos anormales, fugas, piezas sueltas, y con esto poder comunicar con tiempo de una posible falla potencial.

Por tanto, estos problemas encontrados permiten reducir o evitar consecuencias como el tiempo de parada, costos de reparación, riesgo de producir accidentes al personal de trabajo [25].

Un caso en estudio que se realizó en una bomba de refrigerante de un reactor, se midió las vibraciones del motor de la bomba, mediante la lectura, este arrojó una vibración de 5.74 mm/s, el cual indicaba un valor superior al límite permitido que era de 4.5 mm/s. Por el cual, los síntomas debido a la vibración eran causados por problemas en la rotación en el eje y los rodamientos. Por tanto, el autor propone que se haga un análisis de temperatura en otras partes de la bomba, para así tener un diagnóstico completo del sistema y poder detectar otras fallas potenciales que se puedan presentar y perjudicar a la parada del reactor [57]

- **Mantenimiento Correctivo:**

El mantenimiento correctivo es la ejecución de tareas específicas, los cuales son causadas por mala intervención al equipo o el descuido de ello por no realizar el mantenimiento a tiempo. El mantenimiento correctivo se puede dar por una situación de emergencia, el cual la tarea se ejecuta después que el equipo falla. Esto puede darse el caso como la rotura del eje de un polín de una faja transportadora o la presencia de fuga de aceite a través de un retén del motorreductor, lo cual el equipo de mantenimiento proceden a cambiarlo los componentes en mal estado.

Por otro lado, el mantenimiento correctivo puede ser ejecutado por previa programación, el cual se le llama un mantenimiento correctivo tipo programado o diferido, dado que, este se realiza antes de que se produzca la falla, puesto que los dispositivos como el analizador de vibraciones, entre otros, tienen la finalidad de detectar fallas potenciales en las máquinas, y con esto proceder a realizar la intervención del equipo a tiempo. Por ejemplo, se realiza el balanceo de un rotor de la chancadora de martillos, el cual se encuentra en desbalance, entonces se procede a soldar al rotor con planchas metálicas para poder balancearlo. Además, esta programación también depende del monitoreo que se haga por mantenimiento preventivo como el caso de revisar el estiramiento de la cadena de un elevador de cangilones, el cual requiere un cambio causado por desgaste excesivo [56].

Un caso particular que se hizo en un tornillo sin fin de una máquina de prensa de tornillo, el cual la vida útil del tornillo sin fin era desde 700 horas a 800 horas; este tiempo de operación del tornillo era menor a lo requerido según el fabricante (1000 horas). Esto se debía a que la prensa fallaba por el desgaste generado en el tornillo sin fin, por el cual el técnico aplicaba soldadura para rellenar la zona con desgaste. Este desgaste tenía una profundidad de 0.583 mm/día, a su vez poseía una dureza de 215 BHN¹². Por tanto, como solución se le añadió una placa de recubrimiento, logrando que el desgaste producido por día sea de 0.256 mm y con esto se incrementó la dureza a 490 BHN [58].

1.6. Indicador Retorno de Inversión (ROI)

El ROI es un indicador que mide el rendimiento de una inversión, para evaluar la eficiencia del gasto que se planea hacer. Siendo este un parámetro que permite saber lo positiva que puede ser la inversión ya sea de un negocio o para el caso de estudio una solución para eliminar esas fallas [59]. El retorno de inversión se mide en porcentaje, este no solo evalúa a un proyecto de inversión, sino que puede ser de utilidad para comparar entre otras inversiones, el cual indique que tan rentable es, por ende genere beneficios a la empresa [60].

Esta ratio se tiene en cuenta cuando se realiza un estudio en tiempo de crisis, el cual estar seguro de que la inversión a realizar se logre recuperar con un beneficio adicional de ello. Por ello, se puede aplicar en inversiones económicas, negocios, compra de acciones, tanto como para evaluar si la solución propuesta mediante el árbol lógico tendrá beneficios a futuro [61]. Por esta razón, para calcular el ROI se requiere de conocer de dos variables principales, los cuales son el beneficio obtenido, según para la presente investigación, se espera reducir el costo total del modo de falla crítico. Por otro lado, la otra variable es la inversión para cada alternativa de la solución propuesta, el cual indica el gasto de capital requerido. Estas variables se expresan en la siguiente ecuación:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio}}{\text{Inversión}} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

¹² BHN: Representa la Dureza Brinell

Donde indica que ROI al ser mayor a 1 o 100%, entonces le traerá una mejor rentabilidad a la empresa, ya que la inversión realizada se recupera en menos de un año. Por otro lado, si ROI es igual a 100%, explica que se ha recuperado la inversión en un año, más no se tiene beneficio. Además, si el ROI es menor que 100%, da a conocer que la inversión a realizar no será rentable a la empresa [61].

Parte de la investigación y de la elaboración de la propuesta de solución, se busca la alternativa de solución que va a generar beneficios a la empresa, de tal modo que, el indicador ROI permita cuantificar según el costo-beneficio la alternativa de solución para mejorar la rentabilidad en la planta de agregados [33].

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo para el desarrollo de la tesis, se va realizar una investigación tipo explicativa, ya que este busca entender las razones o causas de los eventos. Incluso, al ser un estudio estructurado a comparación de los otros, contiene otras clases de estudio (descriptivo, exploración y correlación), los cuales, en cada paso de la metodología, se desarrolla su propio tipo de estudio. De tal manera que, en el trabajo de investigación, los tipos de estudio que van a contener las fases de la metodología son descriptivo, correlacional y explicativo.

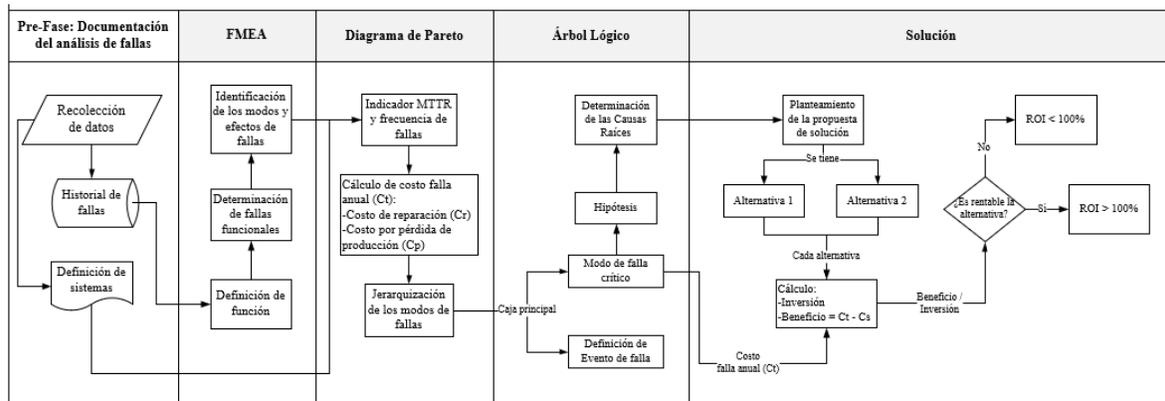


Figura 2.1. Procedimiento de Metodología.
Fuente: Elaboración Propia basado en [10, 33, 62, 63].

Estos pasos a seguir, los cuales se muestra en la figura 2.1; para realizar el análisis de fallas de una chancadora cónica, el cual este opera en una planta de agregados que pertenece al sector de la construcción. Primero consiste en una recolección de data y preparación de la información en una base de datos. Segundo, se define los sistemas a analizar, para luego realizar un análisis de los modos de fallas utilizando la herramienta del FMEA, después se va a utilizar el diagrama de Pareto en base a costos, con esto poder jerarquizar los modos de fallas que generan impacto económico en la empresa. Además, se va a determinar las causas raíces con el método del Árbol Lógico. Por último, se va a proponer una solución óptima para erradicar la falla crítica. Por esto, se va a utilizar el indicador Retorno de inversión

(ROI), para medir la inversión de la alternativa de la solución adecuada en base a la solución propuesta.

Estos pasos que se describieron anteriormente, van a tener un enfoque de clase mixta (cuantitativa – cualitativa), dado que el análisis de los modos de fallas con el uso de la herramienta del FMEA y la determinación de las causas raíces van a contener la parte cualitativa de la investigación. Por otro lado, la priorización de los modos de fallas utilizando el diagrama de Pareto de costos y la selección de la solución óptima por medio del indicador de retorno de inversión (ROI) serán de un enfoque tipo cuantitativo. Además, como parte de la obtención de la fuente de información, será de fuente secundaria, puesto que el desarrollo de la investigación se ha tomado el historial de fallas, las ordenes de trabajo, el manual de la chancadora cónica, los cuales brindan datos importantes como las características de la máquina, así como la operación y producción del equipo.

Por ello, estos datos recolectados y proporcionados por la empresa serán los historiales de fallas, manual de la máquina. Además, la base de datos será analizado por la herramienta del FMEA, el cual va a servir para encontrar los modos de fallas y los efectos que puedan generar que la planta de agregados deje de producir. También, se va identificar los problemas más perjudiciales haciendo un diagrama de Pareto, el cual se va a identificar el 20% de los modos de fallas críticos que representan el 80% del costo de mantenimiento correctivo. A parte de ello, se va a realizar hipótesis preguntándose del “Por qué o Cómo pudo haber pasado dicho evento”, hasta encontrar las causas raíces de un defecto o una falla. Por tanto, para la última etapa, se va a evaluar las soluciones con el indicador Retorno de inversión (ROI), para medir que tan rentable es la inversión que se va a proponer dicha solución.

○ **Recolectar y procesar la información**

Para realizar el trabajo de investigación y proceder con el análisis de los modos y efectos de fallas, se considera la data desde el 2015. Esta data comprende las órdenes de trabajo, el cual se registra las actividades diarias de mantenimiento; las fallas que se da en la máquina y el registro del tiempo de operación. Por otro lado, se tiene el control diario de

producción para la piedra huso 67. Además, se cuenta con el registro del tipo de mantenimiento, los costos asociados y el detalle del problema.

Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de incidencia	Fecha de solución	Tiempo de parada de máquina (hrs.)
Falla 1	Problema 1	Trabajo 1	dd/01/2019	dd/01/2019	X ₁
Falla 2	Problema 2	Trabajo 2	dd/02/2019	dd/02/2019	X ₂
.
Falla n	Problema n	Trabajo n	dd/12/2016	dd/12/2016	X _n

Tabla 2.1. Tabla de base de datos.
Fuente: Elaboración Propia basado en [14].

Según la tabla, se empieza por describir la falla del componente de la máquina, este puede darse en los forros, engranajes, entre otros componentes que ocasionan la parada al equipo. Segundo, se describe el problema, por el cual se ha detenido el equipo. Luego, se menciona la corrección que se realizó al componente, debido al problema presentado. Después, se cuantifica el tiempo de reparación por actividad. Por último, se menciona la fecha de incidencia, el cual da entender cuando ocurrió dicho evento; y se pone la fecha de solución, dado que indica cuando finalizó la intervención.

Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de incidencia	Fecha de solución	Tiempo de parada de máquina
Forros Fijo y Móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros.	16/04/2019	23/04/2019	42.42 hrs
Cabezal cónico	Fisura en el Cabezal cónico con rajadura	Se procedió a soldar el cabezal cónico	31/05/2018	09/06/2018	61 hrs.

Tabla 2.2. Muestra del registro de datos de fallas correctivas.
Fuente: Elaboración Propia basado en la Empresa.

○ **Identificación de sistemas**

Para su respectivo análisis de datos en la chancadora cónica, se da a conocer los sistemas que lo componen. Para esto, la máquina comprende de sistemas de lubricación, enfriamiento, chancado y soporte, los cuales sirven para que el equipo cumpla con el funcionamiento de triturar las piedras, y con esto obtener los productos para uso de construcción de viviendas.

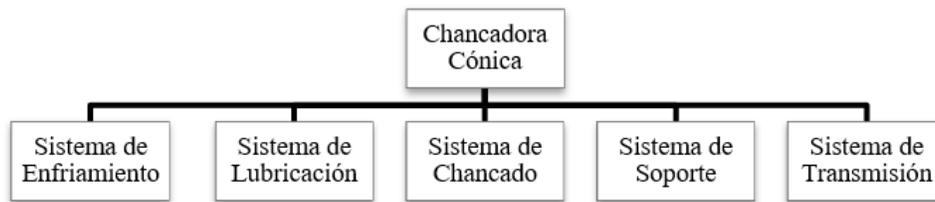


Figura 2.2. Sistemas de la Chancadora Cónica.
Fuente: Elaboración Propia basado en el manual [6].

De acuerdo con la figura 2.2, el sistema de enfriamiento cumple la función de refrigerar el aceite de lubricación, ya que una vez este retorna al tanque de aceite a través de tuberías, este pasa por un intercambiador de calor, el cual es enfriado por agua, permitiendo disminuir la temperatura del aceite, y con esto evitando perder las propiedades del aceite. Por otro lado, el sistema de lubricación, cumple la función de lubricar las zonas donde hay contacto entre los metales y el flujo de alimentación que se da chancadora cónica.

Para el sistema de chancado consta de una cámara, el cual está compuesto por un forro fijo y un forro móvil, los cuales permite la trituración, dado que el forro móvil está montado sobre el eje principal. Este eje tiene un giro excéntrico, el cual un buje hace que el eje pueda inclinarse a un lado para triturar a las piedras por compresión. Asimismo, para el sistema de transmisión, hace referencia a la unión del eje y contra eje a través del piñón y engranaje cónico, por lo cual el contra eje a su vez está acoplado a un motor eléctrico de 55 KW.

2.1. Análisis del FMEA

En esta etapa consiste en identificar el tipo de FMEA, el cual será de procesos, ya que este tipo se aplica especialmente para los procesos de producción. Asimismo, se enfoca en los equipos que no pueden cumplir con la función deseada por producción. En esta investigación, la chancadora cónica al ser un equipo industrial perteneciente a la etapa de procesos, este cumple el propósito final de dimensionar los tamaños de las piedras de agregados, el cual es de ½". Por tanto, una vez se tiene identificado el tipo de FMEA, se procede a definir la función y falla funcional, los cuales se explican a continuación:

a. Definir funciones y fallas funcionales

En esta parte, se empieza por la definición de la función que cumple el equipo. Esta función explica lo que hace la máquina para poder cumplir con el propósito deseado por la planta de procesos. Por ello, la chancadora cónica cumple la función de triturar piedras de ½” por compresión.

Después que se define la función o funciones del equipo, se procede a describir la falla funcional en el equipo, el cual este indica la pérdida de la función principal del equipo. Por tanto, en el trabajo de investigación la falla funcional de la chancadora cónica es el de no triturar nada de piedras dentro de la cámara de trituración, el cual este puede ser por algunos motivos. Estas razones pueden ser debido a que el equipo este operativo, pero no se obtenga el tamaño adecuado de las piedras. Por otro lado, sería el caso que el equipo este detenido, por ende, la producción esté inoperativo por completo.

b. Encontrar los modos y efectos de fallas

En este paso se busca primero identificar los posibles modos de fallas de cada falla funcional. Este modo de falla es un evento que pueda dar el origen de una falla funcional, ya sea de una máquina, sistema o proceso. Por tanto, es vital describir todos los modos de fallas que puedan afectar a la operación de la máquina. Para el caso en estudio, uno de los posibles modos de falla sería los forros con rotura, debido a que ingresa partículas de metal, el cual dañaría los forros de la chancadora cónica.

Por último, para culminar el desarrollo del FMEA, se hace mención a lo que puede pasar cuando ocurre el modo de falla. Por tal razón, siguiendo con el tema en estudio, sería el caso que la chancadora cónica se detenga, provocando que la planta se paralice totalmente. En suma, estos pasos establecidos anteriormente, haciendo hincapié a los modos de fallas, son registrados en un formato, el cual se muestra a continuación:

Equipo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efectos de Falla
Nombre del equipo	Descripción de la función	Pérdida de la función	Eventos que causan la falla	Lo que sucede cuando se produce el modo de falla

Tabla 2.3. Formato para el desarrollo del FMEA.

Fuente: Wintantyo and A. Rindiyah. Decreasing inventory of a cement factory roller mil parts using reliability centered maintenance method [29].

Según la tabla 2.3, el registro de ello empieza con mencionar el nombre del equipo que va hacer analizado, en este caso corresponde a la chancadora cónica. Luego, se describe la función estándar, el cual indica lo que puede hacer dentro del proceso productivo. Para esto, la descripción se empieza con el verbo del nombre del equipo, en este caso para el equipo crítico a la chancadora se le conoce también como trituradora, por ende, este empezaría con el verbo triturar, luego se menciona el objeto o la acción, el cual para este caso es la piedra, además se le agrega el tamaño requerido que se refiere a lo estándar, que es de ½". Para el caso de mencionar la función, este se en lista de manera numérica (1;2;3).

Una vez descrito la función, continua por anotar la falla funcional. Esta falla corresponde a la pérdida de la capacidad deseada de la máquina. Para esto, la falla funcional del equipo es el de no triturar la piedra deseada. Esta incapacidad presentada se ve reflejado por problemas que puede contraer el equipo, además las fallas funcionales se en listan con letras (a, b, c). Después, los modos de fallas indican la manera en la que puede darse la falla funcional. El modo de falla debe incluir un sustantivo y un verbo del componente o pieza que se va a describir, para esto un modo de falla sería por ejemplo diente de engranaje roto. Estos modos de fallas se en listan de igual manera que las funciones descritas al equipo. Por ello, el historial de fallas sirve como base para que se pueda describir el modo de falla y con esto adquirir la cantidad de eventos que ocurre en un determinado tiempo. De tal manera que, los eventos son conocidos como frecuencia de fallas. Por último, el efecto de falla describe lo que pasa en la máquina cuando sucede un modo de falla.

2.2. Diagrama de Pareto de costos

En la segunda fase de la metodología se realiza un diagrama de Pareto. Este gráfico de barras va a permitir identificar los modos de fallas que representan un alto costo en la planta de agregados. Para esto, el diagrama necesita de datos importantes para la correcta elaboración. Lo primero recurre a la frecuencia de fallas (F_f), este extraído del registro de fallas en base a la determinación de cada modo de falla identificados por el FMEA. Para

calcular la frecuencia de fallas anual, se divide la cantidad de fallas presentes durante todos esos años $\sum_{f=1}^n N_f$ entre la cantidad de años. Esto se aprecia en la siguiente ecuación:

$$F_f = \frac{\sum_{f=1}^n N_f}{\text{n}^\circ \text{ de años}} \quad (2.1)$$

Donde:

N_f = Número de fallas

Luego, se calcula el tiempo promedio de reparación (MTTR), este indicador es determinado por el tiempo que toma cada reparación, el cual representa la mantenibilidad que tiene la máquina. Asimismo, cada reparación tiene un costo asociado al costo de mantenimiento correctivo y el costo de no producir en ese lapso de tiempo.

a. Tiempo promedio de reparación (MTTR)

En este paso consiste en determinar el tiempo medio de reparación, el cual considera el tiempo que toma reparar cada modo de falla, para así evitar que ocurra el efecto de esa falla. Para esto, el cálculo depende de dos variables, el tiempo que toma reparar cada falla presentada en la máquina y la cantidad de fallas en un determinado tiempo, para este caso, será de manera anual. A continuación, se da a detalle la expresión de la siguiente ecuación:

$$MTTR = \frac{\sum T_r}{N_f} \quad (2.2)$$

Donde:

$MTTR$ = Tiempo promedio de reparación (horas /falla)

T_r = Tiempo de cada reparación (horas)

Para calcular el MTTR, el historial de fallas se basará en cinco años. Cada año se tiene un tiempo total de parada en el equipo T_r al año y su cantidad de fallas presentadas por cada año N_f . Entonces, se empieza con sumar los tiempos de reparación de todos esos años $\sum_{i=1}^5 T_{ri} = T_{2015} + \dots + T_{2019}$. Luego, se contabiliza la cantidad de fallas durante los cinco años. Por último, se divide el tiempo total de la parada de esos años y la cantidad de fallas presentadas, quedando de esta manera $\frac{T_{2015} + \dots + T_{2019}}{N_{2015} + \dots + N_{2019}}$.

b. Cálculo del costo de fallas

Para este paso consiste en calcular el costo de falla por cada modo de falla identificado a través de la herramienta FMEA. De tal manera que, para realizar el costo de falla (C_f) se debe tener en cuenta los costos que involucra el tiempo de reparación que toma la máquina para que pueda estar disponible para producir, y el costo generado por la pérdida de producción cuando la máquina se encuentra inoperativa; estas variables se pueden ver en la siguiente ecuación.

$$C_f = C_i + C_p \quad (2.3)$$

Donde:

C_f = Costo de falla (dólares)

C_i = Costo de intervención o reparación (dólares)

C_p = Costo por pérdida de producción (dólares)

Según la ecuación 2.3, para determinar el costo de reparación (C_i), este costo involucra la cantidad de técnicos que van a intervenir la máquina en un tiempo determinado. Por el cual, cada hora que pasa el técnico en la máquina representa un costo hora-hombre (H-H), este costo se obtiene del sueldo mensual del trabajador entre la cantidad de horas durante el mes. Teniendo estos datos se obtiene el costo de la mano de obra ($C_{M.O.}$).

Por ello, dentro del costo de mano de obra se requiere la tarifa por persona, el tiempo promedio de reparación y la cantidad de personas que van a involucrarse en el mantenimiento correctivo, dado que esto se representa en la siguiente ecuación:

$$C_{M.O.} = C_{H.H.} \cdot MTTR \cdot N^{\circ} \text{ de personas} \quad (2.4)$$

Donde:

$C_{H.H.}$ = Costo de cada hora hombre (dólares /hora)

$MTTR$ = Tiempo promedio de reparación (horas/falla)

Por otro lado, el costo de repuesto (C_{rep}), es el costo que les demanda por conseguir el repuesto, ya sea por comprar los componentes a los fabricantes o mandar a elaborar dicho componente en una empresa manufacturera. Estos costos se ven en la siguiente ecuación:

$$C_i = C_{M.O.} + C_{rep} \quad (2.5)$$

Donde:

$C_{M.O.}$ = Costo de la mano de obra (dólares)

C_{rep} = Costo de repuesto (dólares)

Por ello al momento que el equipo este detenido, este deja de producir, y conlleva a una pérdida de dinero. Esta pérdida de dinero se le conoce como el costo por pérdida producción (C_p), el cual requiere conocer la producción diaria de la planta, el cual para el caso de estudio es 282.71 m³/día.

Por tanto, en horas de operación del equipo es 37.69 m³/hora. Asimismo, la venta de las piedras trituradas es 8.84 dólares/m³. De tal manera que, la producción por hora es de 333.16 dólares/hora. Además, se tiene que considerar el factor por pérdida de producción (F_p), ya que este indica si el equipo se ha detenido parcial o totalmente, el cual varía de 0 a 100%. Para el caso en estudio, la parada es 100% detenida, ya que al fallar para la producción. Por tanto, para el cálculo de C_p es:

$$C_p = P \cdot MTTR \cdot F_p \quad (2.6)$$

Donde:

C_p = Costo por pérdida de producción (dólares)

P = Producción (dólares/hora)

F_p = Factor por pérdida de producción (%)

c. Formato del diagrama de Pareto

Para priorizar los modos de fallas críticos de la máquina, el costo de fallas que se obtiene de la ecuación 2.3, representa el costo generado por un evento de falla. No obstante, para calcular el costo falla anual, se requiere contar con la frecuencia de fallas anual de la ecuación 2.1. Esto se aprecia en la siguiente ecuación:

$$C_t = C_f \cdot F_f \tag{2.7}$$

Donde:

C_t = Costo de falla anual (dólares)

F_f = Frecuencia de fallas

Por último, los datos de los modos de fallas como la frecuencia, el tiempo promedio de reparación, asimismo el cálculo de los costos de fallas; estos son introducidos en una tabla que se verá más adelante, los cuales las variables se clasifican de acuerdo a dependencia que tiene cada variable, ya que conocer la variable independiente es fundamental para obtener la variable dependiente, es decir el costo de intervención y el costo por pérdida de producción son las variables independientes, lo cuales sirven para calcular el costo de falla correctivo por cada modo de falla.

Sistema	Modo de Falla	F_f	MTTR (hr)	C_i (\$)			C_p (\$)		C_f (\$)	C_t (\$)
				N# personas	$C_{M.O.}$	C_{rep}	Pérdida de producción	F_p (%)		

Tabla 2.4. Formato para el diagrama de Pareto de costos.

Fuente: F. Farfán. Realizar un plan de mantenimiento preventiva del chancador primario Fuller en división [15].

Según la tabla 2.4 se empieza con describir los sistemas que conforma la máquina, los cuales son el sistema de enfriamiento, lubricación, chancado, soporte o por transmisión como se muestra en la figura 2.2. Cada modo de falla identificado por el FMEA representa la falla que puede tener el componente ya sea por rotura, deterioro o fatiga; este puede pertenecer a uno de estos sistemas. Después, se tienen las frecuencias y el MTTR obtenidos del historial de fallas. Asimismo, se ingresa la cantidad de personal, el cual el costo de Hora hombre se obtiene del sueldo del personal, asimismo considerando el tiempo de

mantenimiento correctivo para poder obtener el costo de mano de obra. Además, teniendo el costo de repuesto se puede calcular el costo de intervención. Por otro lado, el costo de la pérdida de producción va hacer obtenido de la producción diaria, el precio del producto, el tiempo que está detenido el equipo y el factor de parada que es el 100% por el motivo que el equipo se detiene cuando falla. Por último, calculando el costo de falla y teniendo la frecuencia se obtiene el costo total al año.

Modo de falla	C_t (\$)	C_t relativo (%)	C_t acumulado (%)
Modo de falla 1	X_1	32.0%	32.0%
Modo de falla 2	X_2	19.0%	51.0%
Modo de falla 3	X_3	18.0%	69.0%
Modo de falla 4	X_4	13.0%	82.0%
Modo de falla 5	X_5	11.0%	93.0%
Modo de falla 6	X_6	7.0%	100.0%
	$\sum X_i$	100.0%	

Tabla 2.5. Cuadro para priorizar modos de fallas.
Fuente: Elaboración propia basado en [15].

Una vez se tiene los costos totales para cada modo de falla, se procede a realizar la tabla 2.5, para el cual es necesario ordenar de manera decreciente el costo de falla anual que tiene mayor pérdida hacia el menor costo. Por esto, el costo total relativo ($C_{total\ relativo}$) representa de manera porcentual el costo de falla anual. Por ello se calcula dividiendo el costo total del modo de falla entre la suma de todos los costos de los modos de fallas producidos en la chancadora cónica. Luego, sumando el porcentaje de cada modo, se puede obtener el costo total relativo acumulada ($C_{total\ acumulado}$), con el propósito de determinar el 80% de los costos totales de los modos de fallas críticos. En suma, como etapa final de la fase II se elabora un diagrama de barras, seleccionando el modo de falla, el costo total (\$) y el costo total acumulado (%). Una vez se tenga los modos de fallas críticos, se selecciona uno para determinar las causas raíces, el cual será desarrollado con la metodología RCA.

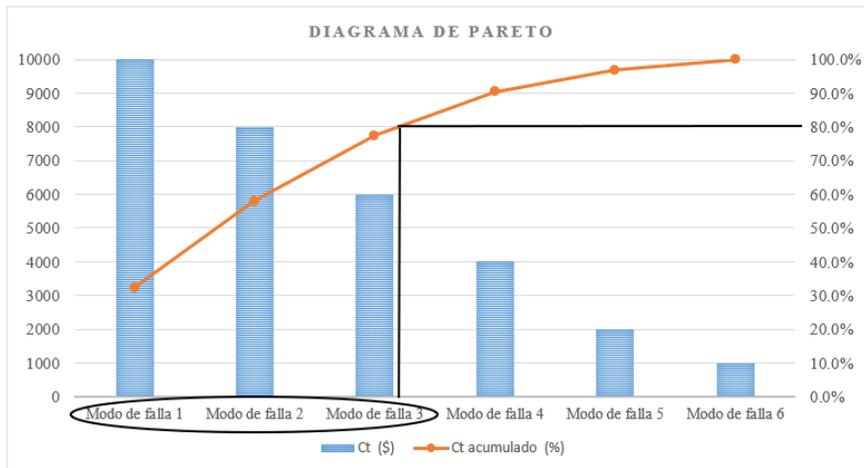


Figura 2.3. Diagrama de Pareto de costos.
Fuente: Elaboración propia basado en [15].

2.3. Aplicación del Árbol Lógico

En esta fase se elabora el árbol lógico como técnica del RCA, el cual busca determinar las causas raíces del modo de falla crítico. Estas causas raíces son la física, humana y latente; los cuales para la raíz física hace referencia a los sucesos físicos de la máquina, los cuales dan a entender del porqué de la falla en el equipo. Por otro lado, la raíz humana indica los problemas técnicos que se podrían dar en la intervención de la máquina tanto en operación y mantenimiento. Por último, la raíz latente explica los sucesos en la plana gerencial debido a los problemas en la gestión de mantenimiento y operación. Por esta razón, se va a explicar primero la metodología del RCA y las partes de la herramienta del Árbol lógico para determinar las causas raíces.

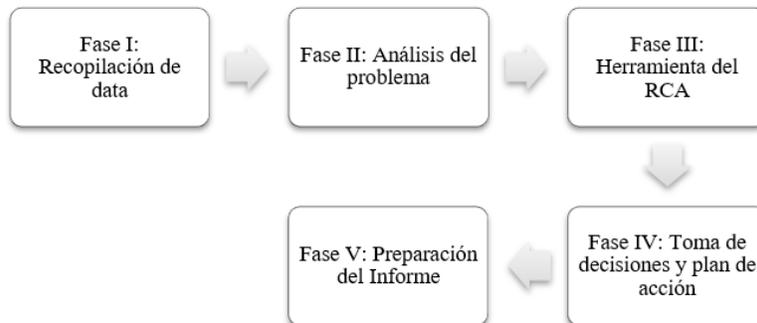


Figura 2.4. Fases del análisis causa raíz.

Fuente: R. Latino, K. Latino and M. Latino. Root Cause Analysis: Improving Performance for Botton-Line Results [33].

Para la elaboración del RCA consta de cinco fases:

1. Recopilación de data:

En esta fase se enfoca en la recopilación de la data del evento de la falla presentada en el equipo, para esto se debe conocer las condiciones de trabajo a que estado sometido el equipo durante la trayectoria de su operación. Además, se conoce los incidentes o accidentes producidos por dicho equipo, tanto como el impacto ambiental e intervención del operario [33]. De tal manera que esta recolección de datos se apoya del manual de la máquina que sirve para conocer las características del equipo y dimensiones, además se recopila información de la capacidad y costos de producción de la planta de agregados, órdenes de trabajo (OT). Por otro lado, para realizar esa recolección de datos se utiliza el método 5P.

Cada letra representa un tipo de recolección de datos, el cual la primera son las partes que involucran la falla del equipo, estos pueden ser los componentes de la máquina, la materia prima, el aceite, otros equipos o equipos de la planta de producción. En la data por posición hace referencia el tiempo de ocurrencia y lugar del evento de falla, estos pueden tener como apoyo la ubicación del personal, las herramientas de trabajo. Para la recopilación de información por personas, hace referencia al personal que intervino el equipo y los testigos que lo presenciaron. En la información que se da por papel explica la recopilación del historial de producción y fallas, diagrama de flujo de los equipos, manual de la máquina. Por último, los paradigmas son creencias que el trabajador tiene ya sea por la experiencia pasada por el cual fallo el equipo o un evento similar que se dio en otro lugar.

2. Análisis del problema:

El siguiente paso consiste en analizar el problema, para esto ya se cuenta con data recolectada de la situación del evento, el cual sirve para revisar los problemas presentados en la planta de producción, los tiempos de operación, la fecha en que se dio la parada de la máquina, las modificaciones del sistema, mantenimientos realizados y cambio de personal. Asimismo, para procesar el análisis se empieza con la herramienta FMEA, el cual se puede describir el equipo y las fallas que los producen, ya que permite conocer a su totalidad el funcionamiento del activo físico. Además, utilizando el método cuantitativo, el diagrama de

Pareto sirve para jerarquizar el modo de falla crítico de la máquina. Esta herramienta ayuda a organizar los datos, ya que permite asignar un orden de prioridades, al mostrar un gráfico de barras, identificando los problemas importantes [33].

3. Herramienta del RCA:

En esta etapa para determinar las causas raíces del problema, se tienen herramientas para identificar esas causas. Estas herramientas son el Árbol lógico y el diagrama Ishikawa, por el cual la primera herramienta analiza el modo de falla crítico a través de los hechos de datos reales y lógicos. Este trabaja de forma estructurada y ordenada. No obstante, el diagrama de espina del pescado se basa en consenso o suposiciones que pueda establecer el investigador. Por tanto, en la presente investigación se va dar el desarrollo utilizando el Árbol lógico para la determinación de las causas raíces físicas, humanas y latentes, dado que la causa física relaciona errores o fallos en el equipo. La causa humana es ocasionada por la intervención inapropiada al equipo. La causa latente tiene que ver con la falta de procedimientos, mala planificación [33].

4. Toma de decisiones y plan de acción:

Después que se identifica las causas raíces en la etapa 3, se procede a proponer una solución para mitigar o reducir las fallas que se presenten en la máquina, con esto se busca asegurar de que no vuelva a ocurrir la falla. Para esto, se puede empezar haciendo una lluvia de ideas, después que existan varias alternativas, se debe determinar cuáles serán las acciones correctivas para resolver la causa raíz. Estas causas raíces no deben llevar al identificar el culpable. Por ejemplo, si en caso sea que el equipo falle por aceite, se puede proponer cambiar por otro tipo de calidad de aceite y revisar el tiempo de vida del aceite para su respectivo cambio. Por tanto, al proponer la solución, se realiza el costo-beneficio para ver si la propuesta es conveniente para aplicar.[33].

5. Preparación del informe:

En el ámbito laboral para la presentación del trabajo se elabora un documento breve que explique el análisis realizado [33]. En este informe contiene, los participantes del trabajo de investigación, la definición del problema en base a la data histórica recopilada,

consecuencias del problema, objetivos, causas raíces (este debe ser realizado por la herramienta seleccionada de la metodología RCA) y acciones correctivas. Por el cual, en la presente tesis, este documento se va a presentar como un informe.

A continuación, una vez explicados las fases del RCA, se continua con la elaboración del Árbol lógico. Estos pasos contienen la caja principal, la hipótesis y causas raíces.

a. Definir caja principal

Como primer paso del árbol lógico se define la caja principal, el cual está compuesto por el evento de falla, también conocido como la falla funcional, y el modo de falla crítico. La caja principal empieza con el evento de falla, ya que este es el mal actor que ocasiona problemas o pérdida de función del activo físico. De tal manera que, para encontrar el evento de falla, este se plantea utilizando la herramienta FMEA. Para esto, el evento de falla del equipo sería que la chancadora cónica no tritura nada de piedras.

El siguiente paso es identificar los modos de fallas críticos, para esto el diagrama de Pareto sirve para poder encontrarlos. Estos modos son las observaciones realizadas por el equipo de trabajo, los cuales indica las anomalías que necesitan ser explicadas, como por ejemplo el encontrar la bocina con rajadura, forros rotos, entre otros. Por tanto, para el trabajo de investigación se va analizar uno de los modos de fallas críticos que se presenten en el diagrama de Pareto. Por consiguiente, ese modo de falla requiere una explicación detallada del porque ocurre el problema, y para el siguiente paso, este explica de cómo podría suceder dicho modo de falla.

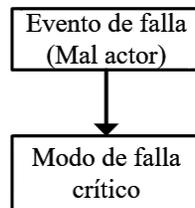


Figura 2.5. Caja principal del Árbol Lógico.
Fuente: Elaboración propia basado en [10, 33].

b. Establecer hipótesis

En este paso se establecen hipótesis, los cuales dan a entender del porque sucede ese modo de falla. Estas hipótesis son suposiciones respecto a que se hace, el cual busca como puede ocurrir el modo de falla, después se tiene que verificar las hipótesis. Por consiguiente, estas verificaciones pueden tener varios niveles, dependiendo del nivel que se requiera verificar y/o validar. Esta verificación se puede validar por la data recolectada de las 5P (Personas, partes, posición, papel, paradigmas). Los cuales según sea el caso que se plantee en la hipótesis, la validación puede darse por análisis sensorial y documentación que presentan la evidencia del hecho.

La verificación de hipótesis por análisis sensorial se refiere a los cinco sentidos del ser humano, los cuales utiliza para ver y reportar anomalías encontradas, asimismo en caso pueda presentarse por sonidos ruidosos, el cual le ponga alerta de que algo no anda bien en la máquina o el sentido del olfato, si es que resulta de un olor a quemado. Por otro lado, estas evidencias se apoyan de entrevistas a técnicos, así como el uso de fotografías y videos grabados evidenciando la falla. Por ejemplo, según el caso en estudio, se puede encontrar que para el caso de tuberías de alimentación por lubricación estén rotas, es debido a que se puede haber formado sarro en las paredes internas, haciendo que se genere sobrepresión al momento que el aceite pasa por allí, y con esto provoque la ruptura en las tuberías y que haya derrame de aceite al piso. Por ello, los técnicos para que realicen la validación de hipótesis, tendrían como evidencia fotografías de la tubería contaminando con sarro.

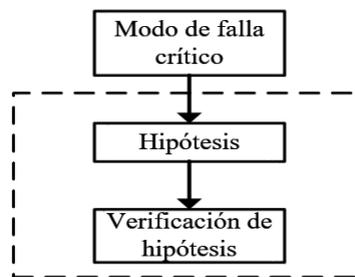


Figura 2.6. Hipótesis del modo de falla.
Fuente: Elaboración propia basado en [10, 33].

c. Determinar causas raíces

Para este paso se empieza con determinar las causas raíces físicas, los cuales se procede a encontrar los problemas que pudieran dar con el origen de la falla. Siguiendo con el ejemplo para el tema en estudio, al ver la acumulación de sarro encontrado dentro de las paredes de las tuberías de aceite, proceden a encontrar la causa física que puede a ver provocado la ruptura de la tubería. Por el cual, esto podría darse, porque el filtro del tanque de aceite estaba roto, el cual el polvo pasaba y se acumulaba en las paredes haciendo que se obstruya y no deje pasar el fluido.

Continuando con el análisis de la causa, una vez se determine la causa raíz física, entonces se procede con la raíz humana. Esta raíz proviene de errores humanos, los cuales puede ser por malas intervenciones en la máquina, tanto como el no de disponer de las herramientas adecuadas para dicho trabajo. El cual siguiendo con el tema de investigación una raíz humana podría ser que los técnicos no realizan inspección al estado del filtro.

Por último, la causa raíz latente, es aquella raíz que puede darse por una mala gestión administrativa de la gerencia, debido por una inadecuada toma de decisiones en el momento de priorizar tareas de mantenimiento. Para el caso en estudio, se podría decir que la raíz latente sería el no tener una inspección regular del estado del filtro, ya que al no revisar de manera periódica puede surgir la falla.

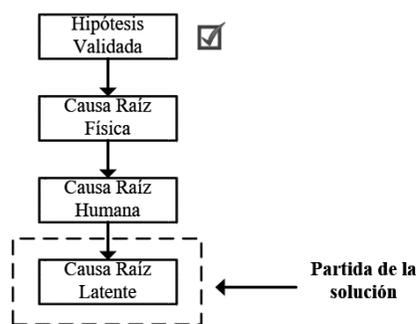


Figura 2.7. Causas raíces del modo de falla.
Fuente: Elaboración propia basado en [10, 33].

Según la figura 2.7, estas causas raíces empezando por la causa raíz física hasta determinar la causa raíz latente, son el motivo que los equipos continúen fallando repetidas

veces. Por esto, como parte de la investigación es seguir la secuencia de pasos que se explicó en esta fase, para llegar a la última causa. Por tanto, conociendo la causa raíz latente, se puede tomar acción para corregir esa falla crónica y mejorar el rendimiento de la máquina.

2.4. Solución

En este paso consiste en proponer una solución que sirva para erradicar o minimizar el modo de falla del equipo en estudio. Esta solución parte de la causa raíz latente, además en cada solución existen varias alternativas, por el cual se procede a tomar la alternativa de solución rentable aplicando el indicador Retorno de Inversión (ROI) en base a su costo-beneficio. Las soluciones pueden ser desde recomendar el cambio de material de acuerdo al fabricante, como también realizar una mejora en la gestión del mantenimiento de la empresa. Por esta razón, cada acción de corregir un problema para el beneficio de la compañía conlleva a una inversión inicial de la solución, y con esto se busca comparar cada alternativa para evaluar la posición de esta y ver en cuanto tiempo se recupera la inversión inicial.

a. Alternativas de la solución

Las soluciones se enfocan en reducir o eliminar el impacto que puede ocasionar la falla crónica de la máquina. La solución propuesta de acuerdo a la causa raíz latente, puede contener varias alternativas que logren mejorar la confiabilidad de la máquina. Por ejemplo, se puede dar que al momento de reparar o cambiar de repuesto a la máquina, no se tenga a disposición los repuestos en el almacén, ocasionando que se alargue el tiempo de parada de la máquina, lo cual tienen que pedir la compra inmediata del componente. Por tal razón, una solución viable sería de disponer en stock los repuestos críticos ante alguna emergencia inesperada.

Otro caso, sería que la máquina no contemple un plan de mantenimiento preventivo para una inspección general de los elementos expuestos a desgaste como por ejemplo en las bocinas cilíndricas y cónicas. Como parte de la solución, sería recomendar un programa de intervención a los componentes de las bocinas, midiendo el avance del desgaste, y de acuerdo

a una tolerancia permitida por el fabricante, tomar la decisión de cambiar estos elementos a tiempo.

Un problema que puede presentar la chancadora, sea por el tiempo de vida la máquina, es que al tener años en operación, muestre fallas de manera constante, el cual pueda paralizar la planta de agregados. Por esta razón, sería el caso de evaluar la opción de comprar otra chancadora y ver alternativas de marcas. Por otro lado, la chancadora puede fallar por los forros, ya que puede ser por la calidad de los materiales. Por tal razón, una solución sería optar por otros fabricantes. En suma, según explicado sobre las posibles soluciones, se muestra la siguiente imagen, el cual para cada solución se puede tener varias alternativas como en el ejemplo de ver opciones de fabricantes según sea los materiales.

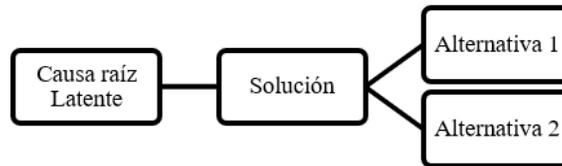


Figura 2.8. Alternativas de la Solución de la causa raíz latente.
Fuente: Elaboración propia basado en [33].

b. Selección de la alternativa de solución con ROI

En esta parte consiste en cuantificar las alternativas de la solución propuesta, para esto, el manejo del indicador ROI, sirve de utilidad para evaluar la rentabilidad de la solución. Este indicador depende de dos variables principales. Primero, representa el beneficio, el cual indica una reducción en los costos generados gracias a la solución planteada. Este ahorro generado por la alternativa de la solución propuesta se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\text{Beneficio} = C_t - C_s \quad (2.8)$$

Donde:

C_t = Costo falla anual (dólares)

C_s = Costo de la solución (dólares)

De acuerdo a la ecuación 2.8, para determinar el costo falla anual, se obtiene de la ecuación 2.7, además el costo de la solución proviene de la mejora que daría si se propone la

solución, el cual utiliza la misma ecuación del costo falla anual. Para la reducción en el costo solución se puede optar por manejar parámetros como la intensidad de la frecuencia, el tiempo de reparación o el costo de repuesto, es por ello que el costo de la solución será menor al costo de la falla. De tal manera que, esto se vería reflejado en un ahorro al año.

Por consiguiente, para el costo de solución se procede a realizar el cálculo del beneficio para cada alternativa. Asimismo, para calcular la segunda variable del indicador ROI, que representa la inversión de la solución planteada, este depende de conocer cuánto será el costo del repuesto. También, el gasto que involucra realizar el mantenimiento anual. Por otro lado, se consideran las reuniones realizadas que harían el área de mantenimiento para determinar las causas raíces y proponer soluciones.

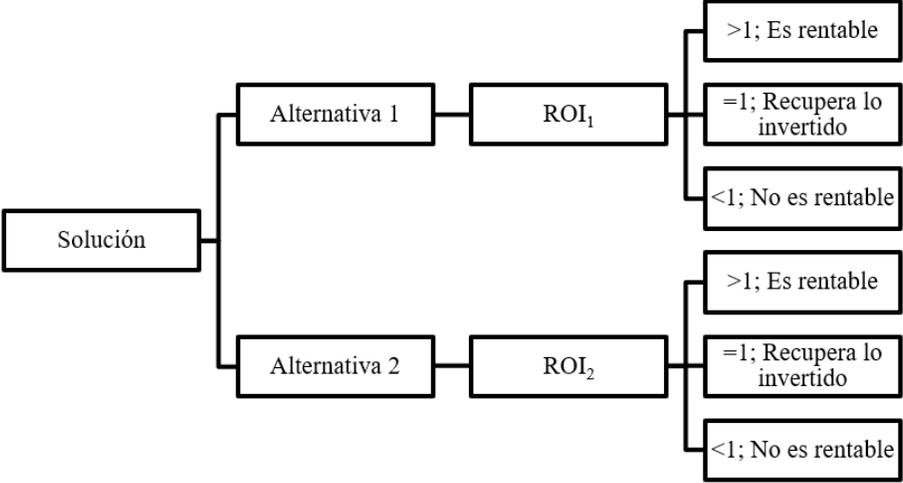


Figura 2.9. Solución rentable envase a ROI.
Fuente: Elaboración propia basado en [33].

Como se observa en la figura 2.9, para el cálculo del ROI, se aplica la ecuación 1.7 para dos alternativas de la solución, este número expresado en %. Luego, se compara la solución con su respectivo ROI, y se escoge el valor más alto, ya que es el que trae beneficios a la empresa, además el indicar ROI tiene que ser mayor a uno para que la solución sea rentable.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

En este capítulo se expone los resultados que se da a realizar el análisis de fallas utilizando el procedimiento de la metodología presentada en el capítulo anterior. Además, se describe los componentes que conforman cada sistema de la chancadora cónica. Por otro lado, los pasos que conforman este capítulo se encuentran enumeradas de acuerdo a los objetivos específicos del trabajo de investigación. El primero empieza identificando los modos de fallas, los cuales son encontrados con la herramienta FMEA. Luego, se prioriza los modos de fallas, para encontrar el modo de falla crítico. Después, se determina las causas raíces utilizando el Árbol Lógico. Por último, se propone una solución a la causa raíz encontrada y se realiza un costo-beneficio para evaluar la rentabilidad de la alternativa a través del ROI.

A continuación, se clasifican los tipos de sistemas que comprende chancadora cónica, los cuales se mostraron en la figura 2.2. La trituradora está compuesta por el sistema de chancado, sistema de transmisión, sistema de lubricación, sistema de enfriamiento y el sistema de soporte. De tal manera que, se dará a detalle los componentes que forman parte de cada sistema.

- **Sistema de chancado**

El sistema de chancado de la máquina es la que se encarga de triturar las piedras. Esta cámara de trituración somete al chancado de las piedras por compresión, logrando reducir las piedras al tamaño deseado por el cliente. Este sistema presentó un tiempo total de paradas de 263.64 horas al año, los cuales se llegó a tener pérdidas anuales de 96,821 USD por no producir piedra chancada. Además, durante los cinco años de operación del 2015 al 2019 se registró 26 fallas en el sistema de chancado, de los cuales los componentes que presentaron fallas eran los forros fijo y móvil, la bocina cónica, bocina cilíndrica, cabezal cónico y cojinete semiesférico. Puesto que son repuestos que representan un costo promedio de 2,180

USD por componente. A continuación, se menciona las componentes que conforman en el sistema de chancado. Estos componentes están enumerados por ítems, los cuales se cuenta con 10 componentes.

Item	Partes
1	Bocina cilíndrica
2	Cuerpo excéntrico
3	Bocina cónica
4	Cojinete semiesférico (Anillo de sellado y Socket)
5	Eje principal
6	Cabezal cónico con base semiesférica
7	Forro fijo y móvil
8	Tazón roscado
9	Placa de alimentación (Anillo y pernos de sujeción)
10	Resortes

Tabla 3.1. Partes del sistema de chancado.
Fuente: Elaboración propia basado en [6].

Según la tabla 3.1, para el montaje del sistema de chancado empieza con la bocina cilíndrica, el cual estando en posición vertical, se va a montar con el cuerpo excéntrico. Sin embargo, la pared interna de la bocina cilíndrica estará en contacto con el cuerpo excéntrico. Luego, la pared externa de la bocina cónica va a estar en contacto con la pared interna del cuerpo excéntrico. Después, se realiza el montaje del cojinete semiesférico, además se pone el eje principal. Este eje al ser el elemento que gira de manera excéntrica por la bocina cónica, se le suma el cabezal cónico. Este cabezal va protegido con su forro móvil y un forro fijo para la parte de la tapa del chancado. También, se monta el tazón roscado que sirve para definir el tamaño de la piedra. Por último, se ponen la placa de alimentación y los resortes.

- **Sistema de transmisión**

El sistema de transmisión es la que se encarga de transmitir la potencia a la chancadora cónica, logrando que el eje principal tenga un giro de manera excéntrica y por medio del cabezal cónico pueda triturar la piedra en la cámara de trituración. Esto es gracias a que el motor eléctrico que tiene como finalidad transformar la energía eléctrica a energía mecánica, está actuando por medio del giro del rotor. Este movimiento rotacional del eje se

acopla a un contraeje. Este contraeje tiene como componentes tres rodamientos, los cuales dos rodamientos están para el lado del motor eléctrico y el otro rodamiento está ubicado al lado del piñón cónico recto. Además, el piñón y el engranaje al montarse de manera perpendicular, es decir a un ángulo de 90°, son los que se encargan de transmitir el movimiento de los ejes. A continuación, en la tabla 3.2 se mencionan las características de los componentes como el número de dientes de los engranajes, la potencia del motor y los códigos de los rodamientos.

Item	Partes
1	Engranaje cónico recto. Z=41 dientes
2	Contraeje
3	1 rodamiento lado piñón. Cod. 3618
4	2 rodamientos lado motor. Cod. 7517
5	Piñón cónico recto. Z=19 dientes
6	Acoplamiento
7	Motor eléctrico trifásico 55 KW

Tabla 3.2. Partes del sistema de transmisión.
Fuente: Elaboración propia basado en [6].

- Sistema de soporte

El sistema de soporte es la estructura que protege los componentes del sistema chancado. De tal modo que, la faja transportadora al llevar las piedras hacia la trituradora, estas piedras caen en una tolva de alimentación. Después, este lo desvía las piedras hacia un costado donde entran hacia la cámara de chancado, luego la trituradora chanca las piedras, pasa por la carcasa inferior y caen hacia una faja que lo retorno hacia la zaranda y clasifique las piedras. A continuación, se mencionan las componentes que forman parte del sistema.

Item	Partes
1	Tolva de alimentación
2	Carcasa superior (anillo de ajuste y tapa roscada)
3	Carcasa Inferior

Tabla 3.3 Partes del sistema de soporte.
Fuente: Elaboración propia basado en [6].

- Sistema de lubricación

El sistema de lubricación cumple el rol de transportar aceite a las partes mecánicas de la chancadora cónica, con el fin de lubricar y evitar que los elementos entren en rozamiento y generen desgaste entre sí, ya que el sistema forma películas de aceite entre las partes que están en contacto. Los componentes que forman parte del sistema es el tanque de aceite con el nivelador, este tanque almacena el aceite que sirve para lubricar las piezas como las bocinas, eje principal entre otros. También, está el filtro que realiza la función de separar los contaminantes del aceite de lubricación. Asimismo, están las bombas hidráulicas con sus respectivos motores eléctricos, que suministran aceite a través de tuberías y mantienen lubricado a la máquina. Por otro lado, el aceite para que trabaje de manera efectiva en sus operaciones utiliza un calentador. Por último, se tiene el manómetro para revisar la presión del aceite y el termómetro para que registre un rango adecuado de la temperatura del aceite. A continuación, estas partes se muestran en la tabla siguiente.

Item	Partes
1	Tanque de aceite con nivelador
2	Filtro de aceite
3	2 bombas hidráulicas
4	2 motores eléctricos
5	Calentador
6	Manómetro
7	Termómetro
8	Tuberías y válvulas para la línea del aceite

Tabla 3.4. Partes del sistema de lubricación.
Fuente: Elaboración propia basado en [6].

- Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento sirve para refrigerar el aceite por medio del intercambiador de calor, ya que sin este sistema el aceite perdería sus propiedades. Por lo que, el aceite al lubricar los componentes de la chancadora, este retorna al tanque de aceite. Luego, el aceite pasa por un intercambiador de calor, por el cual este componente ayuda a disipar el calor

gracias a que se utiliza agua. Estos componentes que conforman parte del sistema de enfriamiento son el tanque de agua, motobomba de agua, intercambiador de calor, tuberías y válvulas. Estos componentes se aprecian en la tabla 3.5.

Item	Partes
1	Tanque de agua con nivelador
2	Motobomba de agua
3	Intercambiador de calor
4	Tuberías y válvulas para la línea de agua

Tabla 3.5. Partes del sistema de enfriamiento.
Fuente: Elaboración propia basado en [6].

3.1. Análisis del FMEA

Una vez que se define los tipos de sistemas que comprende la chancadora cónica, asimismo se procede con la aplicación de las herramientas expuestas en la metodología de investigación. Por el cual, en esta sección se empieza con el desarrollo del FMEA. Esta herramienta al ser una técnica útil, para identificar las fallas que afectan a la máquina, se empieza por definir la función estándar que cumple la chancadora cónica. Por ello, según el contexto operacional donde se desarrolla la máquina, es un FMEA para procesos, es decir que el equipo opera en una planta de producción de agregados de una línea de producción que pertenece al sector de construcción civil. Las piedras trituradas son extraídas de la cantera del Rio Chillón, donde producen la piedra de ½”. Por tanto, conociendo el contexto de trabajo, la función que hace la chancadora cónica es triturar piedras a un tamaño de ½”.

Luego, se describe la falla funcional, el cual indica la incapacidad de la máquina al no cumplir el propósito deseado por la empresa. Por ello, cuando falla el equipo, este se detiene, el cual perjudica a la producción, dado que por cada hora que no produce piedras se pierde 333.16 dólares, siendo un inconveniente que cuando se empieza a identificar la falla e intervenir, pasan horas de más, llegando a una pérdida mayor en costos de producción. Entonces, siguiendo con el FMEA, la falla funcional se describe que el activo físico no tritura de piedras.

Después, se procede con definir los modos de fallas que hacen que la falla funcional se torne realidad. Estos eventos están descritos a nivel de componente, ya que de acuerdo al historial de fallas, estos lo definen a los problemas presentes de la máquina por falla del elemento. Por tanto, se identificaron nueve modos de fallas, además se da una descripción de lo que pasa cuando se presenta un modo de falla, esto es conocido como efecto de falla. El primer evento son los forros que presentan rotura, estos elementos forman parte de los componentes del sistema de chancado. Estos componentes son los primeros que tienen contacto con las piedras recibidas por la faja transportadora.

Las piedras al tener contacto con los forros tanto fijo como el móvil dentro de la cámara de chancado, estos empiezan por desgastarse, el cual sino se atiende a tiempo pueden generar rotura. Por otro lado, las acciones correctivas que traen cuando se produce la rotura es cambiarlos, por el cual se tiene que realizar el pedido al proveedor. La segunda forma que falla el activo físico es cuando la bocina recta, también conocida como bocina cilíndrica, empieza a desgastarse, ya que el cuerpo excéntrico al estar en contacto con la pared interna de la bocina, este empieza a desgastarse, el cual genera holgura, y es por ello que ocasiona que el equipo no tenga estabilidad para triturar. Otro modo de falla que se presenta es cuando falla el cabezal cónico, dado que este al presentar rajadura alrededor del componente, no permite que la chancadora pueda triturar y esto provoque que la producción se paralice.

El cojinete semiesférico, conocido como plato cónico o socket liner, falla por presencia de grietas, ya que ocasiona que se produzca fuga de aceite, además esto se debe al ingreso de polvo, el cual se contamina con el aceite y dañan a las demás piezas. Por otro lado, el evento de falla que se da en el equipo es por la presencia de fisuras en la pared interna, ya que esto genera fuga de aceite, ocasionando que la bocina se degaste por el rozamiento que tiene con el eje principal. El siguiente modo de falla que existe es cuando el diente del piñón se rompe, el cual no permite que el equipo logre triturar piedras, debido a que no transmite la potencia y esto lleve a que se detenga la máquina.

Para el caso del sistema de lubricación, la máquina puede fallar cuando el filtro está obstruido, ya que este no permite el pase del flujo de aceite. Por ello, los componentes al no recibir lubricación por parte del sistema de lubricación, provoca que se calienten por la

fricción generada entre estos componentes. Otro problema presente en el sistema de lubricación es cuando el aceite se calienta, esto se debe a cuando el líquido en condiciones de trabajo requiere cambio, y al no ser atendido a tiempo, conlleva a que pierda viscosidad y no permite lubricar de manera adecuada los componentes y esto ocasiona que los componentes, provoquen rozamiento y puedan dañarse. Por último, se tiene la presencia de fuga de aceite por las tuberías, puesto que las tuberías al formarse sarro en las paredes internas no permiten el paso del aceite, el cual conlleva a que se rompa la tubería por presión interna, el cual esto haga que el equipo se paralice. A continuación, en la tabla 3.6 se muestra el formato del FMEA desarrollado.

Función	Falla Funcional	Modos de Falla	Efectos de Falla
Triturar piedras a un tamaño de ½’’	No tritura nada de piedras	Forros rotos	Provoca que el equipo no pueda triturar las piedras deseadas. No obstante, el equipo se detiene de manera inmediata al producirse un atoramiento en la cámara de chancado.
		Bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared	Lo que ocasiona es que se genere un juego entre el cuerpo excéntrico y esta bocina, el cual genera inestabilidad en el eje principal, haciendo que la máquina vibre y se detenga.
		Cabezal cónico con rajadura	Se paraliza la máquina, puesto que no permite la producción de las piedras.
		Cojinete semiesférico con grietas	Esto provoca que el polvo y el aceite se contamine provocando que ingrese el aceite contaminado a las partes de chancadora como eje principal, bocinas y con esto ocasiona desgaste excesivo en los componentes.
		Bocina cónica con fisuras en la pared interna	Se presencia fuga de aceite. No obstante, provoca que eje principal y la bocina se recalienten. De tal manera que, estos se dañen. Por tanto, se paralice el equipo
		Diente del Piñón cónico recto roto	La rotura en los dientes no permite transmitir la potencia adecuada, lo cual genera deficiencia en la chancadora, además ocasiona que durante la operación se rompa el piñón y se detenga el equipo.
		Calentamiento del aceite	El aceite al incrementar la temperatura empieza perder viscosidad y no permite lubricar bien los componentes, dando así a que los componentes generen rozamiento, lo cual conlleva al deterioro.
		Filtro obstruido	No permite el paso del flujo del aceite, ocasionando que los componentes trabajen, el cual generan fricción y a su vez esto hace que se pare el equipo.
		Tubería de lubricación con fuga de aceite	Ocasiona un derrame en el aceite, ya que al ver esto, los componentes de la máquina se ven afectados al no estar lubricados y esto haga que el equipo se paralice.

Tabla 3.6. FMEA de la Chancadora cónica.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diagrama de Pareto de costos

En esta sección se elabora el diagrama de Pareto, con el propósito de jerarquizar los modos de fallas que representan alto costo en la planta de agregados, siendo estas fallas determinadas y descritas en la tabla 3.6, asimismo para la elaboración del cuadro de Pareto, cada modo de falla será puesto con el sistema de la chancadora que le corresponde, el cual han sido identificados al inicio de este capítulo. Por el cual, como primer paso siguiendo el formato de la tabla 2.4, se tiene que calcular la frecuencia de fallas con la ecuación 2.1, para esto en la investigación se recopila data de cinco años del periodo 2015 al 2019. Con la data del historial de fallas, se toma la cantidad de eventos para cada modo de falla por año, luego se divide la cantidad de fallas presentes de cada modo de falla entre los cinco años que representa el periodo de investigación. Esto se aprecia en la siguiente tabla.

Sistemas	Modos de falla	2015	2016	2017	2018	2019	F _r anual
Sistema de Chancado	Forros con rotura	2	2	2	2	1	1.8 fallas
Sistema de Transmisión	Diente de Piñón cónico roto	0	0	0	2	0	0.4 fallas
Sistema de Lubricación	Calentamiento del aceite	0	0	0	0	1	0.2 fallas
Sistema de Chancado	Bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared	1	1	1	2	0	1.0 fallas
Sistema de Chancado	Bocina cónica con fisuras en la pared interna	1	1	0	1	1	0.8 fallas
Sistema de Chancado	Cabezal cónico con rajadura	0	0	1	1	1	0.6 fallas
Sistema de Chancado	Cojinete semiesférico con grietas	1	1	1	1	1	1.0 fallas
Sistema de Lubricación	Filtro obstruido	0	1	1	1	0	0.6 fallas
Sistema de Lubricación	Tubería de lubricación con fuga de aceite	1	0	0	0	0	0.2 fallas

Tabla 3.7. Cuadro de frecuencias por año.
Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 3.7, se tiene que el periodo de los cinco años, el sistema de chancado presentó 26 fallas del cual se tuvo siete fallas en el 2018. De tal manera que, los componentes que afectaron al sistema de chancado son cinco, los cuales son los forros, bocina cilíndrica,

bocina cónica, cabezal cónico y cojinete semiesférico, puesto que el cojinete semiesférico y los forros presentaban fallas anuales de manera consecutiva con respecto a los otros componentes. Por otro lado, en el sistema de lubricación se registró cinco fallas. Estos componentes corresponden al filtro de aceite, tubería de lubricación y el aceite mismo, es por ello que el filtro a comparación de los otros dos elementos tuvo frecuencia de manera continua durante los cinco años. Por último, en el sistema transmisión se obtuvo dos eventos en un mismo año, el cual el piñón cónico fallaba por rotura de dientes.

El segundo paso es calcular el tiempo promedio de reparación, el cual se utiliza la ecuación 2.2, para esto se suma la cantidad de horas de reparación de cada modo de falla por año, luego se divide el tiempo total de reparación durante los cinco años entre la cantidad de eventos en ese periodo. Esto se aprecia en la siguiente tabla.

Sistemas	Modos de falla	2015	2016	2017	2018	2019	MTTR
Sistema de Chancado	Forros con rotura	66.44	41.00	130.00	209.00	42.42	54.32 horas
Sistema de Transmisión	Diente de Piñón cónico roto	0.00	0.00	0.00	197.16	0.00	98.58 horas
Sistema de Lubricación	Calentamiento del aceite	0.00	0.00	0.00	0.00	7.58	7.58 horas
Sistema de Chancado	Bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared	10.12	13.50	8.00	188.00	0.00	43.92 horas
Sistema de Chancado	Bocina cónica con fisuras en la pared interna	15.33	13.50	0.00	127.00	4.92	40.19 horas
Sistema de Chancado	Cabezal cónico con rajadura	0.00	0.00	8.00	61.00	98.75	55.92 horas
Sistema de Chancado	Cojinete semiesférico con grietas	23.95	23.50	8.00	127.00	98.75	56.24 horas
Sistema de Lubricación	Filtro obstruido	0.00	7.00	8.00	29.00	0.00	14.67 horas
Sistema de Lubricación	Tubería de lubricación con fuga de aceite	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50 horas

Tabla 3.8. Cuadro del tiempo total de reparación por año.

Fuente: Elaboración propia.

Para la tabla 3.8, se tiene que entre el tiempo de reparación del cabezal cónico, forros y cojinete semiesférico presentan un promedio de reparación de 55.49 horas, por el cual esto equivale a una pérdida de 18,487.05 USD por no producir piedra chancada en caso se

presenten fallas esos tres componentes. No obstante, en el piñón cónico se tuvo 98.58 horas sin producir, debido a que el equipo estaba detenido. Sin embargo, las bocinas tanto cilíndrica y cónica, tienen un tiempo promedio de paralización de 42.06 horas. Por otro lado, la cantidad de técnicos que intervienen dichas fallas, como en el caso del sistema de chancado son tres personas que se encargan de reparar los forros, tanto para los demás componentes descritos en la tabla 3.8. Asimismo, en el sistema de lubricación, cuando se presentan las fallas en caso se da por fuga en las tuberías, calentamiento de aceite o por la obstrucción de filtro son dos técnicos. Para el caso que se presente la falla en el sistema de transmisión, cuando se rompe un diente en el piñón, este es intervenido por tres técnicos.

El siguiente paso consiste en calcular el costo de la mano de obra, en la ecuación 2.4, para esto los técnicos reciben un ingreso de 1600 soles mensual, además las horas laborales por cada mes es de un promedio de 195.42 horas, es por ello que el costo de hora-hombre en dólares es de 2.07 \$/h, tomando como equivalencia 3.96 dólares por sol. Después, el costo de la mano de obra para cada modo de falla corresponde el producto de la cantidad de técnicos que intervienen para cada actividad con el costo de hora-hombre y el MTTR mostrado en la tabla 3.8. Por tanto, los costos de mano de obra superiores a 300 dólares en el sistema de chancado corresponden a los forros con un costo de 336.92 dólares, el cabezal cónico con 346.84 dólares y el cojinete semiesférico de un costo total de 348.85 dólares, asimismo en el sistema de transmisión se obtiene un costo de 611.46 dólares por falla para el piñón cónico.

Cada intervención que realice el equipo de mantenedores a cada modo de falla, se requiere de repuestos para cambiar en caso se requiera repararlo, es por ello que el costo de repuestos del sistema de chancado para los modos de fallas expuestos en la tabla 3.8 es de un promedio de 2,038.2 USD para cada modo de falla. Por otro lado, el costo total de repuestos del sistema de lubricación de los tres modos de fallas es de 2,220.67 USD y para el piñón cónico representa un costo de 900 dólares. Por tanto, teniendo el costo de intervención correctiva, se calcula con la ecuación 2.5, el cual los costos de reparación para los forros, cojinete y las bocinas corresponden al 64% de los costos de mantenimiento.

El siguiente paso consiste en calcular el costo al no producir cuando la máquina se detiene por cualquier modo de falla. Es por ello, que se utiliza la ecuación 2.6, el cual se tiene en cuenta que cuando falla el equipo se detiene y la planta deja de producir, para esto el factor

de pérdida de producción es de 100%. Asimismo, la producción de piedra chancada es de 37.69 m³/h y el precio de las piedras por m³ es de 8.84 dólares, del cual indica que por cada hora que no produce es de 333.16 dólares. Por último, teniendo conocimiento del tiempo promedio de reparación en la tabla 3.8, el costo de pérdida no producida es el producto del tiempo de reparación y el costo de la piedra por cada hora no producida. Luego, teniendo el costo por pérdida de producción y el costo de intervención, con la ecuación 2.3 se obtiene el costo de la falla por cada evento. Por lo tanto, como el Pareto se analiza de manera anual, se usa la ecuación 2.7 para obtener el costo de total, el cual este involucra el costo de falla y la frecuencia. Este procedimiento descrito se desarrolla en una tabla, el cual se muestra de la siguiente manera.

Sistema	Modo de Falla	F _f anual	MTTR (hrs.)	C _i			C _p		C _f	C _t anual
				N# de técnicos	C _{MO}	C _{rep}	Pérdida de producción	F _p (%)		
Sistema de chancado	Forros con rotura	1.8	54.32 h	3	336.92 \$	2,501.00 \$	18,096.50 \$	100%	20,934.42 \$	37,681.96 \$
Sistema de transmisión	Diente de Piñon cónico roto	0.4	98.58 h	3	611.46 \$	900.00 \$	32,842.74 \$	100%	34,354.21 \$	13,741.68 \$
Sistema de lubricación	Calentamiento del aceite	0.2	7.58 h	2	31.34 \$	1,061.45 \$	2,525.35 \$	100%	3,618.15 \$	723.63 \$
Sistema de chancado	Bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared	1.0	43.92 h	3	272.44 \$	2,650.00 \$	14,633.42 \$	100%	17,555.87 \$	17,555.87 \$
Sistema de chancado	Bocina cónica con fisuras en la pared interna	0.8	40.19 h	3	249.27 \$	1,900.00 \$	13,388.71 \$	100%	15,537.98 \$	12,430.39 \$
Sistema de chancado	Cabezal cónico con rajadura	0.6	55.92 h	3	346.84 \$	2,500.00 \$	18,629.19 \$	100%	21,476.03 \$	12,885.62 \$
Sistema de chancado	Cojinete semi-esférico con grietas	1.0	56.24 h	3	348.85 \$	1,990.00 \$	18,737.08 \$	100%	21,075.92 \$	21,075.92 \$
Sistema de lubricación	Filtro obstruido	0.6	14.67 h	2	60.65 \$	97.77 \$	4,886.35 \$	100%	5,044.76 \$	3,026.86 \$
Sistema de lubricación	Tuberna de lubricación con fuga de aceite	0.2	3.50 h	2	14.47 \$	1,061.45 \$	1,166.06 \$	100%	2,241.98 \$	448.40 \$

Tabla 3.9. Cuadro del Pareto de costos.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se elabore la tabla 3.9, se procede a jerarquizar los modos de fallas, el cual como propósito de esta herramienta es identificar los críticos, por el cual se ordena los modos de fallas iniciando con el costo total alto hacia el menor costo. Luego, para determinar el costo relativo porcentual, es decir del total que es de 119,569.76 USD, cuanto de esa cantidad representa cada costo, lo que se hace es dividir entre el costo total de cada modo de falla entre el total de todas las fallas. Por último, para encontrar el 80% de los costos totales,

se realiza un acumulado porcentual, el cual se suma todos los porcentajes empezando del costo mayor hacia el menor. Esto se aprecia en la siguiente tabla.

Sistema	Modo de falla	Costo anual	Relativo	Acumulado
Sistema de chancado	Forros con rotura	\$ 37,681.96	31.5%	31.5%
Sistema de chancado	Cojinete semi-esférico con grietas	\$ 21,075.92	17.6%	49.1%
Sistema de chancado	Bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared	\$ 17,555.87	14.7%	63.8%
Sistema de transmisión	Diente de Piñón cónico roto	\$ 13,741.49	11.5%	75.3%
Sistema de chancado	Cabezal cónico con rajadura	\$ 12,885.46	10.8%	86.1%
Sistema de chancado	Bocina cónica con fisuras en la pared interna	\$ 12,430.23	10.4%	96.5%
Sistema de lubricación	Filtro obstruido	\$ 3,026.82	2.5%	99.0%
Sistema de lubricación	Calentamiento del aceite	\$ 723.62	0.6%	99.6%
Sistema de lubricación	Tubería de lubricación con fuga de aceite	\$ 448.39	0.4%	100.0%
Total		\$ 119,569.76	100.00%	

Tabla 3.10. Modos de fallas críticos.

Fuente: Elaboración propia.

Según se muestra en la elaboración de la tabla, el 80% de ellas contienen los siguientes modos de fallas, estos son los forros con rotura, el cojinete semiesférico con grietas, la bocina recta con desgaste en las paredes internas y por último la rotura del diente del piñón cónico, siendo estos un costo anual generado de 90,055.25 USD. Asimismo, se elabora el gráfico de Pareto usando el costo anual y el porcentaje acumulado, el cual se muestra en la imagen.

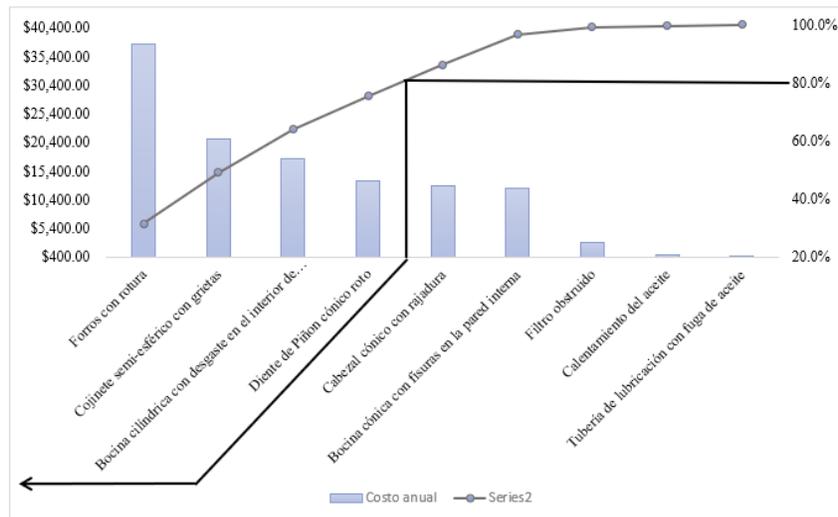


Figura 3.1. Gráfico de Pareto de los modos de fallas en la chancadora.

Fuente: Elaboración propia.

En suma, de los cuatro modos de fallas críticos que se identificaron con el diagrama de Pareto, para desarrollar la siguiente metodología que es el Árbol lógico, se va a determinar las causas raíces de un modo de falla, el cual para a disposición de la información proporcionada por la empresa, se va a analizar el cojinete semiesférico.

3.3. Árbol Lógico

En esta sección, para determinar las causas raíces, se utiliza la herramienta del ACR. Esta herramienta llamada Árbol Lógico, consiste en seguir una estructura ordenada, el cual es la caja principal, la hipótesis, la causa raíz física, humana y latente. De tal manera que, como primer paso es establecer la caja principal, por el cual contiene el evento de falla y el modo de falla crítico identificado por el diagrama de Pareto. Este evento de falla, es la falla funcional que incapacita que el equipo pueda cumplir con el propósito deseado por el cual fue adquirido por la planta de agregados. Por ello, gracias a la herramienta FMEA el evento de falla se define de la siguiente manera, la chancadora cónica no tritura piedras. Teniendo conocimiento de esto, después se menciona el modo de falla crítico. Este es el cojinete semiesférico con grietas. La estructura del árbol empieza como se muestra en la siguiente imagen.

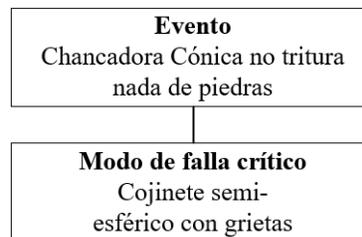


Figura 3.2. Caja principal para la chancadora cónica.
Fuente: Elaboración propia.

Luego que se tiene definido la caja principal, el siguiente paso es establecer la hipótesis, lo cual responde del porque ocurre ese modo de falla. La hipótesis es una suposición, el cual se tiene que verificar, es decir debe validarse para no tomarse como un simple análisis. Esta verificación se puede extraer de la recolección del historial de fallas. Por el cual, la validación para esta investigación se realiza con imágenes proporcionados por

la empresa. Por tanto, la hipótesis que se plantea para el modo de falla crítico es que el cojinete semiesférico se daña por grietas. Esto se debe al ingreso del polvo al equipo, ya que, al mezclarse con el aceite, forma barro, el cual genera desgaste. Además, el desgaste perjudica al cojinete, haciendo que se presente un juego entre la bola y este componente, por ello genera grietas al momento que la bola empieza golpeando al cojinete.

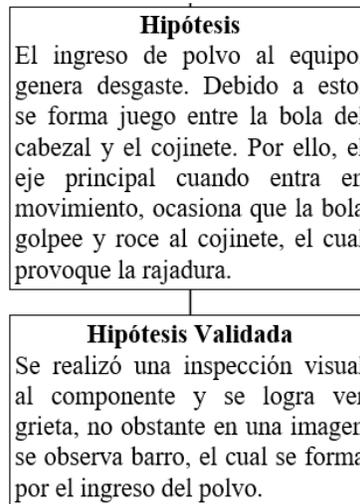


Figura 3.3. Hipótesis del modo de falla.
Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 3.3, una vez que se plantea la hipótesis, se procede a verificarlo, es por ello que la hipótesis validada explica que al momento que los técnicos desmontan la chancadora cónica, ellos realizan una inspección sensorial, logrando ver que el componente estaba con grietas, asimismo se había formado lodo por el ingreso del polvo.



Figura 3.4. Hipótesis validada.
Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, en la figura 3.4 se aprecia la escena de la falla. Primero, se observa la figura 3.4a, el cual señala la grieta en el cojinete semiesférico y la figura 3.4b indica el barro presenciado en el cojinete. Por lo tanto, teniendo esta información, se inicia la determinación de las causas raíces, empezando la causa física, el cual explica del porque se da el origen de la falla, además la evidencia es a nivel físico de la máquina. Para el trabajo de investigación, se pregunta de cómo puede haber provocado que el polvo ingrese, por el cual la causa física es debido a que hubo un desprendimiento del anillo de sellado, ya que la bola al momento de rotar de manera excéntrica, hace que el anillo de sellado, también conocido como guardapolvo, se deforme, por ende permitiendo que el polvo ingrese y recircule con el aceite, dañando el cojinete semiesférico. Esto se aprecia en la figura 3.4b.

Después, que se determina la causa raíz física, se procede a buscar la causa humana. Esta causa explica a nivel técnico, el cual proviene de errores humanos llevado a una inadecuada ejecución de las tareas de mantenimiento. Por tanto, la causa raíz humana se debe a que no se realiza una inspección del estado del anillo de sellado. Por último, la causa raíz latente, se refiere a una mala gestión administrativa, el cual proviene de una inadecuada toma de decisiones y la falta de documentación, organización para priorizar las actividades de mantenimiento. Por ello, como parte final del árbol lógico, la causa raíz latente se debe a que no se cuenta con un plan de mantenimiento para la revisión del anillo de sellado.

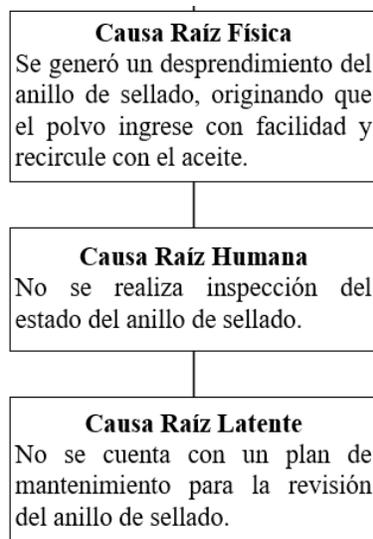


Figura 3.5. Causa raíz física, humana y latente.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Solución

En esta sección se propone una solución que sirva para eliminar el modo de falla crítico, el cual es la grieta presentada en el cojinete semiesférico, ya que perjudica a la operación del activo físico. Luego, se realiza una evaluación de rentabilidad de la solución, es por ello que se analiza dos alternativas de esa solución, para esto se utiliza el indicador retorno de inversión (ROI), el cual indica que si una de las alternativas es mayor a 1, será una solución que trae beneficios a la empresa. Por esta razón, la solución parte de la causa raíz latente, el cual ha sido determinado con el Árbol lógico.

La solución propuesta es realizar una inspección periódica del anillo de sellado. Luego que se plantea la solución, se realiza el costo-beneficio utilizando el ROI, para esto se tiene de conocimiento el costo anual de 21,075.92 USD obtenido del diagrama de Pareto. De tal manera que se muestra el resumen del cuadro de las variables utilizadas para obtener el costo anual.

F_f anual	1 fallas/año
# Técnicos	3
C_{H-H}	2.07 \$/hora
C_{M.O.}	348.85 \$
C_{rep}	1,990 \$
C_i anual	2,338.85 \$
MTTR	56.24 hrs.
I_p	333.16 \$/hora
C_p	18,737.08 \$
C_p anual	18,737.08 \$
C_t anual	21,075.93 \$

Tabla 3.11. Costo falla anual del cojinete semiesférico.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.11, este costo anual requiere primero del costo de mano de obra, el cual tiene un valor de 348.85 dólares, y depende del costo por hora hombre, el tiempo de reparación y la cantidad de técnicos que ejecutan la obra, asimismo se requiere del costo del repuesto que es de 1,990 USD. Con la frecuencia, el costo de mano de obra y el costo del repuesto, se obtiene el costo de intervención anual de 2,338.85 USD. Por otro lado, para el

cálculo del costo de pérdida de producción, se requiere del costo de producción por hora, el cual es de 333.16 dólares, además teniendo como dato el MTTR y la frecuencia de fallas, se obtiene el costo por pérdida de producción, el cual tiene un monto de 18,737.08 USD. Por último, el costo total es la suma del costo de pérdida de producción y el costo de intervención obteniendo un total de 21,075.92 USD.

Segundo paso, se realiza una inversión de la solución, para esto se dispone de dos proveedores, el cual para el costo del material, el primero es de una empresa llamada Falmetal S.A.C., lo cual el anillo de sellado tiene un costo de 450 dólares, asimismo el otro proveedor es de otra empresa llamada Delta Industrial S.A. que el costo del repuesto es de 400 dólares. Con estos datos, la primera alternativa de solución se utiliza el costo de repuesto de la empresa Falmetal S.A.C. En la siguiente tabla se muestra el cuadro de resumen de la inversión de la alternativa 1, para esto los datos como el C_{H-H} , # Técnicos y el impacto en la producción por hora se mantienen iguales desde la tabla 3.11.

C_{H-H}	2.07 \$/hora
# personal en la reunión	12
# Reunión FMEA	2
# Reunión Árbol Lógico	3
Tiempo para cada reunión	1 hrs./reunión
Tiempo total de la reunión	5 hrs.
$C_{M.O.}$ reunión	124.2 \$
F_i anual	4 mant./año
# Técnicos	3
C_{rep}	450 \$/mant.
M_P	6 hrs.
$C_{M.O.}$ Mant.	37.26 \$/mant.
C_i anual	1,949.04 \$
I_p	333.16 \$/hora
C_p anual	9,661.64 \$
I_s anual	11,734.88 \$

Tabla 3.12. Inversión para la solución de alternativa 1.
Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 3.12, la inversión requiere primero formar un equipo de trabajo para analizar las fallas, el cual se forma reuniones para elaborar el FMEA y el Árbol Lógico. Para el desarrollo del FMEA, se utiliza dos sesiones de una hora y para la determinación de las causas raíces tres sesiones de una hora, asimismo para las reuniones van a estar los doce colaboradores, esto se decide de una forma que todos puedan participar y compartir sus experiencias. Por ello, el realizar estas cinco reuniones y teniendo de conocimiento el costo de hora-hombre de 2.07 dólares por hora, se tiene un costo de mano de obra de 124.2 dólares.

Por otro lado, el costo para el mantenimiento preventivo requiere del costo de mano de obra con un valor de 37.26 dólares, el cual depende del costo por hora hombre, el tiempo de reparación y la cantidad de técnicos que intervienen en la obra. Para el tiempo de reparación es de seis horas, ya que a comparación de la tabla 3.11, se dispondrá de un stock, con el fin de tener en ese momento el repuesto, asimismo se requiere del costo del repuesto del anillo de sellado que es de 450 dólares. Con la frecuencia de intervención se propone realizar de manera trimestral, es decir un cambio de repuesto cada cuatro meses. Es por esto que, con la frecuencia, el costo de mano de obra y el costo del repuesto se obtiene el costo de intervención anual de 1,949.04 USD. Además, para el cálculo del costo de pérdida de producción, se requiere del costo de producción por hora, el M_p y la frecuencia de intervención, el cual tiene un monto de 9,661.64 USD. Por último, el costo de total es la suma del costo de las reuniones, pérdida de producción y el costo de intervención obteniendo un total de inversión 11,734.88 USD.

F_i anual	4 mant./año
# Técnicos	3
C_{H-H}	2.07 \$/hora
C_{M.O.}	37.26 \$
C_{rep}	450 \$
C_i anual	1,949.04 \$
M_p	6 hrs.
I_p	333.16 \$/hora
C_p	1,998.96 \$
C_p anual	7,995.84 \$
C_s anual	9,944.88 \$

Tabla 3.13. Costo de la solución de la solución de la alternativa 1.
Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, una vez que se tiene la inversión, se procede a calcular el costo que implica la alternativa de solución. Por el cual, en la tabla 3.13, el costo de la alternativa, requiere primero del costo de mano de obra de un valor de 37.26 dólares, el cual depende del costo por hora hombre, el tiempo de reparación y la cantidad de técnicos, asimismo se requiere del costo del repuesto que es de 450 dólares. Con la frecuencia, costo de mano de obra y el costo del repuesto, se obtiene el costo de intervención anual de 1,949.04 USD. Por otro lado, para el cálculo del costo de pérdida de producción, se requiere del costo de producción por hora, el cual es de 333.16 dólares, además teniendo como dato el M_p y la frecuencia de cuatro meses para la inspección y cambio del repuesto, se obtiene el costo por pérdida de producción, el cual tiene un monto de 7,995.84 USD. Por último, el costo total es la suma del costo de pérdida de producción y el costo de intervención obteniendo un total de 9,944.88 USD.

C_{H-H}	2.07 \$/hora
# personal en la reunión	12
# Reunión FMEA	2
# Reunión Árbol Lógico	3
Tiempo de reunión	1 hrs./reunión
Tiempo total de la reunión	5 hrs.
C_{M.O. Reunión}	124.2 \$
F_i anual	3 mant./año
# Técnicos	3
C_{rep}	400 \$/mant.
M_P	6.00 hrs.
C_{M.O. Mant.}	37.26 \$/mant.
C_i anual	1,311.78 \$
I_p	333.16 \$/hora
C_p anual	7,662.68 \$
I_s anual	9,135.92 \$

Tabla 3.14. Inversión para la solución de alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 3.14, la inversión para la segunda alternativa, el costo de reuniones mostrado en la tabla 3.12 es de 124.2 dólares. Por otro lado, el costo para el mantenimiento preventivo requiere del costo de mano de obra con un valor de 37.26 dólares, el cual depende del costo por hora hombre, el tiempo de reparación y la cantidad de técnicos que ejecutan la obra. Para el tiempo de reparación consta de seis horas, ya que se dispondrá de un stock de repuesto, asimismo se requiere del costo de repuesto del anillo de sellado que es de 400 dólares. Con la frecuencia de intervención se propone realizar de manera cuatrimestral, es decir que se realiza un cambio de repuesto cada tres meses. Es por esto que, con la frecuencia, el costo de mano de obra y el costo del repuesto, se obtiene el costo de intervención anual de 1,311.78 USD. Además, para el cálculo del costo de pérdida de producción, se requiere del costo de producción por hora, el M_p y la frecuencia de intervención, el cual tiene un monto de 7,662.68 USD. Por último, el costo total es la suma del costo de las reuniones, pérdida de producción y el costo de intervención, obteniendo un total de inversión 9,135.92 USD.

F_i anual	3 mant./año
# Técnicos	3
C_{H-H}	2.07 \$/hora
C_{M.O.}	37.26 \$
C_{rep}	400 \$
C_i anual	1,311.78 \$
M_p	6 hrs.
I_p	333.16 \$/hora
C_p	1,998.96 \$
C_p anual	5,996.88 \$
C_s anual	7,308.66 \$

Tabla 3.15. Costo de la solución de la solución de la alternativa 2.

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, una vez que se tiene la inversión, se procede a calcular el costo que implica la alternativa de solución. Por el cual, en la tabla 3.15, el costo de la alternativa, primero requiere el costo de mano de obra de 37.26 dólares, el cual depende del costo por hora hombre, el tiempo de reparación y la cantidad de técnicos que ejecutan la obra, asimismo el costo de repuesto es de 400 dólares. Con la frecuencia, costo de mano de obra y el costo del repuesto, se obtiene el costo de intervención anual de 1,311.78 USD. Por otro lado, para

el cálculo del costo de pérdida de producción, se requiere del costo de producción por hora, además teniendo como dato el M_p , la frecuencia de cada tres meses para la inspección y cambio del repuesto, se obtiene el costo por pérdida de producción, el cual tiene un monto de 5,996.88 USD. Por último, el costo total es la suma del costo de pérdida de producción y el costo de intervención obteniendo un total de 7,308.66 USD. En suma, teniendo los costos de solución de la tabla 3.13 y 3.15, asimismo la inversión de la tabla 3.12 y 3.13, se elabora un cuadro resumido, teniendo como dato de partida el costo anual.

Solución	C_t anual	C_s anual	Beneficio	Inversión	ROI
Alternativa 1	21,075.93 \$	9,944.88 \$	11,131.05 \$	11,734.88 \$	95%
Alternativa 2	21,075.93 \$	7,308.66 \$	13,767.27 \$	9,135.92 \$	151%

Tabla 3.16. Resumen del ROI.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.16, para calcular el beneficio se utiliza la ecuación 2.8, el cual para la primera alternativa se tiene un beneficio de 11,131.05 USD. De tal manera que, el beneficio para la segunda alternativa es de 9,135.92 USD. Es por ello que, para calcular el ROI se utiliza la ecuación 1.7, el cual se obtiene un ROI de 95% para la primera alternativa, ya que la inversión es mayor que el ahorro, dado que indica que esta solución no es rentable. No obstante, en la segunda alternativa se tiene un ROI de 151%, el cual indica que es una solución rentable para la empresa, es por ello que se selecciona la segunda alternativa.

CONCLUSIONES

1. Se identificó nueve modos de fallas utilizando la herramienta del Análisis de los modos y efectos de falla (FMEA), estos modos de fallas que perjudican a la chancadora cónica, son los forros con rotura, la bocina cilíndrica con desgaste en el interior de la pared, el cabezal cónico con rajadura, el cojinete semiesférico con grietas, la bocina cónica con fisuras en la pared interna, diente de piñón cónico con rotura, calentamiento del aceite, filtro obstruido y la tubería de lubricación con fuga de aceite.
2. Se jerarquizó los modos de fallas usando la herramienta cuantitativa, diagrama de Pareto, el cual se logró encontrar cuatro modos de fallas críticos, los cuales representan el 80% de los costos de falla anual. Estos modos de fallas son los forros con rotura, el cojinete semiesférico con grietas, la bocina recta con desgaste en la pared interna y el diente del piñón cónico roto, siendo estos un costo anual de 90,055.25 USD.
3. Se determinó las causas raíces física, humana y latente del modo de falla crítico, el cual este modo de falla se seleccionó de los cuatro eventos encontrados por el diagrama de Pareto. Con la elaboración de la herramienta del Árbol Lógico, se permitió establecer hipótesis y poder verificarlo para encontrar las causas raíces. Por ello, en la causa raíz latente no se cuenta con un programa para la inspección del anillo de sellado. Por tanto, la propuesta de solución es que se debe establecer una inspección del estado del anillo de sellado.
4. Se realizó una evaluación económica de la propuesta de la solución planteada con el indicador ROI, por el cual se optó por dos proveedores de diferentes empresas para el repuesto de anillo de sellado, los cuales estas empresas son Falmetal S.A.C. y Delta Industrial S.A. Por tanto, el ROI de la primera alternativa fue de 95%, y la segunda

alternativa se obtuvo 151%. Es por ello que la solución rentable es de 151%, el cual corresponde al proveedor Delta Industrial S.A.

5. Se analizó el modo de falla crítico de la chancadora cónica, el cual se pudo determinar las causas raíces. Después, se realizó el costo-beneficio de la propuesta de solución aplicando ROI y se pudo concluir que la alternativa que mejora la rentabilidad en la planta de agregados es la segunda, ya que se logra recuperar la inversión en ocho meses, asimismo la intervención periódica para cambiar el repuesto se dará cada tres meses, teniendo como inversión 9,135.92 \$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. García, “Tendencias actuales en Mantenimiento Industrial”, *Reportero Industrial*, pp. 1-4, abril 2014. [Online]. Disponible: <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Tendencias-actuales-en-mantenimiento-industrial+97221> [Último acceso: 3 abril 2020].
- [2] “5 Tendencias actuales en el Mantenimiento Industrial”, *Ingeniería*. [Online]. Disponible: <https://www.ingenieria.es/tendencias-actuales-en-el-mantenimiento-industrial/> [Último acceso: 4 abril 2021].
- [3] *Reglamento Nacional de Edificaciones*, Norma Peruana, 2021.
- [4] *Building Code Requirements for Structural Concrete*, ACI 318-19, 2019.
- [5] *Agregados para Concreto*, Unicon.
- [6] *Cone Crusher instruction manual model PYB – 900*, Hangzhou Truemax Machinery & Equipment Co. Ltd., China, 2008, pp. 1-30.
- [7] A. Eda Álvarez, “Análisis de Fallas de una máquina Extrusora de Electrodo”, Tesis profesional, UDEP, Perú, 2013.
- [8] I. Algorta, “Análisis de Fallas de una pieza en una empresa automotriz”, Tesis profesional, ITBA, Argentina, 2006.
- [9] L. Aguiar Guzmán y H. Rodríguez Borja, “Análisis de modos y efectos de Falla para mejorar la disponibilidad operacional en la línea de producción de gaseosas N°3”, Tesis profesional, Univ. Libre de Colombia, Colombia, 2014.
- [10] H. Vera Muñoz, “Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz (RCA), para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM – ECOPETROL S.A.”, Tesis Profesional, Univ. Industrial de Santander, Colombia, 2011.

- [11] F. Vilcapoma Román, “Análisis de Fallas mecánicas en el brazo B26XLB del Jumbo Emperador J0129YA en la Compañía Minera Volcán S.A.A. unidad Andaychagua”, Tesis profesional, UNCP, Perú, 2017.
- [12] C. Pariona Zamudio, “Análisis de las fallas de los equipos críticos de flotación, para reducir las pérdidas de producción en la unidad Minera de Yauliyacu”, Tesis profesional, UNCP, Perú, 2016.
- [13] C. Huancaya Mena, “Mejora de la disponibilidad mecánica y confiabilidad operacional de una flota de Cosechadoras de Caña de Azúcar de 40 TPH de capacidad”, Tesis profesional, PUCP, Perú, 2016.
- [14] R. Cornelio Chamorro, “Evaluación y Verificación de la Propiedades de los Agregados de las Nuevas Canteras de Lima”, Tesis profesional, UNI, Perú, 2008.
- [15] F. Farfán Bertín, “Realizar un Plan de Mantenimiento Preventiva del Chancador Primario Fuller en división Codelco Andina”, Tesis profesional, Univ. Austral de Chile, Chile, 2014.
- [16] D. Lázaro Ramos, “Reingeniería de una Chancadora Primaria de Mandíbulas 30x42 marca Cedarapid”, Tesis profesional, UNI, Perú, 2012.
- [17] A. Zúñiga, “Análisis de modos de fallas y sus efectos AMFE: enfoques para mejorar la priorización de los modos de falla”, *Planet Rams*, enero 2018. [Online]. Disponible: <https://planetrams.net/?p=2940&lang=es> [Último acceso: 25 abril 2020].
- [18] A. Monsalve, “El Análisis de Fallas o La Ingeniería Forense”, *Remetallica*, pp. 1-9, 2006.
- [19] M. Niclas, L. Tremps, U. Smolka, A. Kolios and F. Brennan, “A systematic failure mode effects and critically analysis for offshore wind turbine systems towards integrated condition based maintenance strategies”, *Ocean Engineering*, pp. 1-16, 2019.

- [20] A. Daquinta, C. Pérez, J. Águila, R. Pérez y E. García, “Metodología de Análisis de criticidad integral de las Cosechadoras de Caña de Azúcar CASE IH”, *Ingeniería Agrícola*, pp. 1-7, 2018.
- [21] R. Huerta, “El Análisis de Criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional”, en Conf. CCIM, Cuba, 2000, pp. 1-7.
- [22] J. Santos, E. Gutiérrez, M. Agüero y M. Strefezza, “Análisis de criticidad integral de activos físicos”, *UNERMB*, pp. 1-30, 2013.
- [23] R. K. Mobley, *Root Cause Failure Analysis*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [24] A. Mora, *Mantenimiento: Planificación, Ejecución y Control*. México, Alfaomega, 2009.
- [25] J. Moubray, *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Asheville, USA, Aladon LLC, 2004.
- [26] C. Guerra Huamali, “Análisis de modos y efecto de falla en los Scooptrams de la Empresa Minera Atacacho”, Tesis profesional, UNCP, Perú, 2017.
- [27] C. Martínez Lugo, “Implementación de un Análisis de modos y efecto de falla en una línea de manufactura para juguetes”, Tesis de maestría, UANL, México, 2004.
- [28] S. Morales Retamal, “Generación y desarrollo de un Plan de Mantenimiento Preventivo en base a criticidad, según criterios estadísticas de falla en empresa Química Clariant”, Tesis profesional, USM, Chile, 2017.
- [29] Witantyo and A. Rindiyah, “Decreasing inventory of a cement factory roller mil parts using reliability centered maintenance method”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-9, 2018.
- [30] F. Calderón Pozo, “Diagnóstico y propuesta de mejora del proceso de control de la calidad en una empresa que elabora Aceites Lubricantes Automotrices e Industriales

- utilizando herramientas y técnicas de la calidad”, Tesis profesional, PUCP, Perú, 2014.
- [31] G. Salazar Hernández y J. Puma Verónica, “Optimización del stock de componentes críticos para reducir costos e incrementar la disponibilidad de las Palas Hidráulicas en minería”, Tesis profesional, UPN, Perú, 2017.
- [32] R. Ginting, Wanli and A. Fauzi, “Crude Palm Oil Product Quality Control Using Seven Tools (case study: XYZ Company)”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-8, 2020.
- [33] R. Latino, K. Latino and M. Latino, *Root Cause Analysis: Improving Performance for Botton-Line Results*. USA, CRC Press, 2011.
- [34] R. Madariaga Potthoff, “Simulación y optimización del sistema de manejo de mineral Ripio en una Faena Minera”, Tesis profesional, Univ. De Chile, Chile, 2010.
- [35] M. Díaz Valenzuela, “Análisis de datos en servicio de confiabilidad prestado a una Planta de Remoción de Ripios”, Tesis profesional, USM, Chile, 2016.
- [36] “Jack Knife vs Pareto, ¿Cuál es mejor y por qué?”, *Ausenco Rylson*. [Online]. Disponible: <https://ausencorylsones.wordpress.com/2016/11/16/jackknife-vs-pareto-cual-es-mejor-y-por-que/> [Último acceso: 4 junio 2021].
- [37] S. Bhaumik, “Root cause analysis in engineering failures”, *Transactions of the Indian institute of Metals*, pp. 1-3, 2010.
- [38] K. Singh, R. Sharma and G. Singh, “Application of root cause analysis to increase material removal rate for productivity improvement: A case study of the press manufacturing industry”, *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-4, 2020.
- [39] L. Hitchcock, “Integrating root cause analysis methodologies”, *Engineering Asset Management*, pp. 1-4, 2006.

- [40] M. Alfaro y G. Aranda, “El análisis causa raíz utilizado como herramienta en la evaluación de eventos no deseados en instalaciones de una refinería”, Tesis profesional, UNAM, México, 2014.
- [41] P. Viveros, R. Stegmaier, F. Kristjanpoller, L. Barbera y A. Crespo, “Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo”, *Revista Chilena de Ingeniería*, pp. 1-14, 2012.
- [42] J. Varma and S. Lal, “Root cause analysis of newsprint waste using pareto analysis and cause and effect matrix”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-7, 2020.
- [43] M. Hidayat and Warjito, “Closed Drain Transfer Pump Failure Analysis using Root Cause Failure Analysis (RCFA) Method”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-12, 2019.
- [44] M. Lee, L. Chechurin and V. Lenyashin, “Introduction to cause-effect chain analysis plus with an application in solving manufacturing problems”, *The international Journal of advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-11, 2018.
- [45] E. Albizu y M. Olazaran. *Reingeniería y Cambio Organizativo*. España, Prentice Hall, 2004.
- [46] B. Hitpass, “¿Reingeniería, Rediseño o mejora de procesos de negocio?”, *Gerencia*, Setiembre 2011 [Online]. Disponible: <http://www.emb.cl/gerencia/articulo.mvc?xid=523> [Último acceso: 5 junio 2021].
- [47] J. Ismael Martínez, “Capacitación del Personal para empresas del Nuevo Milenio”, Tesis de maestría, UANL, México, 2001.
- [48] F. Filip and V. Marascu, “The 5S Lean method as a tool of industrial management performances”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-7, 2015.
- [49] I. Rizkya, K. Syahputri, R. Sari and I. Siregar, “5S Implementation in Welding Workshop – a Lean Tool in Waste Minimization”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-4, 2019.

- [50] A. Alseiari, P. Farrel and Y. Osman, “The impact of artificial intelligence applications on the Participation of Autonomous Maintenance and Assets Management Optimisation within Power Industry: A Review”, *IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, pp. 1-9, 2020.
- [51] I. Rizkya, R. Sari, K. Syahoutri and U. Tarigan, “Evaluation of total productive maintenance in manufacture”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-7, 2021.
- [52] D. Mesa, Y. Ortiz y M. Pinzón, “La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento”, *Scientia et Technica*, pp. 1-6, 2006.
- [53] X. Xing, Y. Xiao, W. Chang, L. Zhao and J. Cao, “The establishment of a preventive maintenance period optimum model”, *IEEE 18th International Conference on industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1-4, 2011.
- [54] N. Tri, Taufik and F. Satria, “Preventive Maintenance Scheduling by modularity design applied to limestone crusher machine”, *17th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, pp. 1-6, 2020.
- [55] A. Tayata, L. King and Y. Ke, “Predictive Maintenance of Oil and Gas Equipment using recurrent Neural Network”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-7, 2019.
- [56] R. Cáceres Marchena y A. León Yataco, “Aplicación de la Gestión de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad a la flota de Camiones de Acarreo Caterpillar 793F de una compañía minera para el mejoramiento de la Confiabilidad Operacional”, Tesis profesional, UNS, Perú, 2017.
- [57] H. Ahmadi, M. Subchan, R. Rachmanita, R. Audora and A. Wibuana, “Vibration analysis of Kartini reactor secondary cooling pump using FFT analyzer”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-9, 2020.

- [58] F. Ariani, Tugiman, D. Nasution and H. Sibarani, “Corrective Maintenance of Worm Gear a Screw Press Machine with a capacity of 30 tons per hour using Wear Analysis and its response to Conus Pressure”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-8, 2020.
- [59] L. Yi, M. Zuo and Z. Wang, “A model for analyzing and Evaluating the Return on Investment in e-learning”, *Seventh IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*, pp. 1-3, 2007.
- [60] J. Torres Barros y J. Paredes Cuchiparte, “Análisis de rentabilidad económica de los nuevos alojamientos turísticos regulados por el ministerio de turismo en el año 2015 para determinar el punto de equilibrio en puerto Ayora – Galápagos”, Tesis profesional, UCE, Ecuador, 2017.
- [61] C. Medina Domínguez, “Inversión de la empresa en formación, clave de la excelencia empresarial y análisis de su rentabilidad”, Tesis doctoral, UNED, España, 2011.
- [62] J. Campbell and J. Reyes, *Uptime Strategies for Excellence in Maintenance Management*. USA, CRC Press, 2016.
- [63] A. Jardine and A. Tsang, *Maintenance Replacement and Reliability Theory and Applications*. USA, CRC Press, 2013.

ANEXOS

ANEXO 1: Circuito de la Planta de Agregados

Este anexo comprende los equipos de la planta de agregados, los cuales se visualiza en la figura a.1. El inicio del proceso empieza con la descarga del material en la tolva de recepción, el cual pasa al alimentador vibratorio. Por tanto, este equipo alimenta a chancadora de mandíbulas, por lo cual este reduce el tamaño de las rocas desde 16'' a 3''. Después, las piedras trituradas son transportadas por la faja principal hasta llegar a la zaranda vibratoria. Este equipo se encarga de separar por mallas, los distintos tamaños de cada producto (Piedra huso 67 de ½'', piedra huso 57 de ¾'' y el polvillo). Por otro lado, las piedras no trituradas, pasan por la faja de alimentación del cono, asimismo el electroimán cumple la función de retener los metales, por ende las piedras libre de metales entran a la chancadora cónica, el cual corresponde a la segunda etapa de trituración. Esta máquina se encarga de definir el tamaño adecuado de cada piedra según la necesidad requerida por parte del cliente. Por último, las piedras trituradas retornan a la faja principal, para llegar a la zaranda y que se pueda clasificar por producto.

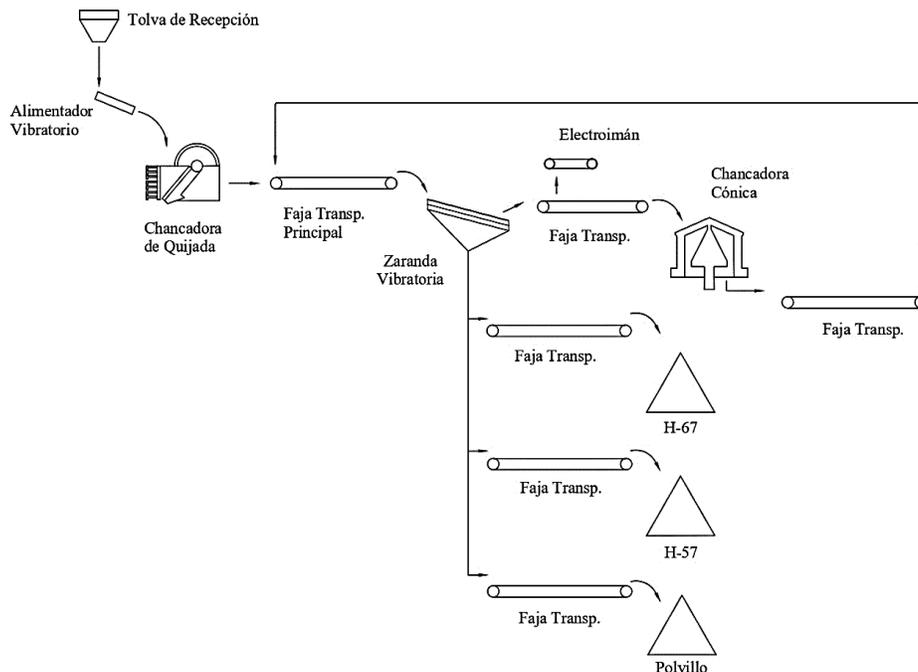


Figura a.1. Diagrama de flujo de la Planta de Agregados.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2: Cuadro de Ponderación en los equipos de la Planta

Para el anexo 2, se muestra la tabla a.1, por el cual esta tabla de ponderación de los equipos para la planta de agregados, están enumerados del 1 al 11. La tabla se divide en la frecuencia de falla anual e impacto. Este último, consiste en ponderar por el nivel de producción, tiempo promedio de reparación, costo de reparación y el impacto por la seguridad y el medio ambiente.

CUADRO DE PONDERACIÓN DE CRITICIDAD			N° DE EQUIPO											
ESTIMACIÓN DE PUNTAJES	FRECUCIA	Frecuencia de fallas	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Menos de una por año	1									
		Entre 1 y 12 por año	2											
		Entre 13 y 26 por año	3	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1
		Entre 27 y 52 por año	4											
		Más de 52 fallas por año	5											
IMPACTO	1. Nivel de producción	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		0 a 150 dólares/hora	1											
		151 a 1,500 dólares/hora	2											
		1501 a 3,000 dólares/hora	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
		3,001 a 6,000 dólares/hora	6											
		más de 6,000 dólares/hora	10											
IMPACTO	2. Tiempor Promedio de Reparación	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		Menos de 4 horas	1											
		Entre 5 y 24 horas	2											
		Entre 25 y 48 horas	4	1	2	1	2	1	1	6	1	1	1	
		Mas de 48 horas	6											
IMPACTO	3. Costo de Reparación	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		Menos de 1,000 dólares	5											
		De 1,001 a 5,000 dólares	10											
		De 5,001 a 15,000 dólares	20	5	10	5	10	5	5	20	5	5	5	
		Más de 15,000 dólares	25											
IMPACTO	4. Impacto en la seguridad	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		No	0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
		Si	35											
IMPACTO	5. Impacto ambiental	Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		No tiene impacto en el medio ambiente	0											
		Impacta parcialmente en el medio ambiente	20	35	35	20	35	20	20	35	20	20	20	
		Impacta directamente en el medio ambiente	35											

Tabla a.1. Cuadro de ponderación de los equipos.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3: Criticidad de los equipos de la Planta de Agregados

Para el anexo 3, se da a conocer el resultado de la criticidad de los equipos, los cuales están codificados por números y son mostrados en la figura a.2. Esta matriz clasifica a los equipos según por colores. El primer color empieza con rojo, el cual indica que es muy crítico, naranja para estado crítico, amarillo para un estado semi crítico y el verde para un estado no crítico.

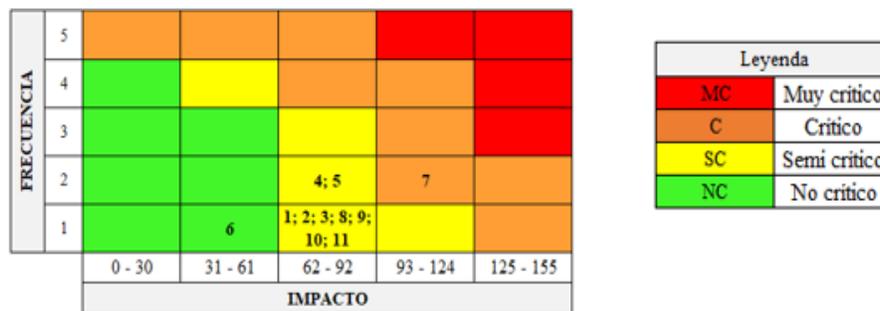


Figura a.2. Resultado de la matriz de criticidad.
Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, en la tabla a.2, los equipos están enumerados de manera descendente desde el equipo más crítico al menos crítico. No obstante, la enumeración del 1 al 11 corresponde a cada equipo que se obtiene de la puntuación de la tabla a.1. Por tanto, la chancadora cónica es el equipo crítico de la planta de agregados, el cual se obtiene 98 puntos.

Nº	Equipos de Planta de Agregados	Impacto	Estado
7	Chancadora Cónica	98	C
4	Zaranda Vibratoria	84	SC
2	Chancadora de Quijada	84	SC
1	Alimentador Vibratorio	78	SC
3	Faja Principal	63	SC
5	Faja Alimentadora del Cono	63	SC
8	Faja después del Cono	63	SC
9	Faja de la Piedra Huso 67	63	SC
10	Faja de la Piedra Huso 57	63	SC
11	Faja de Arena	63	SC
6	Electroimán	58	NC

Tabla a.2. Puntaje de criticidad por equipo.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4: Historial de Fallas

Actividades Correctivas					Pg. 1 de 5
Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de Incidencia	Fecha de Solución	Tiempo de parada de máquina
Bombas oleohidráulicas	Rodamientos en mal estado	Se procedió a cambiar los rodamientos de las bombas	15/11/2019	19/11/2019	5.01 horas
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se procedió a cambiar el aceite	15/11/2019	19/11/2019	5.01 horas
Bocina cónica	Presenta sobrecalentamiento respecto al eje principal	Se procedió a lijar la bocina cónica	14/11/2019	15/11/2019	4.92 horas
Eje principal	Presenta sobrecalentamiento respecto a la bocina cónica	Se procedió a lijar eje principal	14/11/2019	15/11/2019	4.92 horas
Rodamientos	Los tres rodamientos y el retén presentaron desgaste	Se cambiaron los tres rodamientos y el retén	16/09/2019	22/09/2019	45.00 horas
Cabezal cónico	Fisura en el Cabezal cónico	Se procedió a reparar	13/09/2019	29/09/2019	98.75 horas
Cojinete semiesférico	Cojinete semiesférico con rajadura	Se procedió a cambiar	13/09/2019	29/09/2019	98.75 horas
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se procedió a limpiar el tanque y cambiar el aceite	13/09/2019	29/09/2019	98.75 horas
Tanque de aceite con nivelador	Se recalentó el aceite, porque el engranaje cónico estaba asentado sobre el piñón cónico	Se procedió a calzar con 5 lanas	24/04/2019	26/04/2019	7.58 horas
Forros Fijo y Móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros nuevos (fijo y móvil)	16/04/2019	23/04/2019	42.42 horas

Actividades Correctivas					Pg. 2 de 5
Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de Incidencia	Fecha de Solución	Tiempo de parada de máquina
Placa de alimentación	Se cayó el anillo de sujeción de la chancadora cónica	Se procedió a soldar el anillo de sujeción con supercito de 1/8"	06/02/2019	08/02/2019	10.82 horas
Placa de alimentación	Los pernos de sujeción se habían roto y caído	Se procedió a colocar nuevos pernos de sujeción	25/01/2019	27/01/2019	9.50 horas
Piñón cónico recto	Se rompieron dos dientes del piñón de ataque	Se fabricó nuevo piñón de ataque	21/11/2018	05/12/2018	41.16 horas
Filtros	Filtro del aceite con obturaciones	Se procedió a cambiar el filtro	17/10/2018	21/10/2018	29.00 horas
Forros Fijo y móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	04/10/2018	25/10/2018	135.00 horas
Bocina cilíndrica	Bocina cilíndrica con rajadura	Se cambió bocina cilíndrica	04/10/2018	27/10/2018	151.00 horas
Cojinete semiesférico	Cojinete semiesférico con desgaste	Se maquinó el Cojinete semiesférico	04/10/2018	24/10/2018	127.00 horas
Piñón cónico recto	Se rompió un diente del piñón cónico recto	Se colocó un diente postizo del piñón cónico recto	04/10/2018	28/10/2018	156.00 horas
Eje principal	El eje principal con desgaste	Se rellenó y se maquinó el eje principal	04/10/2018	27/10/2018	151.00 horas
Bocina cónica	Bocina cónica con desgaste	Se maquinó bocina cónica	04/10/2018	24/10/2018	127.00 horas
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se cambió dos cilindros de aceite marca "meropa 68"	07/06/2018	10/06/2018	21.00 horas
Rodamientos	Los tres rodamientos y el retén presentaron desgaste	Se cambiaron los tres rodamientos y el retén	05/06/2018	06/06/2018	8.00 horas

Actividades Correctivas					Pg. 3 de 5
Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de Incidencia	Fecha de Solución	Tiempo de parada de máquina
Bocina cilíndrica	Bocina cilíndrica con rajadura	Se cambió bocina cilíndrica	01/06/2018	07/06/2018	37.00 horas
Cabezal cónico	Cabezal cónico con rajadura	Se procedió a soldar el cabezal cónico	31/05/2018	09/06/2018	61.00 horas
Forros Fijo y móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	30/05/2018	10/06/2018	74.00 horas
Cabezal cónico	Fisura en el Cabezal cónico con rajadura	Se procedió a soldar el cabezal cónico	31/10/2017	01/11/2017	8.00 horas
Forros Fijo y móvil	Forros fijo y móvil presentaron se rompieron	Se cambiaron los forros nuevos (fijo y móvil)	10/10/2017	20/10/2017	69.00 horas
Filtros	Filtro del aceite con obturaciones	Se colocó un nuevo filtro en el retorno de aceite.	18/02/2017	21/02/2017	8.00 horas
Bombas oleohidráulicas	Rodamientos en mal estado	Se procedió a cambiar los rodamientos de las bombas	14/02/2017	18/02/2017	32.00 horas
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se cambió dos cilindros de aceite marca "Meropa 68"	11/02/2017	18/02/2017	45.00 horas
Forros Fijo y Móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros nuevos (fijo y móvil)	09/02/2017	18/02/2017	61.00 horas
Cojinete semiesférico	Cojinete semiesférico con rajadura	Se cambió el Cojinete semiesférico	09/02/2017	10/02/2017	8.00 horas
Bocina cilíndrica	Bocina cilíndrica con rajadura	Se cambió bocina cilíndrica	09/02/2017	10/02/2017	8.00 horas
Filtros	Filtro del aceite con obturaciones	Se colocó un nuevo filtro en el retorno de aceite.	27/09/2016	28/09/2016	7.00 horas

Actividades Correctivas					Pg. 4 de 5
Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de Incidencia	Fecha de Solución	Tiempo de parada de máquina
Bombas oleohidráulicas	Bomba oleohidráulica en mal estado	Se procedió a reparar bomba oleohidráulica	02/08/2016	04/08/2016	4.00 horas
Forros Fijo y Móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	06/07/2016	12/07/2016	35.00 horas
Forros Fijo y Móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	02/04/2016	05/04/2016	6.00 horas
Tuberías y válvulas para la línea de agua	Válvula check en mal estado	Se cambio la válvula check	16/03/2016	23/03/2016	1.00 horas
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se cambió dos cilindros de aceite marca "Meropa 68"	19/01/2016	20/01/2016	8.00 horas
Cojinete semiesférico	Cojinete semiesférico con desgaste	Se cambió el Cojinete semiesférico	15/01/2016	21/01/2016	23.50 horas
Bocina cilíndrica	Bocina cilíndrica con rajadura	Se cambió bocina cilíndrica	15/01/2016	19/01/2016	13.50 horas
Bocina cónica	Bocina cónica con desgaste	Se cambio bocina cónica	15/01/2016	19/01/2016	13.50 horas
Tuberías y válvulas para la línea del aceite	Pérdida de aceite por obstrucción de la tubería de retorno	Se procedió a desatorar la tubería de retorno	30/11/2015	01/12/2015	3.50 horas
Forros Fijo y móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	06/08/2015	15/08/2015	30.52 horas
Bombas oleohidráulicas	Bombas oleohidráulicas en mal estado	Se procedió a cambiarlos bomba oleohidráulica	02/08/2015	04/08/2015	1.26 horas
Bocina cónica	Bocina cónica con desgaste	Se cambio bocina cónica	10/05/2015	15/05/2015	15.33 horas
Forros Fijo y móvil	Forros fijo y móvil se rompieron	Se cambiaron los forros	10/03/2015	25/03/2015	35.92 horas

Actividades Correctivas					Pg. 5 de 5
Componente de falla	Descripción del problema	Actividad ejecutada	Fecha de Incidencia	Fecha de Solución	Tiempo de parada de máquina
Tanque de aceite con nivelador	Aceite en mal estado	Se cambió dos cilindros de aceite marca "Meropa 68"	25/02/2015	26/02/2015	2.37 horas
Bocina cilíndrica	Bocina cilíndrica con rajadura	Se cambió bocina cilíndrica	08/02/2015	13/02/2015	10.12 horas
Cojinete semiesférico	Cojinete semiesférico con desgaste	Se cambió el Cojinete semiesférico	08/02/2015	20/02/2015	23.95 horas

Tabla a.3. Historial de fallas correctivas.
Fuente: Elaboración Propia basado en la Empresa.