



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL
PARA OPTIMIZAR LA ELABORACIÓN DEL
PRESUPUESTO DE CAPITAL DE MANTENIMIENTO, EN
UNA PLANTA CONCENTRADORA DE MINERAL

Tesis para optar el título profesional de

Ingeniero Industrial.

Autor:

Bach.: Juan José Gamboa Álvarez

Asesor:

Ing.: Luis Roberto Quispe Vásquez

Cajamarca – Perú

2018

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller Juan José Gamboa Álvarez

“HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL PARA OPTIMIZAR LA ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO DE CAPITAL DE MANTENIMIENTO, EN UNA PLANTA CONCENTRADORA DE MINERAL”.

ASESOR

Ing. Luis Roberto Quispe Vásquez

PRESIDENTE

Ing. Jimmy Frank Oblitas Cruz

JURADO

Ing. Ana Rosa Mendoza Azañero

JURADO

Ing. Juan Carlos Flores Cerna

Dedicatoria

A Rafaela, mujer de tesón y valentía, a Juan mi faro y guía, a Karla, mi bella e incondicional compañera, a mis pequeñas Valeria y Daniela por ser el motor de mi vida y a toda mi familia, por su apoyo infinito.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su aliento inagotable y amor incondicional, participes de todos mis retos y desafíos convertidos en aprendizajes continuos.

Un especial agradecimiento a mi asesor Ing. Luis Roberto Quispe Vásquez.

Índice de Contenidos

Agradecimientos	iii
Índice de Contenidos	iv
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Realidad problemática	1
1.2 Formulación del problema.....	3
1.3 Justificación	3
1.4 Limitaciones.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo general.	4
1.5.2 Objetivo específico	4
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 Gestión de Activos.....	12
2.2.2 Confiabilidad.....	13
2.2.3 Análisis de Criticidad	21
2.2.3.1 <i>En el ámbito de mantenimiento</i>	25
2.2.3.2 <i>En el ámbito de inspección</i>	25
2.2.3.3 <i>En el ámbito de materiales</i>	25
2.2.3.4 <i>En el ámbito de disponibilidad de planta</i>	25
2.2.4 Ingeniería de la confiabilidad	25
2.2.5 Análisis de Riesgos	39
2.3 Formulación de la hipótesis	39
2.4 Variables.....	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	40
3.1 Operacionalización de variables	40
3.1.1. Variable independiente	40
3.1.1.1. <i>Indicadores de la variable independiente</i>	40
3.1.2. Variable dependiente.....	41
3.1.2.1. <i>Indicador de la variable dependiente</i>	41
3.2 Diseño de investigación	43
3.3 Unidad de estudio.....	43

3.4 Población.....	43
3.5 Muestra.....	43
3.6 Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos	44
3.7 Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos	45
3.7.1. Programas para análisis de datos:.....	45
3.7.2 Procedimiento.....	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	46
4.1 Análisis inicial del proceso de elaboración del presupuesto de Capital.	46
4.1.1 Política interna.....	46
4.1.2 Procedimiento de elaboración	46
4.1.3 Costo total de eficiencia / ineficiencia de compras de repuestos	47
4.1.4 Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos.....	49
4.1.5 Aplicación de herramientas de confiabilidad.	50
4.1.6 Evaluación de la situación Actual.....	65
4.1.6.1. <i>En materia de Disponibilidad y Confiabilidad</i>	66
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	71
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	78

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Activos ubicados en el cuadrante I</i>	8
<i>Tabla 2. Equipos críticos de la línea de flotación</i>	10
<i>Tabla 3. Probabilidad de disponibilidad</i>	10
<i>Tabla 4. Histograma de intervenciones</i>	18
<i>Tabla 5. Cálculo de función de densidad de falla $f(t)$</i>	19
<i>Tabla 6. Cálculo de función acumulada de falla $F(t)$</i>	19
<i>Tabla 7. Cálculo de confiabilidad $R(t)$</i>	20
<i>Tabla 8. Cálculo de tasa de falla $l(t)$</i>	20
<i>Tabla 9. Operacionalización de variables</i>	42
<i>Tabla 10. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos</i>	44
<i>Tabla 11. Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora</i>	47
<i>Tabla 12. Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora</i>	48
<i>Tabla 13 Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Periodo 2014-2016.</i>	49
<i>Tabla 14. Análisis de Criticidad</i>	53
<i>Tabla 15. Rango de evaluación de Criticidad</i>	54
<i>Tabla 16. Calificación del índice de criticidad para priorización de activos}</i>	55
<i>Tabla 17. Sistemas y componentes críticos</i>	56
<i>Tabla 18. Matriz de componentes monitoriables y con historial de fallas.</i>	58
<i>Tabla 19. Matriz de riesgo crítico</i>	62
<i>Tabla 20. Condición de componentes críticos y nivel de riesgo</i>	63
<i>Tabla 21. Matriz de priorización y calendarización para compra de repuestos</i>	64
<i>Tabla 22. Eficiencia de Gasto capex, periodo 2014 - 2017</i>	65
<i>Tabla 23. Impacto de detenciones por espera de repuestos. Periodo 2014 - 2017</i>	66
<i>Tabla 24 Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Periodo 2014-2017.</i>	67
<i>Tabla 25 Resumen con indicadores antes y después de la mejora</i>	70

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Repuestos críticos gestionados por condición</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Representación de la función densidad de probabilidad de falla</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Ciclo de vida del equipo</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4. Modelo básico de criticidad.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. Costos directos y de capital v/s seguridad operacional</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Costo de ineficiencia.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Criticidad de los equipos.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Factor integrador de la Ingeniería de la confiabilidad.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Proceso de cinco etapas para la toma de decisión de compra de repuestos críticos capitalizables.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 10. Curva de confiabilidad de pernos críticos - Tapa de descarga</i>	<i>59</i>
<i>Figura 11. Curva de confiabilidad - Estatores de molinos</i>	<i>60</i>
<i>Figura 12 Disponibilidad real, disponibilidad budget y Confiabilidad de Molino de Bolas #4. Periodo 2014-2017.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 13 Disponibilidad real, disponibilidad budget y Confiabilidad de Molino de Bolas #1. Periodo 2014-2017.</i>	<i>68</i>

Resumen

Las industrias intensivas en activos físicos como las empresas mineras, hoy en día enfrentan bastos desafíos que impulsan a encontrar nuevas formas de incrementar la producción y reducir los costos operativos. En un esfuerzo por incluir tal enfoque, la presente investigación tuvo como objetivo la aplicación de “Herramientas de Confiabilidad Operacional, para Optimizar la Elaboración del Presupuesto de Capital de Mantenimiento, en una Planta Concentradora de Mineral”. Para lo cual se realizó la evaluación inicial del ejercicio presupuestal, la cual se venía desarrollando en base a la experiencia del personal. Esta práctica empírica privada de criterios técnicos generó pérdidas por lucro cesante, debido a la indisponibilidad de equipos por la espera de repuestos. El proceso de implementación de las herramientas de confiabilidad contempla cinco etapas, que incluye una matriz de riesgo crítico, la cual determina la prioridad de compra y posterior calendarización de la intervención. Actualmente, la metodología ayuda a la toma de decisiones de compra, en base la condición objetiva de los componentes críticos, además de predecir de manera oportuna y certera las intervenciones planeadas. Por tanto se concluye que, efectivamente, la aplicación de las herramientas de confiabilidad permitió optimizar el proceso de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, evidenciado por el incremento del 11% en la eficiencia de ejecución del presupuesto del año 2017, comparado con el promedio de los tres años anteriores. Finalmente, las recomendaciones están orientadas a la sostenibilidad y sistematización del modelo, mediante el compromiso de la Gerencia de Mantenimiento y el involucramiento de los principales actores

Palabras claves: confiabilidad, presupuesto de capital de mantenimiento, análisis de riesgo crítico, componente crítico.

Abstract

Asset-intensive industries, such as mining companies face nowadays major challenges that lead them to find new ways to increase production and reducing operating costs. In an effort to include such an approach, this research aims at the application of "Operational Reliability Tools, to Optimize the Capital Expenditure Budget for Maintenance, in a Mineral Concentration Plant". For which the initial evaluation of the budget exercise was carried out, which had been developed based on the experience of the maintenance staff. This practice private of technical criteria, generated "lost profits", due to the unavailability of equipment caused by waiting for critical spare parts. The implementation process of the reliability tools contemplates five stages, which includes a critical risk matrix, which determines the priority of purchase and subsequent scheduling of the intervention. Currently, the methodology helps purchasing decisions, based on the objective condition of the critical components, as well as predicting in a timely and accurate manner the planned interventions. Therefore, it is concluded that, effectively, the application of the reliability tools allowed to optimize the process of preparing the maintenance capital budget, evidenced by the 11% increase in the efficiency of execution of the 2017 budget, compared to the average of the previous three years. Finally, the recommendations are oriented to the sustainability and systematization of the model, through the commitment of the Maintenance Management and the involvement of the main actors

Keywords: reliability, maintenance capital expenditure budget, critical risk analysis, critical component.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

La última década se ha distinguido por imponer permanentemente nuevos y variados desafíos a las organizaciones empresariales, puesto que la globalización de la competencia en un entorno de continuo crecimiento de las exigencias de los consumidores y de mayor segmentación de los mercados, las obligan a abordar permanentemente nuevos proyectos que se proponen saltos cualitativos para asegurar la diferenciación permanente y la competitividad de clase mundial. Estos desafíos son la calidad de los productos, la productividad de los recursos humanos y técnicos, la flexibilidad del sistema productivo, la continua innovación en productos y procesos, la atención al cliente el cuidado del ambiente y el respeto a las personas (Arata, 2005).

El proceso de globalización obliga a todas las empresas, independientes de su tamaño y sector en cual participan, confrontarse permanentemente a nivel mundial, lo que les exige abordar nuevos desafíos para lograr alcanzar la competitividad según estándares internacionales, los que deberá afrontar de manera inteligente y responsable buscando permanentemente su diferenciación, en caso contrario, arriesga su permanencia en el mercado con las negativas consecuencias que ello implica (Arata, 2009).

Las industrias intensivas en activos físicos como las empresas mineras, hoy en día enfrentan bastos desafíos, la continua presión competitiva, el incremento en el precio de los metales (commodities), entre otros factores están impulsando a encontrar nuevas formas de incrementar las tasas de producción en sus operaciones y reducir los costos operativos por tonelada movida y procesada. Es en este contexto, los retos en mayor medida son asumidos por las áreas operativas y de mantenimiento.

La evolución reciente del sector minero peruano se puede dividir en dos etapas. La primera fue una etapa de auge de inversiones (2011-2014). Durante estos años se empezaron a construir grandes proyectos mineros, por un monto aproximado de US\$ 21,000 millones. La segunda etapa fue de auge de la producción (2015-2017). Luego de concluirse con la construcción de minas, estas entraron en operación, conduciendo a un mayor dinamismo de las exportaciones tradicionales mineras, al mismo tiempo que se observa una caída en la inversión minera. Sin embargo, desde el segundo semestre del año 2016, el crecimiento de la producción minera empezó

a moderarse conforme las nuevas minas alcanzaban sus máximos niveles de operación (Arias, 2017).

Ante este panorama, el área de mantenimiento de mina no es ajena a este desafío. En la actualidad el mantenimiento conceptualmente es visto por todos los profesionales del sector como un factor estratégico y no solo como un originador de costos necesarios para la continuidad operativa. Sin duda una buena gestión de mantenimiento puede convertirse en una herramienta esencial para el mejoramiento de la disponibilidad de sus activos y la optimización de sus costos.

El efecto de los costos propios del mantenimiento, asociados con la mano de obra, materiales, repuestos y terceros, pueden superar el 30% de los costos de producción en empresas intensivas en activos físicos, sin considerar aquellos otros inducidos como los costos de improductividad, de la no calidad, del lucro cesante, etc., que pueden llegar a duplicar los costos propios del mantenimiento en sistemas de producción críticos, debido a una inadecuada gestión y mantenimiento de los activos que afecta la seguridad de funcionamiento de los equipos e instalaciones (Arata, 2009).

Dentro del plan estratégico de muchas empresas mineras peruanas, la gestión del mantenimiento ha cobrado gran importancia para el control de costos fijos y variables, además del aseguramiento de la producción. En este contexto, los departamentos de mantenimiento están adoptando herramientas de gestión que permitan la optimización de costos y brinden mayor confiabilidad a sus activos. Sin embargo, aún existen muchas oportunidades para la optimización en la gestión de los activos, entre ellos los temas relacionados a la elaboración del presupuesto de mantenimiento.

A inicios de la operación minera, el ejercicio anual de la elaboración del presupuesto de mantenimiento en la planta Concentradora, objeto del presente estudio, se venía desarrollando de manera empírica, vale decir, solamente, en base a la experiencia del personal y la observación de algunos eventos. Otra fuente es el historial del ciclo de vida del activo, información registrada en el sistema de gestión de mantenimiento CMMS (por sus siglas en inglés). Sin embargo, a pesar de contar con esta valiosa herramienta informática, los datos ingresados por el personal de mantenimiento son escasos y no contribuyen significativamente a fundamentar los recursos físicos requeridos para los años futuros.

Otro de los factores que no se toman en cuenta para la elaboración del presupuesto de gastos capitalizables CAPEX (capital expenditures), y el desarrollo de un plan de sustitución de componentes a mediano y largo plazo, son los criterios para la priorización de la compra de componentes críticos, como son; el impacto en la producción al no contar con el componente, impacto en la seguridad, entre otros criterios.

Esta situación podría derivar en la indisponibilidad de algún activo crítico provocando la detención del proceso productivo, generando de esta manera enormes pérdidas por dejar de producir, concepto denominado lucro cesante. Además, al no reemplazar oportunamente componentes en proceso de falla, acarrearía mayores costos directos de mantenimiento al materializarse la falla, debido a los daños y a la pérdida de la confiabilidad originada a otros componentes.

La indisponibilidad de componentes debido a la espera de repuestos, se ha visto evidenciado en la planta concentradora, significando pérdidas alrededor del 60% del presupuesto de compra de repuestos de capital de un año.

1.2 Formulación del problema

¿De qué manera las herramientas de confiabilidad operacional optimizarán la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, en una planta concentradora de mineral?

1.3 Justificación

El presente estudio se justifica por la imperiosa necesidad de desarrollar un modelo presupuestario técnico – financiero, que permita a la Gerencia de Mantenimiento de la planta Concentradora, contar con herramientas de Ingeniería de Confiabilidad para el soporte en la toma de decisiones objetivas, a fin de priorizar la compra de componentes capitalizables críticos, sin poner en riesgo la continuidad operativa.

1.4 Limitaciones

Para la elaboración de la matriz de riesgo no se cuenta con costos actualizados de componentes mecánicos y eléctricos. Sin embargo, se logró consolidar una lista actualizada, realizando cotizaciones de repuestos con los principales proveedores.

No se cuenta con historial de fallas, necesaria para la formulación de probabilidades de ocurrencia. Para solucionar esta falencia de información de tuvo que realizar entrevistas particulares con los principales actores de la ejecución del mantenimiento.

El sistema computarizado de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) por sus siglas en inglés de la empresa, no cuenta con información necesaria para la elaboración de historial de fallas, ni costos directos de ejecución de tareas de mantenimiento. Sin embargo, crea un registro de fechas de intervención que sirven como guía para la verificación de vales y compra de repuestos por cargo directo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general.

Optimizar la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento a través de herramientas de confiabilidad operacional, para una planta concentradora de mineral.

1.5.2 Objetivo específico

- Analizar la situación inicial de la empresa en torno al ejercicio de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento.
- Modelar un proceso para la elaboración de presupuesto de capital de mantenimiento utilizando herramientas de confiabilidad operacional, incluyendo la elaboración de una matriz de riesgo crítico que soporte la toma de decisiones de compra de componentes en base al impacto en la producción y la probabilidad de ocurrencia de fallas.
- Evaluar la situación actual luego de la implementación del proceso de optimización del presupuesto de capital de mantenimiento, en una planta concentradora.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el presente capítulo se muestran investigaciones precedentes, internacionales y nacionales, útiles sobre el tema en cuestión, los cuales servirán como referencia para el desarrollo del presente estudio.

Godoy (2014) en su tesis de investigación “*Modelos Integrados para Gestión de Repuestos Críticos en las Industrias Intensivas en Activos*” (p. 43). En Santiago de Chile para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería se enfoca en:

1. El desarrollo de una técnica de ayuda a las decisiones de adquisición de repuestos que emplea una medida de desempeño del repuesto, basados en la teoría de interferencia esfuerzo-resistencia, lo cual llaman nivel de servicio basado en la condición (CBSL, por sus siglas en inglés), el cual es definido como la probabilidad de que el esfuerzo aplicado sobre el sistema no sobrepase la resistencia del sistema.
2. Los repuestos críticos gestionado por condición (CMS, por sus siglas en inglés) los cuales son repuestos caros, altamente confiables, con tiempos de espera grandes, y no disponibles en el almacén, además están sometidos al monitoreo de condición (Ver figura 1).
3. El objetivo de este trabajo es orientar al momento de decidir cuándo pedir repuesto crítico bajo monitoreo.
4. El trabajo también contempla una técnica grafica basado en el indicador CBSL que considera una regla para decisiones sustentadas en la función de la confiabilidad basada en la condición y tiempos de espera estocásticos y fijos. Sus resultados arrojan que para el caso de un tiempo de espera estocástico la técnica es efectiva para determinar cuando la operación del sistema es confiable y puede resistir la variabilidad del tiempo de entrega, satisfaciendo el nivel de servicio requerido.

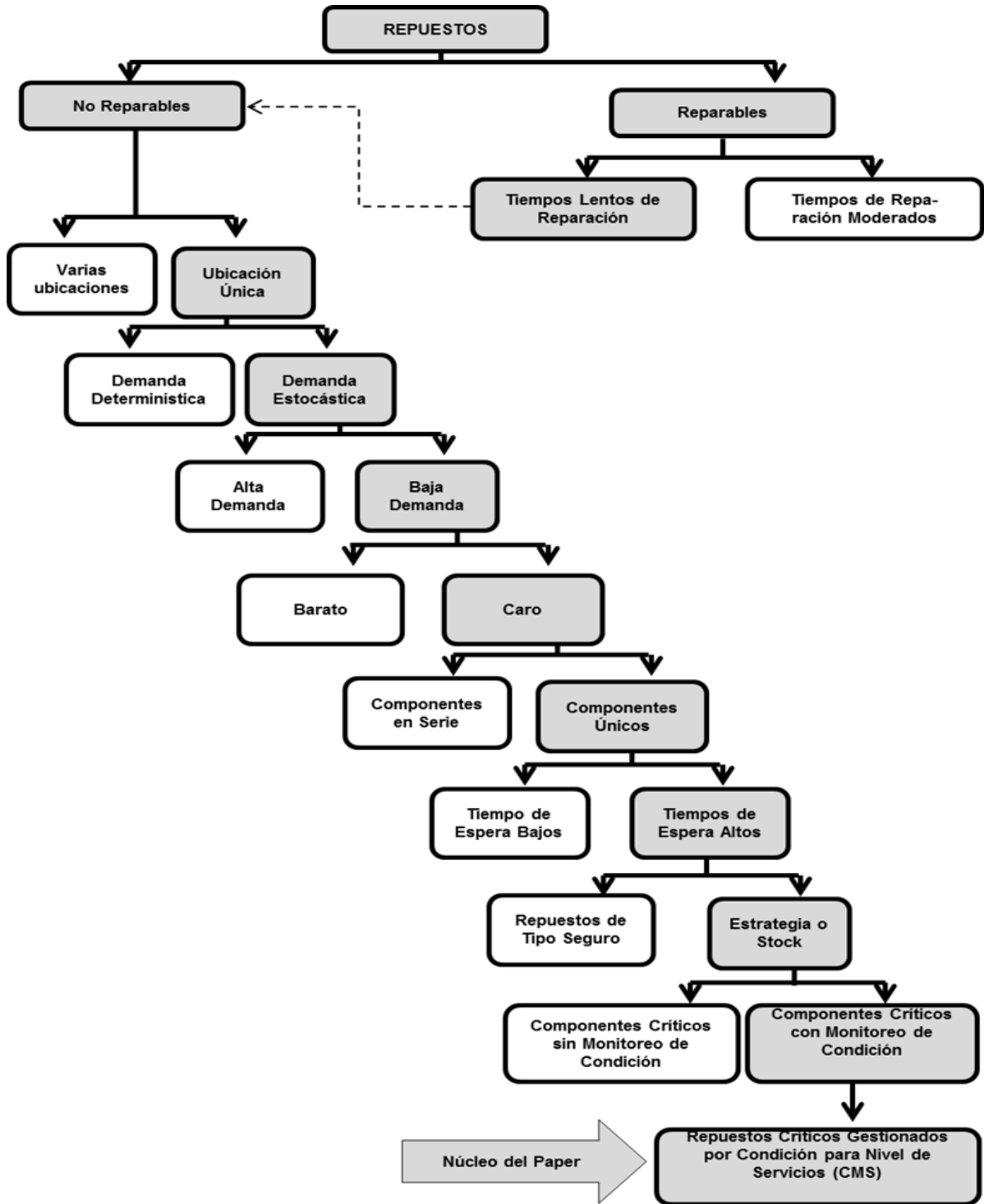


Figura 1. Repuestos críticos gestionados por condición

Fuente: Modelos Integrados para gestión de repuestos críticos en las industrias intensivas en activos

Pascual, Louit, Banjevic, & Jardine (2011) proporcionan una investigación denominada "*Monitoreo Basado en la Condición para el requerimiento de Componentes Críticos*" (p. 25) donde aborda:

1. Su modelo está enfocado hacia la determinación de decisiones para los requerimientos de compra de repuestos, la variable del modelo propuesto es la vida útil remanente la cual es estimada por medio de evaluaciones de la edad del componente y los indicadores de condición que representan la salud del componente, las suposiciones del modelo son: tiempos de esperas (lead time) aleatorios, y un componente simple con configuración simple de repuestos, estos autores también manifiestan que su modelo solo es aplicable si el periodo entre la detección de la falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional es mayor que el tiempo de espera del repuesto requerido.
2. La principal conclusión del estudio se resume en que el mantenimiento basado en condiciones es ampliamente aceptado por sus beneficios por la disminución esperada en el inventario, ya que la adquisición de piezas se puede desencadenar mediante la identificación de una falla potencial.

Del Castillo (2016) desarrollaron la investigación "*Obtención de un modelo De Criticidad para los Equipos y Sistemas Tecnológicos de una Termoeléctrica*" (p. 13). En la Habana Cuba, donde se proponen los elementos necesarios para la obtención de un modelo que permita determinar la Criticidad y complejidad de los equipos y sistemas tecnológicos en las centrales eléctricas con la intención de tener la posibilidad de establecer órdenes de prioridad para la atención a los mismos sobre bases reales. El estudio se enfoca en activos La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos "Carlos Manuel de Céspedes" (ETE) es una de las mayores y más importantes plantas productoras de energía eléctrica en Cuba. Uno de los aspectos abordados por el método fue la clasificación de los equipos de las centrales eléctricas agrupados en cuatro categorías (A, B, C y D) de acuerdo a su incidencia en la disponibilidad y confiabilidad, su complejidad tecnológica y la cuantía de recursos necesarios para ejecutar los mantenimientos. El trabajo realizado, cuyos resultados aquí se presentan, tuvo como objetivo obtener un modelo matemático que permita una clasificación jerarquizada de los sistemas, subsistemas y equipos en la Central Termoeléctrica de Cienfuegos, que facilite la mejora en la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento. A partir de la investigación realizada se pueden formular las conclusiones siguientes:

1. Se determinaron todos los factores a ser considerados en los modelos de criticidad y complejidad de una Central Termoeléctrica real, lo que permitió obtener modelos matemáticos personalizados para el cálculo de los índices de criticidad y complejidad.
2. La aplicación de ambos modelos para la determinación de los índices de criticidad y complejidad permitió la obtención de una lista jerarquizada de los equipos y sistemas tecnológicos de la Central, quedando bien identificados y clasificados aquellos que son críticos y/o complejos.
3. Los equipos que requieren mayor atención para mejorar su confiabilidad son los mostrados en la Tabla 1 ya que en la matriz de criticidad versus complejidad se encuentran en el 1er cuadrante con valores superiores a la medida en ambos indicadores.

Tabla 1.

Activos ubicados en el cuadrante I

Activos ubicados en el cuadrante I		
Nombre del Activo	Complejidad	Criticidad
Recalentador y Sobre Calentador	120	16.7
Calentador de aire regenerativo	90	59.3
Quemadores	90	171.9
Bombas de agua de alimentar	50	85.4
Sopladores de hollín de caldera	120	107.5
Compresores de aire de instrumentos	50	17.3
Válvulas de turbina	250	20.2

Fuente: Obtención de un modelo de criticidad para los equipos y sistemas tecnológicos de una termoeléctrica

Sobre la literatura nacional, existen limitadas fuentes como referencia para la presente investigación; sin embargo, se ha podido obtener los siguientes trabajos:

Barreto (2015) sustentó la tesis: *“Modelos De Control de Inventarios para la Reducción de Costos de Repuestos de Mantenimiento en Taladros de Perforación Offshore En La Provincia De Tumbes”* (p. 16). En la ciudad de Lima, para el grado de Maestro en Ingeniería con Mención en Gerencia e Ingeniería de Mantenimiento tuvo como objetivo general de la tesis fue; reducir, en base a la selección y aplicación de un modelo de control de inventarios, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes. Para lo cual desarrolló

una investigación Analítica Explicativa, en base a una población de stocks de repuestos en el almacén los taladros de los lotes Z-1, denominados PER21 y PER28. Las conclusiones de esta investigación nos indican que:

1. Si bien en el análisis de esta tesis se ha despreciado el coeficiente de costo de desabastecimiento, en el futuro, cuando se disponga de mayor información, se debería realizar un análisis más profundo para estimar o determinar su valor, la información necesaria para estimar este parámetro debería incluir: historial de fallas de componentes, valores contractuales del tiempo no productivo y análisis de modos efectos de falla (AMEF).
2. Es recomendable que todo el material en las plataformas en mar que no ha tenido consumo durante el periodo de análisis (\$834,348.65) sea enviado a tierra, a menos que exista alguna razón subyacente para que permanezca en las ubicaciones operativas.

Becerra (2012) sustentó la Tesis *“El Análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero”*. Para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería con mención en Gerencia e Ingeniería de Mantenimiento en la ciudad Lima cuyo objetivo general fue: Optimizar en base a un análisis de confiabilidad, la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación de la planta concentradora Berna II, en el Centro Minero Casapalca, y los objetivos específicos fueron: (1) Determinar los equipos críticos de la línea de flotación utilizando la técnica del Análisis de Criticidad y (2) Evaluar las frecuencias o ciclos más convenientes (ciclos óptimos) para planificar y programar el mantenimiento preventivo de los equipos críticos de la línea de flotación, en base a un análisis de confiabilidad de los mismos, y costos de mantenimiento. El tipo de investigación realizada fue de carácter Analítica Explicativa. La investigación se realizó fundamentalmente con datos primarios, provenientes de la información proporcionada en forma directa por las 41 personas que trabajan en el área de mantenimiento de la Planta Concentradora Berna II, en el Centro Minero Casapalca. Dicha información consiste en el historial de fallas y de reparaciones de los equipos críticos de la línea de flotación obtenidos durante el año 2010. También se utilizó la encuesta como instrumento para la recolección de datos referente al grado de conocimiento del personal de mantenimiento de la planta sobre la temática de “confiabilidad de equipos y sistemas” así como de técnicas cualitativas y cuantitativas del mantenimiento. Las conclusiones de la investigación señalan que:

1. Efectuado el análisis de criticidad a los equipos de la línea de flotación, se determinó que existen cinco (05) equipos críticos, los cuales son: Las Celdas OK 50 N° 1 y N°2, las bombas SRL N°4 y 7. Finalmente el Molino 7' x 10'. Y además: Los valores de los tiempos medios entre fallos (TMEF) encontrados para los cinco (05) equipos críticos de la línea de flotación, no son recomendables para ser considerados como frecuencias o ciclos para el mantenimiento preventivo de los mismos, dado que para dichos tiempos 261 medios, la probabilidad de falla de los equipos es alta, ya que bordea el 50% (ver Tabla 2)

Tabla 2.

Equipos críticos de la línea de flotación

Equipo	TMEF (días)	Confiabilidad (%)
Celda Ok 50 N°1 de Bulk	62.81	49.9
Celda Ok 50 N°2 de Bulk	67.82	51.1
Bomba SRL 10X8 N°4	148.24	50.39
Bomba SRL 10X8 N°7	167.513	51.22
Molino 7' x 10'	147.22	50.81

Fuente: El Análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero.

Los tiempos medios de reparación (TMDR) de los equipos críticos de la línea de flotación, son pequeños, comparados con los tiempos medios entre fallos (TMEF). Esto conlleva a una alta probabilidad de disponibilidad de dichos equipos, tal como se muestra en la tabla adjunta:

Tabla 3.

Probabilidad de disponibilidad

	Celda Ok 50 N°1 de Bulk	Celda Ok 50 N°2 de Bulk	Bomba SRL 10X8 N°4	Bomba SRL 10X8 N°7	Molino 7' x 10'
MTEF (HORAS)	1,507.44	1,627.824	3,557.928	4,020.312	3,533.28
TMDR (HORAS)	6,333	6,833	2.5	2.5	7,166
Disponibilidad (%)	99.6	99.6	99.93	99.94	99.79

Fuente: El Análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero.

Sin embargo, de estos resultados, se llega a la conclusión, de que una alta disponibilidad de los equipos críticos de la línea de flotación no necesariamente implica que dichos equipos presenten alta confiabilidad.

2.2 Bases teóricas

A continuación, se presentan las bases teóricas que sustentan la investigación sobre herramientas de confiabilidad operacional para optimizar la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, en una planta concentradora de mineral.

El continuo desarrollo tecnológico en el siglo XXI, la industria y los sistemas industriales se han vuelto complejos y hacen que su disponibilidad sea más crítica. En este contexto, el soporte del producto y sus problemas relacionados, como las piezas de repuesto, juegan un papel importante. La falta de soporte oportuno, como la falta de piezas de repuesto cuando es necesario, es probable que cause tiempos de inactividad inesperados, que a su vez a menudo conducen a pérdidas incalculables. Por lo tanto, se debe enfatizar la importancia de predecir el soporte correcto para mantener el sistema funcionalmente disponible. En conclusión, se puede obtener el número requerido de piezas de repuesto en función de los parámetros técnicos y de vida (Ghodrati & Kumar, 2005).

Sobre el mismo tema Godoy (2014) sostiene que: "Las piezas de repuesto son de vital importancia para las industrias de equipos intensivos, como la minería,

Aeronáutica, o Defensa, ya que su función es apoyar eficientemente la operación de equipamiento y mejorar el rendimiento del sistema”.

Barabadi (2016) por su parte afirma que: “Debido a problemas tecnológicos y económicos, no es posible diseñar un sistema sin fallas. Por lo tanto, es necesario adoptar programas apropiados y actividades relacionadas con el soporte y las piezas de repuesto para garantizar el nivel deseado de disponibilidad a lo largo de la vida del sistema. Sin embargo, el aprovisionamiento de repuestos es un problema complejo y requiere un análisis preciso de todos los factores que pueden afectar el número requerido de piezas de repuesto. Se han desarrollado enfoques estadísticos basados en la confiabilidad para piezas de repuesto provisión. Los métodos se pueden categorizar en dos grupos principales; i) métodos analíticos, y ii) métodos de simulación. En la provisión de piezas de repuesto basadas en la confiabilidad, el primer paso es identificar el desempeño de la confiabilidad y tasa de falla del artículo. A partir de entonces, el número del repuesto requerido partes y la probabilidad de disponibilidad de piezas de repuesto se puede estimar. Sin embargo, tener una predicción efectiva, cualquier factor que tenga influencia en el rendimiento de confiabilidad del artículo debe ser considerado. El rendimiento de la confiabilidad de un elemento puede verse influido por diferentes factores, como el entorno operativo, la ubicación geográfica, el material de diseño, el historial de mantenimiento, habilidad del operador y del equipo de mantenimiento, etc.” (p. 498)

2.2.1 Gestión de Activos

Como todas las áreas del conocimiento, la gestión de los activos ha evolucionado considerablemente a lo largo del tiempo. Su evolución no ha sido fácil, ya que no solo ha tenido que dedicar grandes esfuerzos para su desarrollo, sino que, adicionalmente ha debido generar, tarea aún pendiente en muchas empresas, importantes cambios en la cultura de la organización empresarial, de manera de superar su enfoque tradicional que limitaba a ser una unidad operativa, para incorporar una nueva visión en la que asume un enfoque estratégico de mediano y largo plazo que aporta valor al negocio.

En sus inicios, la gestión de los activos estaba orientada a responder a las detenciones imprevistas, limitando su accionar reactivamente a actividades correctivas. En una siguiente etapa se caracterizó por la orientación a la prevención desde su forma más básica del tipo cíclico, pasando por la on-condition, hasta alcanzar formas aún más evolucionadas relacionadas con la predictiva. Por último,

y más recientemente surge una nueva manera proactiva de gestionar los activos físicos que incorpora la opción de mejora continua de los equipos y de los sistemas, con el objeto de aumentar la seguridad de funcionamiento de las instalaciones. Mejoras que, en general, no implican aumento del valor patrimonial de los activos, sino que, fundamentalmente, su valor radica en el mejoramiento de su performance asociada con la seguridad operacional a través del aumento de la confiabilidad y la mantenibilidad de los sistemas y los equipos (Amendola, Tibaire, Depool, Castillo, Borrell, & Sanchez, 2016).

En esta nueva forma de gestionar los activos se requiere de modelos y metodologías que permitan mejorar los sistemas de gestión y la genética de los equipos, de manera de minimizar los costos globales que resultan de la relación entre los costos directos y los costos de la falta de producción, debido a la no disponibilidad de los equipos, en una perspectiva de largo plazo que considera el costo durante todo el ciclo de vida de los activos.

El gran desafío de la gestión de los activos es cómo evolucionar desde una mirada restringida a lo reactivo, práctica aún habitual y naturalmente aceptada en las organizaciones, hasta una forma más proactiva, orientada a prevenir y mejorar de manera de propender hacia las cero detenciones, es decir, hacia la excelencia.

Para esta nueva manera de gestionar los activos se requiere superar la visión limitada al hacer, para incluir el pensar; restringida a la eficiencia, para agregar la eficacia; y condicionada a lo operativo, para alcanzar lo táctico-estratégico.

2.2.2 Confiabilidad

La confiabilidad se define como la probabilidad que un elemento funcione, sin fallar, durante un tiempo determinado bajo condiciones ambientales y de entorno preestablecidas. De la definición anterior, se desprende que un equipo, en cualquier instante de su vida, puede estar sólo en dos estados; en funcionamiento o en falla (detenido), bajo condiciones externas conocidas.

Cabe destacar que no siempre es sencilla la identificación de los estados de funcionamiento y fallas de un equipo o sistema. En el caso de equipos eléctricos y electrónicos, por ejemplo, es muy fácil esta identificación dadas las características binarias entre operación y fallas. Al contrario, en los sistemas mecánicos es más difícil hacer esta diferencia, ya que existen estados intermedios entre la falla y el

buen funcionamiento que puede afectar la producción en términos de calidad, cantidad y tiempo.

Fijadas las condiciones en las que se reconoce que el equipo o sistema está en falla bajo un entorno establecido, la confiabilidad de un elemento es función, solamente, del tiempo, cuyas características dependen única y exclusivamente de la distribución de probabilidades con la que la falla pueda modelarse en el tiempo. Dado lo anterior, se puede decir que el aumentar la confiabilidad, a mínimos costos globales, debe ser el objetivo de todo profesional que desarrollase un trabajo en áreas de proyecto y mantenimiento (Arata, 2009, pág. 45).

Una de las formas de aumentar la confiabilidad de un sistema es incrementando los costos de inversión, ya sea incorporando mejores equipos o por diseños que mejoren la continuidad de operación de las instalaciones. Cabe señalar que al aumentar el grado de confiabilidad, disminuyen los costos inherentes a las fallas (costos de mantenimiento) que implican un descenso en los costos asociados a los repuestos y a los derivados por la falta de producción. (Arata, 2009, p. 48).

En la Figura 2 se muestra la función de falla " $f(t)$ " o función de densidad probabilística de falla, que representa la probabilidad que un elemento falle en un instante de tiempo " t " cualquiera, también se muestra la probabilidad acumulada de falla " $F(t)$ ", que cuantifica la probabilidad que el equipo (o sistema) falle en el intervalo de tiempo $[0,t]$, además se muestra el área de la curva que representa, gráficamente, a la confiabilidad " $R(t)$ ".

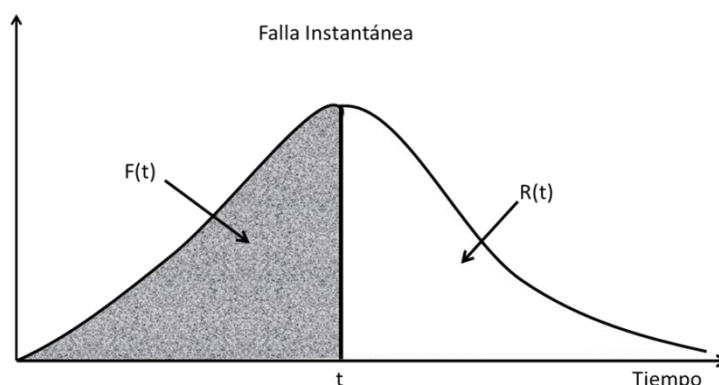


Figura 2. Representación de la función densidad de probabilidad de falla

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

La figura anterior muestra que la probabilidad acumulada de falla es:

Mientras que la confiabilidad está dada por:

Nótese que mientras más extenso sea el horizonte temporal "t", mayor es la probabilidad de falla y, por lo tanto, menor es la confiabilidad del equipo (o sistema).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - F(t)$$

Conocida, entonces, la ley de probabilidad que explica el comportamiento sobre la falla de un componente, es posible describir o identificar otro indicador importante de la seguridad de funcionamiento de un sistema. Este concepto es el tiempo medio entre fallas para equipos reparables o tiempo medio hasta la falla para los no reparables. Por definición el MTTF (Mean Time To Failure) o MTBF (Mean Time Between Failure) viene dado por:

$$\text{MTBF(o MTTF)} = \int_0^{\infty} t - f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

La confiabilidad de un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades. Este modelamiento depende de la etapa de vida en que se encuentre el equipo. A continuación, en la Figura 3. Se muestran las distintas etapas en la vida de los equipos.

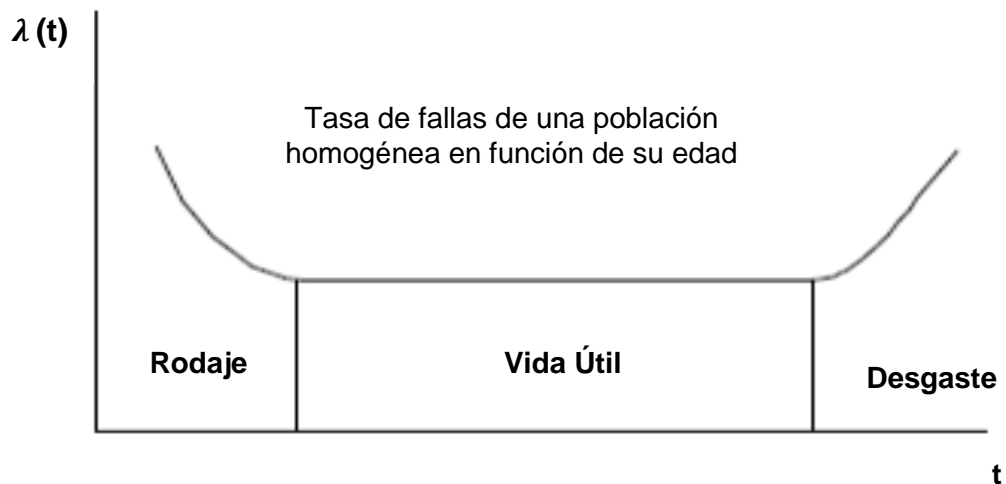


Figura 3. Ciclo de vida del equipo.

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

Las funciones de importancia, entonces, para la caracterización de la confiabilidad son $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ y $A(t)$, donde conocida una de ellas es posible establecer las demás.

Por otro lado, dada la curva de la bañera (Fig. 3.) es posible modelar el comportamiento en cada una de las tres etapas de la tasa de falla a través de leyes conocidas de probabilidades.

En la fase de rodaje la tasa de falla es decreciente y el modelo matemático que se adapta a esta situación se representa con la distribución de Weibull, donde $\lambda(t)$ está dada por:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Es importante destacar que debido a su gran capacidad de parametrización la distribución de probabilidad de Weibull es muy difundida en estudios de confiabilidad, dado que, dependiendo del valor de sus parámetros (α , β y γ), es posible modelar todos los estados en la vida de un elemento.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

En la fase vida útil, la tasa de fallas es sensiblemente constante. En este caso la función de confiabilidad toma la forma de:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

La que representa una curva exponencial negativa se desprende que la curva de densidad probabilística de falla está dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Luego, al integrar sobre "t", se tiene que la función de probabilidad acumulada de falla es:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

De lo anterior, y considerando, se puede decir que el tiempo medio entre fallas es:

Para el cálculo de la confiabilidad, la distribución exponencial, correspondiente a tasas de fallas constantes, tiene una importancia fundamental. Esta importancia radica, esencialmente, en dos cosas; primero es que los cálculos para este caso son notablemente sencillos, hecho de gran importancia al tratar sistemas complejos y, segundo, es que esta distribución es la ley típica de ocurrencia de los fenómenos puramente casuales; esto es, aquellos cuyas causas son exclusivamente accidentales.

En la fase de desgaste es posible utilizar una distribución normal para modelar las fallas producidas por desgaste o fatiga. Por lo tanto, las funciones $f(t)$, $\lambda(t)$ y MTBF vienen dadas por las ecuaciones presentadas a continuación:

$$f(t) = \left(\frac{1}{\sigma - \sqrt{2\pi}} \right) e^{-1/2 \left[\frac{1-\mu}{\sigma} \right]^2}$$

$$MTBF = m$$

$$\lambda(t) = \frac{e^{-1/2 \left[\frac{1-\mu}{\sigma} \right]^2}}{\int_t^{\infty} e^{-1/2 \left[\frac{1-\mu}{\sigma} \right]^2} dt}$$

Para el cálculo de las funciones $F(t)$ y $R(t)$ se deben considerar las dos primeras ecuaciones mencionadas anteriormente, respectivamente.

Para el modelamiento, matemático, de la confiabilidad las distribuciones Weibull, exponencial y normal, son muy relevantes dado que su consideración permite caracterizar cada uno de los períodos de la vida de un elemento, equipo o sistema. En la tabla 4 se representa un resumen de las funciones de densidad de probabilidad (de falla) comúnmente usadas para modelar la confiabilidad de componentes y sistemas. En el análisis de contabilidad es interesante recordar la hipótesis de que el elemento posterior a una detención por mantenimiento queda como nuevo (good as new).

Tabla 4.

Histograma de intervenciones

Intervalo (Horas)	N° de Fallas
0-50	5
51-100	12
101-150	14
151-200	25
201-250	52
251-300	28
301 - 350	19
351-400	14
401 - 450	12

Fuente: Elaboración propia

Considerando este histograma se tiene, por ejemplo, que 52 veces el componente debió ser reemplazado entre las 201 y las 250 horas. Se posee un registro de 181 reemplazos.

Considerando esta información se puede calcular la función de densidad de falla $f(t)$, de acuerdo al porcentaje de intervenciones realizadas en cada intervalo, respecto del total.

Tabla 5.

Cálculo de función de densidad de falla $f(t)$

Intervalo (Horas)	Nº de fallas	$f(t)$
0-50	5	0.02762
51-100	12	0.06630
101-150	14	0.07735
151 – 200	25	0.13812
201 – 250	52	0.28729
251 – 300	28	0.15470
301 – 350	19	0.10497
351-400	14	0.07735
401 – 450	12	0.06630

Fuente: Elaboración propia

Continuando con esta lógica se puede calcular la función acumulada de falla $F(t)$, considerando la sumatoria de las $f(t)$ hasta el respectivo intervalo, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.

Cálculo de función acumulada de falla $F(t)$

Intervalo (Horas)	Nº Fallas	$F(t)$	$F(t)$
0-50	5	0.02762	0.02762
51-100	12	0.06630	0.09392
101-150	14	0.07735	0.17127
151-200	25	0.13812	0.30939
201 - 250	52	0.28729	0.59669
251-300	28	0.15470	0.75138
301 -350	19	0.10497	0.85635
351-400	14	0.07735	0.93370
401-450	12	0.06630	1.00000

Fuente: Elaboración propia

Complementario al cálculo de la $F(t)$, se pueden establecer los valores correspondientes a la confiabilidad $R(t)$, como el complemento de $F(t)$ para llegar a 100 %.

Tabla 7.

Cálculo de confiabilidad $R(t)$

Intervalos (horas)	N° Fallas
0-50	5
51-100	12
101 - 150	14
151 - 200	25
201-250	52
251 - 300	28
01 - 350	19
351-400	14
401 - 450	12

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, una vez obtenidos los valores de confiabilidad, se puede establecer el valor de la tasa de falla $i(t)$ para cada intervalo, considerando el valor de $f(t)$ para ese periodo en relación a la confiabilidad al inicio de ese intervalo (final del intervalo anterior) $R(t-1)$.

Tabla 8.

Cálculo de tasa de falla $I(t)$

Intervalo (horas)	N° Fallas
0-50	5
51-100	12
101 -150	14
151-200	25
201-250	52
251-300	28
301-350	19
351-400	14
401 – 450	12

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla final se encuentran los valores correspondientes a cada periodo, para los indicadores de confiabilidad y falla. Por ejemplo, para el intervalo entre las 201 y 250 horas se tiene que:

Se producen 52 de fallas de un total de 181 intervenciones. La probabilidad de falla en ese intervalo es de 28,279%. $f(t)$. El componente tiene una probabilidad de 59,669% de fallar antes de las 250 horas. $F(t)$. El componente tiene una probabilidad de 40,331% de funcionar sin fallar antes de las 250 horas. $R(t)$. De todos los componentes que funcionan sin fallar hasta las 200 horas, 41,600% falla antes de las 250 horas. $X(t)$.

$$R_s(t) = f(R_i(t)) \forall t: 1 \rightarrow \infty$$

La confiabilidad es función de la complejidad del sistema. Entonces, es fundamental establecer esta relación para cada configuración. En otras palabras, se trata de definir la forma en que cada componente individual afecta el buen funcionamiento del sistema.

Donde $R_g(t)$ representa la confiabilidad del sistema y $R_i(t)$ la de cada uno de los "n" elementos componentes del sistema "S". La importancia de la confiabilidad del conjunto viene dada por lo siguiente:

Si se conoce el comportamiento de cada componente, se puede deducir el comportamiento del sistema.

Es posible jerarquizar sobre la base de componentes críticos. Evaluar el efecto del mantenimiento de un componente sobre el sistema. Orientar las estrategias de mantenimiento para el sistema. Proyectar los sistemas con características óptimas mediante la duplicación de algunos factores.

La confiabilidad de un sistema no es otra cosa que la probabilidad de "no falla" que, a su vez, depende del comportamiento de los componentes individuales; en consecuencia, las reglas aplicables a la combinación de probabilidad de elementos son aplicables a la combinación de confiabilidad en sistemas.

2.2.3 Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la

toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual. El mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación o de sus sistemas y componente, está asociado con cuatro aspectos fundamentales: confiabilidad humana, confiabilidad del proceso, confiabilidad del diseño y la confiabilidad del mantenimiento.

Para determinar si un activo es crítico o no, se debe considerar el grado de importancia de este elemento en la operación y las consecuencias de su ausencia o falla. En algunos casos, el mismo activo puede ser crítico o no, dependiendo de su aplicación y las condiciones de sustitución por un back up en caso de falla.

El hecho de que un activo sea o no considerado como crítico es directamente proporcional a la función que este posee en el negocio. Entonces, algunos activos pueden ser definidos como críticos en algunas empresas y como no críticos en otras. Para el caso de la gestión de activos, el definir claramente qué activos son críticos y cuáles no lo son es fundamental, debido a que a los primeros merecen un monitoreo más intenso y específico. Cabe resaltar que la importancia del monitoreo y seguimiento que se realiza a los activos críticos y no críticos no sólo es de manera individual, sino también grupalmente.

Lamentablemente, difícilmente se disponen de recursos ilimitados, tanto económicos como humanos, para poder mejorar al mismo tiempo, estos cuatro aspectos en todas las áreas de una empresa. ¿Cómo establecer que una planta, proceso, sistema o equipo es más crítico que otro? ¿Qué criterio se debe utilizar? ¿Todos los que toman decisiones, utilizan el mismo criterio? El análisis de criticidades da respuesta a estas interrogantes, dado que genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado, diferenciando tres zonas de clasificación: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Una vez identificadas estas zonas, es mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos ó elementos que formen parte de la zona de alta criticidad. Los criterios para realizar un análisis de criticidad están asociados con: seguridad, ambiente, producción, costos de operación y mantenimiento, tasa de fallas y tiempo de reparación principalmente (Huerta, 2018).

Estos criterios se relacionan con una ecuación matemática, que genera puntuación para cada elemento evaluado. La lista generada, resultado de un trabajo de equipo, permite nivelar y homologar criterios para establecer prioridades, y focalizar el esfuerzo que garantice el éxito maximizando la rentabilidad. (Huerta, 2018)

El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente. En función de lo antes expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad los siguientes:

- Seguridad
- Ambiente
- Producción
- Costos (operacionales y de mantenimiento)
- Tiempo promedio para reparar
- Frecuencia de falla.

Un modelo básico de análisis de criticidad, es equivalente al mostrado en la figura 4. El establecimiento de criterios se basa en los seis (6) criterios fundamentales nombrados en el párrafo anterior. Para la selección del método de evaluación se toman criterios de ingeniería, factores de ponderación y cuantificación.

Para la aplicación de un procedimiento definido se trata del cumplimiento de la guía de aplicación que se haya diseñado. Por último, la lista jerarquizada es el producto que se obtiene del análisis.

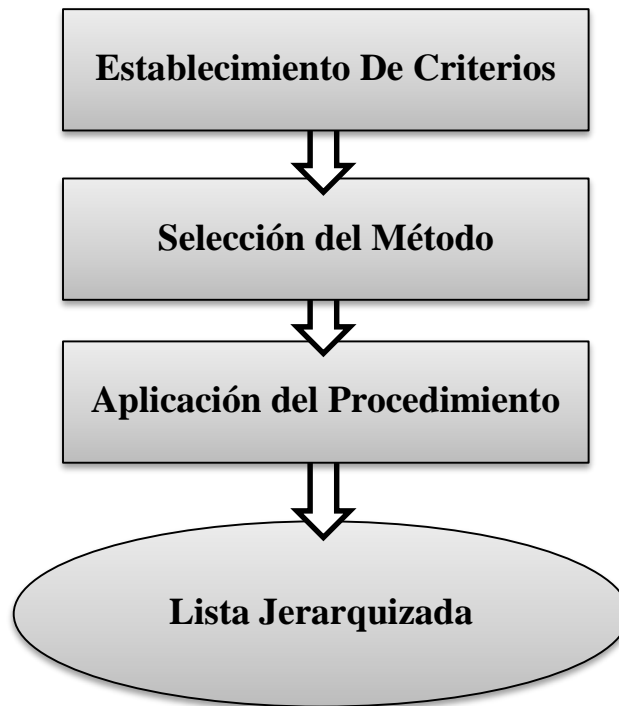


Figura 4. Modelo básico de criticidad

Fuente: El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional

Emprender un análisis de criticidad tiene su máxima aplicabilidad cuando se han identificado al menos una de las siguientes necesidades:

- Fijar prioridades en sistemas complejos
- Administrar recursos escasos
- Crear valor
- Determinar impacto en el negocio
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos:

- Mantenimiento
- Inspección
- Materiales
- Disponibilidad de planta

- Personal

2.2.3.1 En el ámbito de mantenimiento

Al tener plenamente establecido cuales sistemas son más críticos, se podrá establecer de una manera más eficiente la priorización de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo, correctivo, detectivo e inclusive posibles rediseños al nivel de procedimientos y modificaciones menores.

2.2.3.2 En el ámbito de inspección

El estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones y ayuda en los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujo, etc.), así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

2.2.3.3 En el ámbito de materiales

La criticidad de los sistemas ayuda a tomar decisiones más acertadas sobre el nivel de equipos y piezas de repuesto que deben existir en el almacén central, así como los requerimientos de partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de planta, es decir, podemos sincerar el stock de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

2.2.3.4 En el ámbito de disponibilidad de planta

Los datos de criticidad permiten una orientación certera en la ejecución de proyectos, dado que es el mejor punto de partida para realizar estudios de inversión de capital y renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, basados en el área de mayor impacto total (Huerta, 2018)

2.2.4 Ingeniería de la confiabilidad

La ingeniería de la Confiabilidad representa la expresión organizacional cuya tensión está orientada hacia la solución de los problemas del diseño, de la gestión

y del mantenimiento de los activos a través de un enfoque rigurosamente científico y racional.

Es la mente de la organización y opera transversalmente en ella, desarrollando y gestionando el conocimiento en lo que respecta con la gestión de los activos. El concepto identifica el conjunto de principios, modelos, técnicas, procedimientos y herramientas relacionadas con la Confiabilidad Operacional en el ámbito del diseño, del proyecto, de la gestión y de la organización, que permiten afrontar el tema de los activos físicos con el objeto de lograr importantes mejoras de la eficiencia, la eficacia y la efectividad, buscando asegurar la competitividad sustentable en las empresas intensivas en equipos.

Las funciones fundamentales de la Ingeniería de la Confiabilidad, que actúan de forma integrada, son:

- Proyectar la gestión de los activos a través de la definición de la estrategia representada por la definición del mix de políticas, el establecimiento de las condiciones técnico-económicas óptimas y la estandarización de los ciclos de trabajo, lo que se manifiesta, de manera concreta, en la dinamización permanente de los planes productivos de mantenimiento.
- Controlar técnica y económicamente el sistema relacionado con la gestión de los activos a través de KPI's, que permitan seguir la evolución histórica y la proyección de comportamiento de los equipos y de los sistemas a través del análisis de los propios resultados, como también por medio del benchmarking con realidades de referencia.
- Mejorar continuamente la gestión de los activos a través de la búsqueda permanente de oportunidades de mejoras, considerando de manera integrada el comportamiento de los KPI's relacionados con la confiabilidad, la mantenibilidad y la logística correspondiente, de los equipos y su impacto sobre el negocio. Las oportunidades de mejoras, evaluadas técnica y económicamente, al ser implementadas cumplen con la dinamización del plan productivo de mantenimiento.

La Ingeniería de la Confiabilidad es la actividad que permite relacionar los costos directos y de capital con los beneficios asociados al mejoramiento de la confiabilidad operacional de las instalaciones.

En consecuencia, es aquella área del conocimiento que permite transformar el mantenimiento como centro de gastos hacia la gestión de los activos como unidad

de resultado, por lo que intenta superar su focalización en corto plazo, limitada a mejorar la eficiencia, para alcanzar un rol táctico-estratégico de mediano y largo plazo, que busca influir además en la eficacia, contribuyendo así con el mejoramiento de la competitividad.

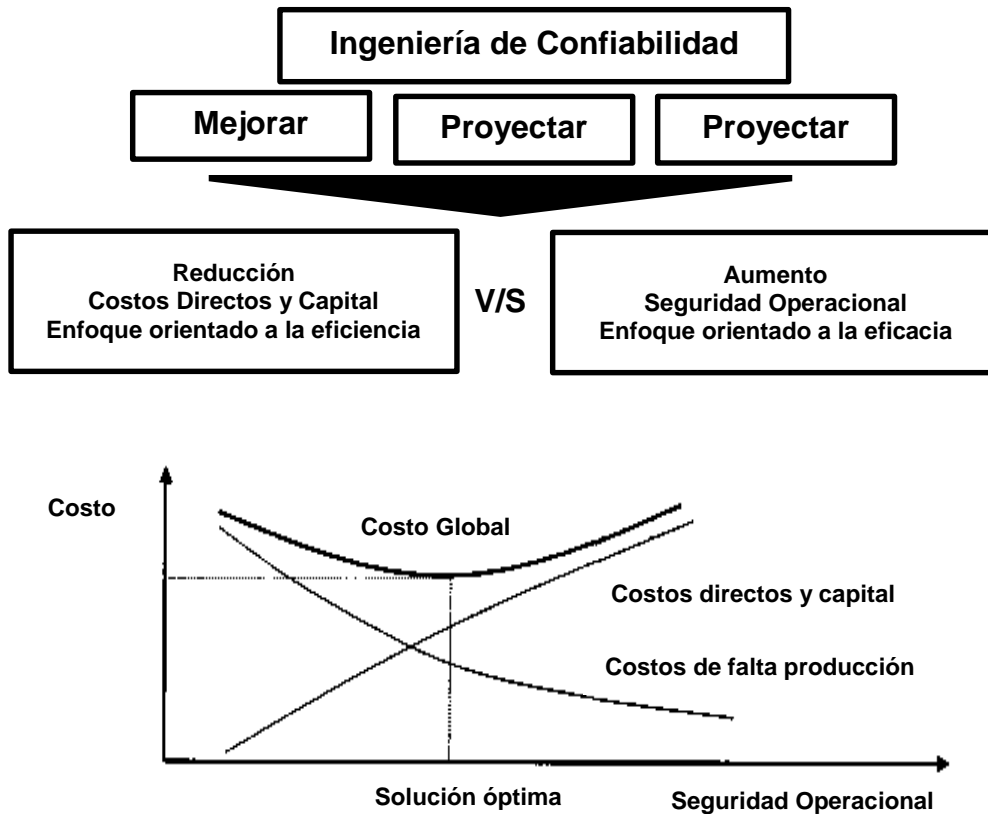


Figura 5. Costos directos y de capital v/s seguridad operacional

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

Para cumplir con esta tarea, la Ingeniería de la Confiabilidad requiere contar con herramientas rigurosas que permitan determinar indicadores para la identificación de oportunidades de mejoras. Entre ellos, uno básico para materializar la Ingeniería de la Confiabilidad es la cuantificación del costo de ineficiencia que resulta de la falta de producción a nivel del sistema, debido a la no disponibilidad de los equipos que lo componen.

El costo de ineficiencia se obtiene de la facturación que se deja de hacer menos los costos variables que se dejan de gastar durante el periodo de tiempo en el que los equipos no están operativos por situaciones no previstas, lo que es equivalente a la

suma de los costos fijos más las utilidades. Por lo tanto, el costo de ineficiencia no es un flujo real de dinero, sino que representa un ingreso que se deja de recibir cuyo valor depende de la detención no programada de los equipos; producto de la confiabilidad, mantenibilidad y utilidad; y de su impacto económico sobre el sistema de acuerdo al nivel de redundancia de las configuraciones de los diagramas de proceso (stand-by, paralelo, redundancia parcial, fraccionamiento, stock-pile, work in process) que representan la planta o la flota de equipos. El costo de ineficiencia se obtiene del costo de la falta por el tiempo de detención no programado.

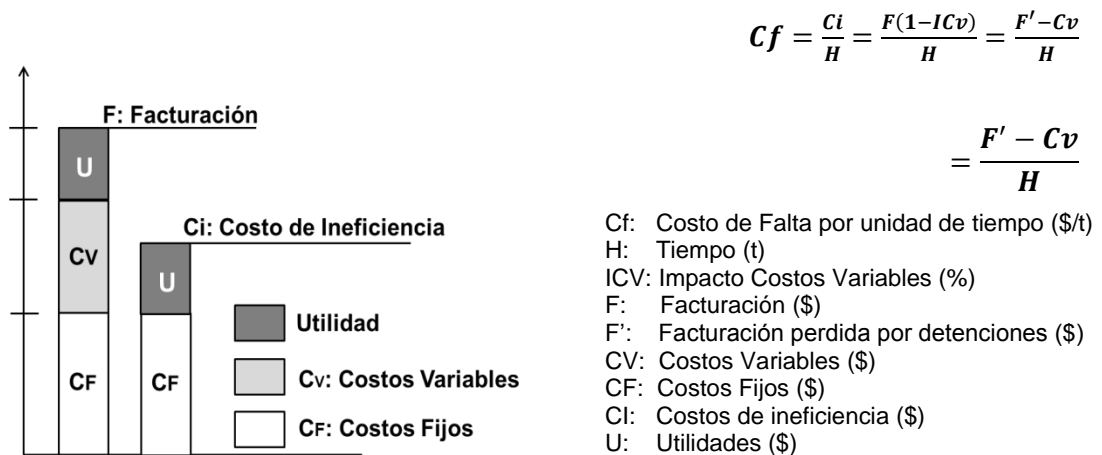


Figura 6. Costo de ineficiencia.

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

Los costos de ineficiencia se reflejan a nivel sistémico ya que son producto del impacto de las *detenciones* no programadas de los diferentes equipos en el tiempo, sobre el resultado del negocio. Si bien el costo de ineficiencia es a nivel del sistema, su origen se encuentra en los elementos críticos que lo constituyen, sobre los cuales es necesario aplicar las políticas de inspección, control, reemplazo o reparación en beneficio del negocio. Por lo que la criticidad de un componente o equipo es resultado no solo de su disponibilidad, producto de la frecuencia de detenciones (probabilidad de falla) y los tiempos de reincorporación (reparabilidad), sino también de la configuración de los procesos (nivel de redundancia) y del costo de la falta y calidad de producción por unidad de tiempo (consecuencia).

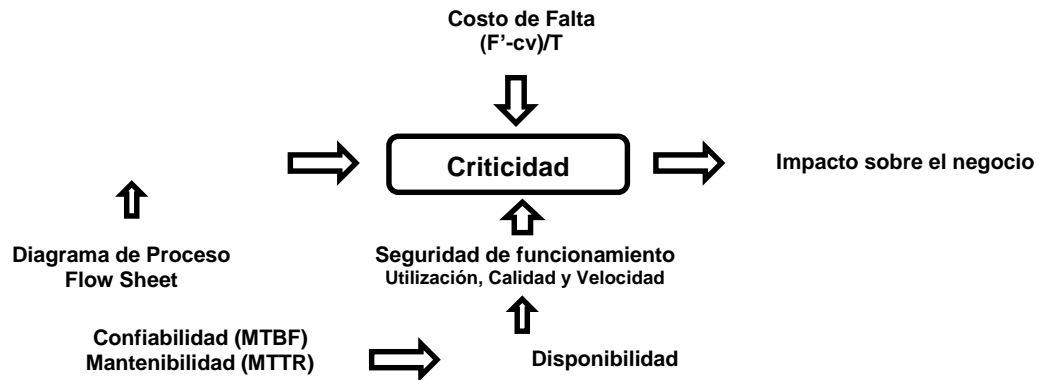


Figura 7. Criticidad de los equipos

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

Como indicador para identificar si el origen de la criticidad está en los equipos o en el arreglo sistémico, se puede utilizar el diagrama de la «No disponibilidad del equipo - Consecuencia en el sistema», en el que se presentan las curvas de iso-criticidad (iso-costo de ineficiencia). Para determinar si la criticidad de un equipo se debe a la confiabilidad o a la mantenibilidad (equipo agudo o crónico), se usa normalmente la matriz de dispersión, que combina estas dos variables para identificar si el equipo tiene problemas de carácter agudo, crónico, o ambos.

Como también la matriz de los costos, seguridad y el ambiente permite identificar el efecto de un modo de falla en los resultados económicos y el impacto sobre la contaminación ambiental y la seguridad de las personas, aportando una visión de la criticidad relacionada no solo con los resultados económicos (ROA), sino también con aspectos sociales (RSE) que permite un desarrollo sustentable.

Un indicador que permite desagregar de manera clara el origen del costo de ineficiencia es el OEE (Overall Equipment Effectiveness). Este presenta el porcentaje del tiempo que un equipo produce realmente, de acuerdo a las condiciones de cantidad y calidad establecidas en el periodo que fue planeado para hacerlo.

Si bien existen muchos otros de gran valor, el OEE es un buen indicador para la Ingeniería de la Confiabilidad, ya que permite determinar la eficiencia de las instalaciones y de los equipos identificando con claridad el origen de ella a través de la búsqueda de las seis grandes pérdidas que resultan de las detenciones no planificadas (de operaciones y mantenimiento), de la velocidad y de la calidad.

La Ingeniería de la Confiabilidad, más allá de su valor asociado con el mejoramiento del diseño y de la gestión de los activos sobre la base del modelo de la Confiabilidad Operacional, cumple con un papel integrador entre las diferentes funciones empresariales. Es así como se relaciona con el mantenimiento a través de la disponibilidad; con la producción por medio de la productividad; con abastecimiento en la identificación de y la gestión de los repuestos críticos; con la ingeniería por su rol en la seguridad de funcionamiento durante todo el ciclo de vida de las instalaciones; con recursos humanos por las competencias laborales requeridas para la operación y el mantenimiento de los equipos; y con la seguridad, por su contribución con el cuidado de las personas y el ambiente (Arata, 2009, pág. 63).

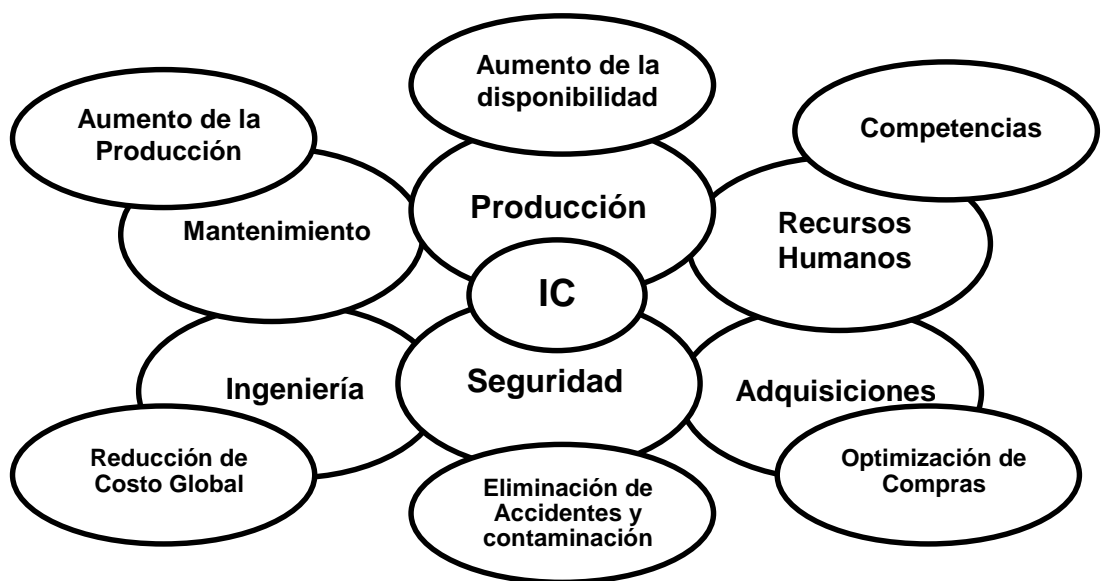


Figura 8. Factor integrador de la Ingeniería de la Confiabilidad

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales

El aporte concreto de la Ingeniería de la Confiabilidad al negocio solo se materializa cuando, a partir del comportamiento histórico de los equipos, se identifican, se evalúan y, finalmente, se implementan las oportunidades de mejoras, quedando reflejadas en el Plan Productivo de Mantenimiento. En caso contrario su contribución queda limitada al tratamiento de datos y de información sin la generación de valor en beneficio del resultado del negocio.

Estas oportunidades de mejoras pueden ser en el ámbito de la gestión como del proyecto. A modo de ejemplo, en el ámbito de la gestión es posible identificar mejoras relacionadas con la definición de estrategias de producción, con la determinación de mix de políticas de mantenimiento, con la gestión de repuestos

críticos, con los intervalos de inspección, con la participación de terceros, con programas de capacitación, etc. Por su parte, en el ámbito del proyecto se puede mencionar como alternativas de mejoras el aumento de las redundancias, las políticas de reemplazo de equipos, el incremento de la Confiabilidad y la mantenibilidad de equipos, el fraccionamiento de instalaciones, la determinación de stock pile y work in process, etc.

La cadena de valor de la Ingeniería de la Confiabilidad parte del dato producto de un evento (para una instalación en operación) o del benchmarking (para un nuevo proyecto), y Analiza a través de la materialización de su aporte en el plan productivo de mantenimiento. En este proceso de las diferentes actividades de la cadena de valor (dato, KPPs, oportunidades, evaluación e implementación), el dato y la identificación de la oportunidades de mejoras son aquellas actividades de carácter estratégico por lo que no pueden ser externalizables, en cambio el resto, independiente de su complejidad, como es el caso de la obtención de KPPs, podrían ser aportadas por terceros especialistas en la materia, integrados fuertemente con la organización demandante del servicio.

Las principales tareas de la Ingeniería de la Confiabilidad se pueden resumir en las siguientes:

- Establecer la estrategia de la gestión de los activos a través de la definición del mix de las políticas de mantenimiento y de las técnicas más adecuadas a nivel de los componentes básicos, entendido como los elementos inspeccionables, reparables y reemplazables, según las condiciones específicas, tanto internas como externas.
- Dinamizar el Plan Productivo de Mantenimiento a través de su actualización permanente considerando el comportamiento histórico, la evolución y la proyección del comportamiento de los componentes críticos, de manera de poder determinar los recursos materiales y de personas (propias y de terceros) necesarios para asegurar una gestión de los activos, no solo eficiente, sino también eficaz y efectiva.
- Definir las acciones para el mejoramiento de la confiabilidad y la mantenibilidad en beneficio de la mejorar de la disponibilidad, la utilización y la capacidad productiva de las instalaciones industriales.
- Desagregar el origen de los problemas de manera de poder definir las acciones de producción, mantenimiento, abastecimiento, personal e ingeniería

relacionados con los componentes básicos que constituyen los sistemas que impactan el negocio.

- Promover la estandarización a los sistemas de gestión e informativos y colaborar en la definición de las unidades técnicas, del punto de vista de la seguridad operacional, para la codificación de los componentes.
- Establecer los manuales de gestión de los activos en el que se definan de manera consensuada las métricas, los KPI's y los criterios, de forma de facilitar el análisis y los procesos de benchmarking.
- Obtener los KPI'S que permitan identificar las oportunidades de mejoras, a partir del comportamiento histórico, la evolución y la proyección de los equipos críticos.
- Definir la política de abastecimiento de los repuestos relacionados con los equipos críticos.
- Valorizar los costos de la falta de producción, como consecuencia de detenciones de producción no programadas y de las fallas, de forma de transformar la gestión de activos de una unidad asociada a los gastos a otra que permita mejorar el resultado del negocio.
- Colaborar con el desarrollo de nuevos proyectos de capital, de manera de incorporar la confiabilidad operacional en el análisis y en el estudio de alternativas relacionadas con la confiabilidad y la mantenibilidad de los equipos y de las configuraciones de las instalaciones, durante todo el ciclo de vida.
- Contribuir con la política de reemplazo de equipos de acuerdo a su diagnosticabilidad, confiabilidad y mantenibilidad.
- Establecer los niveles de redundancia de los sistemas a través de la incorporación de equipos de respaldo, del fraccionamiento de las instalaciones y del dimensionamiento de stock pile y de work in process.
- Realizar análisis de riesgo e impacto ambientales en relación a la operación de los equipos y del efecto de las variaciones del entorno.
- Promover el desarrollo y el mejoramiento de los métodos de trabajo y de las competencias de los operadores y de los mantenedores.
- Ser el referente cultural de toda la organización en relación a la gestión de los activos.

La Ingeniería de la Confiabilidad, que busca dinamizar el proceso de mejoramiento continuo de la gestión de los activos a través del conocimiento, de la inteligencia y del análisis cuantitativo, se manifiesta tanto en la concepción y el desarrollo de nuevos proyectos de capital como durante el ejercicio de plantas industriales y de flotas de equipos, alimentándose, para el caso de proyectos, de información

proveniente del comportamiento de los equipos de otras instalaciones operando en condiciones similares (benchmarking) y, para el ejercicio, de información histórica generada del funcionamiento de los equipos de la propia instalación (evento).

No son pocos los casos en los que proyectos industriales no alcanzan las capacidades operacionales para las cuales fueron diseñados, con el efecto negativo que esto significa para los inversionistas, ya que los niveles de producción no alcanzan las condiciones estándar reduciendo los ingresos o, como solución a esta condición, se debe aumentar los costos operacionales para compensar las deficiencias, influyendo negativamente los resultados del negocio.

Es posible establecer que es más conveniente encontrar la mejor solución genética a nivel del proyecto de ingeniería, que subsanar los errores durante la construcción y la operación de las instalaciones a través de permanentes modificaciones o por medio de exigentes sistemas de gestión y control.

También ocurre, no pocas veces, que proyectos en su etapa de proyecto, por estimaciones aproximadas y por definiciones inadecuadas, no logran la rentabilidad exigida, por lo que son erróneamente rechazados perdiéndose, de esta manera, buenas oportunidades de inversión. Es práctica común que para la evaluación de nuevos proyectos los costos de mantenimiento se obtengan solo en función de los costos de capital y de manera lineal, no considerando que un incremento de las inversiones; producto de equipos más confiables y mantenibles, de sistemas más robustos por mayor nivel de redundancia y de distribuciones de equipos con mejor acceso; podría mejorar la seguridad de funcionamiento (disponibilidad y utilización) de los equipos, reduciendo los costos de ineficiencia durante todo el ciclo de vida de las instalaciones. Es conveniente recordar que los CAPEX son muy inferiores a los OPEX en la perspectiva de todo el horizonte del proyecto, por lo que ahorros a nivel de inversiones por equipos menos seguros no necesariamente implican mejoras en sus resultados económicos, por el contrario, puede representar una mala decisión que es necesario resolver en la etapa de operación de los proyectos con las implicaciones de costos que esto significa.

A través de la Ingeniería de la Confiabilidad, en la fase de proyecto se busca optimizar el uso de los activos exigiendo que cada uno de los elementos que componen una instalación sean cuellos de botella no solo en términos de sus capacidades nominales, sino respecto a sus criticidades sistémicas (efecto sobre el negocio), determinadas por la combinación entre la seguridad de funcionamiento,

el impacto productivo y el valor de los activos, de manera de reducir el costo global durante todo el ciclo de vida de los activos, que resulta de la suma de los costos en moneda equivalente (valor temporal del dinero) relacionados con los CAPEX (costos de capital) y de los OPEX (costos operacionales), considerando para estos últimos los costos de transformación (fijos y variables) más los costos de ineficiencia que resultan de la pérdida de producción por no utilización de las instalaciones debido a las detenciones operacionales y de mantenimiento no programadas, y por problemas de calidad en la producción y de velocidad de los procesos.

Es posible establecer que para aumentar la seguridad de funcionamiento, por el mejoramiento de la confiabilidad y la mantenibilidad de los equipos, se incrementan los costos de capital y costos de desarrollos y se reducen los costos de operación asociados con las pérdidas de producción, con el mantenimiento y con el cierre de las instalaciones.

La Ingeniería de la Confiabilidad en el desarrollo de proyecto tiene como objetivo especificar las condiciones de la Confiabilidad Operacional de las instalaciones en las distintas etapas del proyecto, con mayor atención es las etapas tempranas del desarrollo:

- En la Ingeniería Conceptual tiene la tarea de evaluar los parámetros a nivel macro de las diversas alternativas del proceso, con el enfoque de la Confiabilidad Operacional y los costos durante todo el ciclo de vida de los activos (LCC).
- En la Ingeniería Básica le corresponde definir las condiciones de base para el proyecto de la alternativa seleccionada y formalizar el proyecto del proceso, las especificaciones de los equipos principales, la definición del lay out de las instalaciones, el presupuesto de inversión, los parámetros de la performance, los costos y el análisis económico.
- En la Ingeniería de Detalles debe poner atención en los diseños y las especificaciones definitivas de las instalaciones y de los equipos, así como en la elaboración de los documentos y los planes de producción y mantenimiento.
- En la Ingeniería de Resultados le corresponde realizar el seguimiento de la performance de los equipos, de manera de evaluar, en términos de su seguridad operacional, las estimaciones realizadas a nivel de proyecto respecto su comportamiento real, como también generar una base datos confiables para ser utilizadas en procesos de benchmarking.

En síntesis, la Ingeniería de la Confiabilidad en fase de proyecto puede aportar significativamente al análisis de diferentes alternativas con una mirada distinta, a través y complementariamente a la manera tradicional en que se aborda este tipo de estudio, por lo que representa un factor diferenciador y de gran valor que permite la búsqueda de la mejor solución en la perspectiva de todo el ciclo de vida de los proyectos. Entre las áreas en que puede contribuir y agregar valor es posible mencionar:

- Decisión sobre el costo de capital en relación a la falta de producción,
- Determinación de la seguridad operacional e impacto ambiental,
- Modelación y simulación para determinar la disponibilidad y utilización,
- Definición sobre la distribución de equipos en planta,
- Identificación de planes de producción y estrategia de mantenimiento,
- Análisis de riesgo e incertidumbre producto de variables internas y externas,
- Definición de niveles de redundancias, determinación de niveles de stock pile y work in process;
- Selección de equipos incorporando la variable seguridad operacional,
- Definición y gestión de repuestos críticos,
- Decisión sobre el nivel de descentralización de los servicios,
- Determinación del nivel de fraccionamiento de las instalaciones,
- Definición de política de tercerización.

Durante el ejercicio las condiciones operacionales de las instalaciones industriales están cambiando continuamente, por lo que es fundamental su evaluación permanente de manera de mejorar el desempeño de los activos en beneficio del resultado de negocio, a través de decisiones oportunas en relación a:

- Las estrategias productivas, de mantenimiento y de abastecimiento;
- Los procedimientos y herramientas;
- Las nuevas tecnologías y los sistemas informáticos de apoyo;
- El reemplazo o adecuación de los equipos;
- La transformación de los sistemas productivos; y
- La definición de los programas formativos.

Para mostrar el efecto del cambio de las condiciones externas sobre las decisiones internas de la empresa, es posible establecer que, en la medida que el precio de un producto aumenta los costos de la falta de producción también se incrementan para

un determinado tiempo de detención no programado. Por lo que, para este ejemplo, aplicar una política de prevención más rigurosa y costosa puede representar una solución más conveniente desde el punto de vista del costo global (costo directo más costo de ineficiencia).

Entre las condiciones que cambian, considerando solo algunas de ellas relacionadas con la gestión de los activos, es posible mencionar:

- Variaciones del comportamiento de los equipos producto del ciclo de vida en que se encuentran.
- Variabilidad de las características operacionales del proceso debido a las alteraciones de las variables que regulan, como las materias primas.
- Cambiantes condiciones del entorno impuestas por el mercado pueden alterar tanto los costos de producción como los ingresos, debido a las variaciones de los precios.
- Modificación de los factores ambientales que pueden alterar el sistema productivo.

El intentar prever este tipo de cambios a través de la Ingeniería de la Confiabilidad puede permitir adecuar oportunamente las estrategias de producción, mantenimiento y abastecimiento; las formas de gestionar los activos y las personas; y los equipos y las instalaciones industriales, de manera de anticiparse a los imprevistos y las emergencias que afectan los sistemas productivos, la seguridad de la personas y el cuidado del medio ambiente, perjudicando no solo los resultados económicos del negocio (ROA), sino también su imagen relacionada con la responsabilidad social empresarial (RSE).

Al igual que los ingenieros de proyectos de capital, los profesionales encargados de la operación y el mantenimiento de las instalaciones, relacionadas con plantas industriales como con flotas de equipos, en general tampoco han internalizado a la Ingeniería de la Confiabilidad para mejorar la gestión de los activos, orientándola a obtener mejores resultados como consecuencia del aumento de los ingresos y de la reducción de los gastos, al tener mayor control de sus equipos y de los sistemas.

Esta debilidad, casi generalizada en las organizaciones industriales, responde a la insensibilidad de muchos de los profesionales y ejecutivos que operan, mantienen y dirigen empresas sobre las oportunidades que ofrece una adecuada gestión de los activos durante su ejercicio; oportunidades que se relacionan con los posibles

ahorros de los gastos producto de la gestión de los equipos (es normal encontrar valores por sobre el 25% y de hasta el 40%, de los costos operacionales en empresas intensivas en activos físicos), así como por los potenciales incrementos de los ingresos por una mejor y mayor utilización de los equipos y las instalaciones.

El problema radica en que los ejecutivos han visto en la gestión de los activos un gasto, por lo que en su tratamiento exigen eficiencia. Diferente sería si se la viera como una opción que puede contribuir con los resultados, convirtiéndose en un factor de competitividad.

Los operadores difícilmente asumen el costo asociado con el mal uso de los equipos, ya que tienen una visión de corto plazo respecto a los activos involucrados en su proceso, limitándose, en general, a cumplir con los planes de producción sin considerar el valor patrimonial de los equipos que les corresponde operar.

Por otro lado, los mantenedores se orientan preferentemente a ejecutar mantenimiento de manera reactiva más que a estudiar cómo evitar los daños, no solamente a través de una actitud preventiva, sino también proactiva orientada al mejoramiento continuo de las prestaciones de los equipos interviniéndolos incluso genéticamente.

Los profesionales de abastecimiento han privilegiado una gestión orientada a reducir los costos de adquisición y los costos financieros, en una perspectiva de corto plazo. No se utiliza una visión de largo plazo en la que se considere la seguridad operacional como un factor que afecta el costo de la falta de producción.

La Ingeniería de la Confiabilidad es la forma de superar estas debilidades a nivel del ejercicio, ya que aporta valor a la gestión de los activos e integra las diferentes funciones de la organización relacionadas con esta importante área en empresas intensivas en el uso de equipos en sus procesos productivos (Arata, 2009, pág. 78).

En el ámbito de la operación, la Ingeniería de la Confiabilidad es la actividad que extiende el ciclo de la gestión de los activos desde el enfoque tradicional limitado al cumplimiento eficiente del Plan Productivo de Mantenimiento hacia un nuevo enfoque que busca su dinamización y actualización a través de un proceso de mejoramiento continuo, de forma de lograr una gestión eficaz que contribuya con la competitividad sustentable perseguida por la empresa.

Es la unidad de la Ingeniería de la Confiabilidad la que permite; a partir del comportamiento de los equipos y sus componentes principales, y con los correspondientes modos de fallas, causas y consecuencias; definir las inspecciones y las intervenciones, generando la estrategia para la gestión de los activos (mix de políticas de mantenimiento) contenidas en el Plan Productivo de Mantenimiento.

Es oportuno recordar que, si bien lo que se busca mejorar el resultado del negocio, es decir, visualizar el impacto a nivel del sistema, es requerimiento básico focalizar las políticas a nivel de los componentes inspeccionados, reparables o reemplazables de los equipos críticos.

Es importante mencionar que, para equipos complejos, no más del 4 por mil (un par de decenas) de los componentes definen su seguridad operacional por sobre un 90 %. La Ingeniería de la Confiabilidad es la que permite cerrar el ciclo del mejoramiento continuo de la gestión de los activos durante el ejercicio, ya que a partir de los datos históricos recabados de la operación de los equipos se realiza un análisis para identificar las oportunidades de mejora (beneficios y ahorros), las que después de su evaluación técnica y económica podrán ser implementadas en el Plan Productivo de Mantenimiento. Recién al cierre del ciclo de mejoramiento continuo, orientado a la dinamización (actualización permanente) del plan, se manifiesta la contribución de la Ingeniería de la Confiabilidad al negocio, en caso contrario su rol se limita a generar KPPs a partir de los datos, sin generar mayor valor.

En consecuencia, el vínculo entre la Ingeniería de la Confiabilidad, orientada a contribuir con la eficacia (visión estratégico-táctica), y la ejecución, orientada a mejorar la eficiencia (visión operativa), ocurre a través de los datos provenientes del comportamiento de los equipos y del Plan Productivo de Mantenimiento producto de las mejoras realizadas a estos y los sistemas.

Durante el ejercicio, la Ingeniería de la Confiabilidad busca encontrar la relación entre los costos directos y los costos de ineficiencia con el interés de reducir el costo global durante todo el ciclo de vida de los equipos. El costo de ineficiencia puede reducirse a través del aumento de gastos directos, tanto en el ámbito de la gestión como de las inversiones.

En el ámbito de la gestión es posible mencionar: contratación de terceros, incorporación de políticas más sofisticadas de prevención, programa de

inspecciones más exigentes, mejoramiento de las competencias de las personas, y políticas de repuestos.

En el ámbito del proyecto se pueden indicar: reemplazo de equipos, mejoras en la confiabilidad de los equipos, mejoras en la mantenibilidad de los equipos, y aumento de las redundancias.

2.2.5 Análisis de Riesgos

El análisis de riesgos es un factor de suma importancia para la gestión proactiva de los activos. El principal fin es entender la causa, el efecto y la probabilidad de eventos adversos para administrar de manera óptima los riesgos y reducirlos a un nivel aceptable.

Se evalúan y ponderan las consecuencias adversas que pudiera sufrir el activo o el proceso productivo. También es importante señalar la consideración de consecuencias al medio ambiente e impactos sociales. Por tanto, para el análisis de criticidad es recomendable adaptar el modelo de consecuencia por probabilidad a la realidad problemática que enfrenta cada industria.

2.3 Formulación de la hipótesis

Con las herramientas de confiabilidad operacional, se optimizará la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, en una planta concentradora de mineral.

2.4 Variables

- Variable Independiente: Herramientas de confiabilidad operacional
- Variable Dependiente: Presupuesto de capital de mantenimiento

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Operacionalización de variables

3.1.1. Variable independiente

Herramientas de Confiabilidad Operacional

3.1.1.1. Indicadores de la variable independiente

- Confiabilidad
- Análisis de Riesgo Critico
- Tasa de Fallas
- Disponibilidad

3.1.2. Variable dependiente.

Presupuesto de Capital de mantenimiento (CAPEX).

3.1.2.1. Indicador de la variable dependiente

Efectividad de gasto de componentes capitalizables.

Tabla 9.

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Herramientas de Confiabilidad Operacional	Una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas metodologías de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional (Durán, 2000)	Confiabilidad Análisis de Riesgo Crítico Tasa de Falla Disponibilidad	= MTBF* = Probabilidad x Consecuencia = 1 /MTBF = (Tiempo Requerido – Tiempo de Parada del Equipo) / Tiempo Disponible
Presupuesto de Capital mantenimiento	La serie de inversiones que se realizan en los diferentes equipos e instalaciones con el fin tanto de mantener como de aumentar los niveles de la producción, o también, para mantener el funcionamiento de un negocio o un sistema particular (Amendola, y otros, 2016)	Capital Expenditure – Inversiones de Capital	=US\$ Uso de repuestos comprados / US\$ Total de repuestos Presupuestados

*MTBF: Tiempo Medio Para la Falla

Fuente: elaboración propia

3.2 Diseño de investigación

La presente investigación que se ha realizado es de tipo Pre-experimental, debido a que se trata de la evaluación de la situación inicial de la Gerencia de Mantenimiento en el ámbito del proceso de la elaboración del presupuesto de repuestos capitalizables (CAPEX), y, posteriormente la evaluación de la situación actual, luego de la implementación de las herramientas de confiabilidad para la optimización de dicho proceso.

GE: $O_1 \rightarrow X \rightarrow O_2$

Dónde:

GE: Grupo experimental: Activos críticos involucrados en la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento.

O₁: Pre prueba: Toma de muestra de la elaboración del mantenimiento, antes de la optimización mediante el uso de herramientas de confiabilidad operacional.

O₂: Post Prueba: Toma de muestra de la elaboración del mantenimiento, después de la optimización mediante los usos de herramientas de confiabilidad operacional.

X: Manipulación de Variable independiente: Aplicación de herramientas de confiabilidad operacional.

3.3 Unidad de estudio

Conjunto de actividades involucradas en la elaboración de presupuesto capital en una planta concentradora de mineral.

3.4 Población

La población para el trabajo de investigación incluye a todos los activos críticos de la planta concentradora de mineral.

3.5 Muestra

Se toma como muestra incluye a todos los activos críticos de la planta concentradora de mineral.

3.6 Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

Las técnicas que se utilizarán para recolectar los datos para la presente investigación serán:

Tabla 10.

Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

FUENTE	TÉCNICA	INSTRUMENTO	JUSTIFICACIÓN
Primaria	Observación directa	Guía de Observación Participación en reuniones de elaboración del Presupuesto.	Permitirá observar la metodología de reuniones grupales y los criterios de elaboración del presupuesto.
Primaria	Entrevista	Guía de Entrevista	
Secundaria	Análisis de documentos	de Formato de elaboración del presupuesto. Requisiciones de compra	Permitirá conocer los criterios de la elaboración del presupuesto.
Secundaria	Revisión de base de datos	Sistema de planificación de recursos empresariales (ERP, por sus siglas en inglés, <i>enterprise resource planning</i>)	Permitirá obtener información histórica de los activos como tasa de falla, disponibilidad entre otros.

Fuente: Elaboración propia

Observación directa

Objetivo

Identificar la metodología de las reuniones de elaboración del presupuesto de capital (CAPEX) de la gerencia de mantenimiento.

Procedimiento

Observar la participación del personal involucrado, superintendentes, planificadores, personal del área de mantenimiento predictivo. y registrar por medio de una minuta de participación.

Instrumentos

- Minuta o acta de reunión.
- Guía de observación
- Lapicero y papel.

3.7 Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos

3.7.1. Programas para análisis de datos:

- Microsoft Word 2016 para procesar información
- Microsoft Visio para diagramar
- Microsoft Excel
- Microsoft Power Point para presentar la información

3.7.2 Procedimiento

Una vez recabada la información y la adquisición de datos, se procederá a clasificar y analizar la información, enfocada principalmente en las variables de estudio, para lo cual se tendrá en cuenta 3 aspectos:

- Validación: Verificar la confiabilidad de datos e información.
- Introducción de datos: para el uso de programas especializados, por medio de una computadora personal.
- Análisis: Analizar e interpretar los resultados de la entrevista y observación.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En el presente capítulo se da a conocer los resultados de los análisis del proceso de elaboración del presupuesto de capital en la Gerencia de Mantenimiento de una planta Concentradora de mineral, la evaluación de situación inicial que se desarrollaba anualmente en más de una década, cómo práctica habitual. De igual manera se muestra el análisis a detalle de la situación actual luego de la aplicación e implementación de las herramientas de confiabilidad, y finalmente se presentan ambas alternativas para una evaluación en conjunto y objetiva, que facilite a la Gerencia de Mantenimiento tomar las decisiones en torno a la compra de repuestos críticos capitalizables.

4.1 Análisis inicial del proceso de elaboración del presupuesto de Capital.

A continuación, se detalla el proceso inicial que incluye documentación, lineamientos y prácticas empíricas de elaboración del presupuesto anual.

4.1.1 Política interna

Como antecedentes se puede precisar que existe solo un documento sobre el proceso de la elaboración del presupuesto de capital, y este es de carácter genérico para todas las Gerencias de la Compañía Minera, como son; la Gerencia de Operaciones, la Gerencia de Recursos Humanos, la Gerencia de Proyectos, entre otras. El documento en mención se denomina “Política de Administración de Inversiones de Capital (Capex)”, desarrollada por el área de Finanzas.

El propósito principal de esta política es estandarizar el proceso de gastos y enfocarlo con las políticas y objetivos estratégicos de la empresa. Esta política permite; definir los montos de gastos que se registrarán por la política interna y establecer los niveles aprobación.

4.1.2 Procedimiento de elaboración

El proceso se inicia con una reunión liderada por el área de Planeamiento donde participaran todas las jefaturas de la gerencia de mantenimiento como por ejemplo el área de ejecución mecánica, eléctrica, instrumentación finalmente el área de confiabilidad.

En esta primera reunión las jefaturas presentan su primera lista de repuestos críticos y expondrán las justificaciones para la toma de decisión, muchas de las

justificaciones carecen sustentos técnicos y están más orientados al tiempo de vida estimada de un activo considerado en el plan de mantenimiento original.

En esta primera reunión todas las disciplinas consolidan una lista “preliminar” de repuestos a ser adquiridos en los próximos 5 años.

Una vez que se cuenta con esta lista consolidada el área de planeamiento valida el cronograma de cambio de componente y si esta fuera de cronograma para a lista de revisión, caso contrario permanece en la lista de compra. Por su parte el área de confiabilidad se encarga de revisar las tasas de falla de los componentes de los últimos años a fin de priorizar la lista de compra.

Una vez estudiados los costes conocidos previamente CAPEX, por el área de planificación, se llama a una segunda reunión para difundir los costos de los repuestos a fin que entre la gerencia y las jefaturas se toma la decisión de compra en los próximos 5 años, manteniendo la priorización de compra con la indicación del área de confiabilidad enfocado únicamente en la tasa de falla del activo.

Por último, la gerencia valida la lista con la precisión de los costos actualizados y en base a restricciones económicas dictadas por los planes de producción y los planes de mantenimiento a 5 años se tomar la decisión del año de compra.

4.1.3 Costo total de eficiencia / ineficiencia de compras de repuestos

La evaluación sobre la eficiencia de gastos anuales de mide por el total de costos de componentes utilizados durante el año entre los costos CAPEX presupuestados.

En planta concentradora, en los 3 últimos años se tiene un porcentaje de cumplimiento inferior al 80%, lo cual indica que la presupuestario no está siendo eficiente, ya que, para una gestión presupuestaria y uso de repuestos críticos aceptable, se debería alcanzar por lo menos el 95% de eficiencia según estándares financieros internos.

Tabla 11.

Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora.

Año	2014	2015	2016
US\$ Presupuesto CAPEX	\$1,000,000.00	\$1,100,000.00	\$1,150,000.00
US\$ Utilización del Comp.	\$752,300.00	\$738,900.00	\$916,600.00
Eficiencia de Gasto CAPEX (%)	75.2	67.2	79.7

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la falta de repuestos en almacén concentradora generó en los tres últimos tres años una pérdida por lucro cesante (por dejar de producir) de casi el 60% del presupuesto del año 2016. Al no contar con repuestos produjo 2 detenciones de 2 equipos críticos de 8.5 horas y 19.3 horas los años 2014 y 2015 respectivamente.

Tabla 12.

Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora.

Equipos Críticos	2014	2015	2016
Chancadora 1	-	-	-
Faja 1	-	-	-
Molino 1	-	\$482,500.00	-
Molino 2	-	-	-
Molino 3	-	-	-
Molino 4	\$212,500.00	-	-
Sistema de Bombeo 1	-	-	-
Sistema de Bombeo 2	-	-	-
TOTAL	\$212,500.00	\$482,500.00	\$0.00
TOTAL (3 Años)		\$695,000.00	

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos.

La indisponibilidad de los equipos críticos por la espera de repuestos se ve reflejada directamente en la pérdida de disponibilidad y confiabilidad de planta, afectando directamente en la producción, generando pérdidas por dejar de producir o lucro cesante.

El año 2014 se registró una detención por falla eléctrica del Molino de Bolas #4. La espera del repuesto tomó aproximadamente 8.5 horas, la disponibilidad para ese año, fue de 93.5%. Mientras que el siguiente año se tuvo otra falla mecánica que originó la detención intempestiva del molino #1 por 19.3 horas, debido a la espera del componente dañado. La disponibilidad del equipo fue de 95%..

Tabla 13

Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Periodo 2014-2016.

<i>Equipos Críticos</i>	<i>Indicador</i>	<i>Unidad</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>
Chancadora 1	Disponibilidad	%	98.5	97.8	96.7
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	738	650	733
Faja 1	Disponibilidad	%	90	87	95
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	536	480	520
Molino 1	Disponibilidad	%	97	95	98.7
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	585	528	732
Molino 2	Disponibilidad	%	97	98	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	645	720	680
Molino 4	Disponibilidad	%	93.5	98	99
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	485	560	650
Sistema de Bombeo 1	Disponibilidad	%	97	98	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	524	655	531

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5 Aplicación de herramientas de confiabilidad.

Determinar la metodología correcta para la compra de repuestos en general puede ser una tarea ardua y desalentadora. Existe una fina línea entre rentabilidad y confiabilidad por lo que, muchas veces la estrategia de las empresas normalmente favorece una u a la otra. Los aportes de los fabricantes de los equipos puede ser una referencia, sin embargo, podría ser contraproducente para los intereses de la compañía, ya que en muchos de los casos los repuestos están a la mitad de su vida útil, siendo las propuestas extremadamente conservadoras. Por otro lado, cuando hay una política marcada para que los equipos funcionen más allá de su capacidad y para lo que han sido diseñados, puede darse como resultado intervenciones no planificadas frecuentes, con costos asociados a mano de obra, materiales y pérdidas de producción. Por otro lado, si las políticas se inclinan hacia el mantenimiento de los activos, la disponibilidad de los activos puede verse gravemente afectada y puede impactar en la rentabilidad. Es importante encontrar un “punto óptimo” entre dos enfoques para garantizar una cantidad adecuada de repuestos críticos y que al mismo tiempo impulse la rentabilidad.

Este estudio desglosa el proceso para analizar, establecer e implementar una estrategia de toma de decisión objetiva y fundamentada para la compra de repuestos críticos capitalizables en cinco etapas.

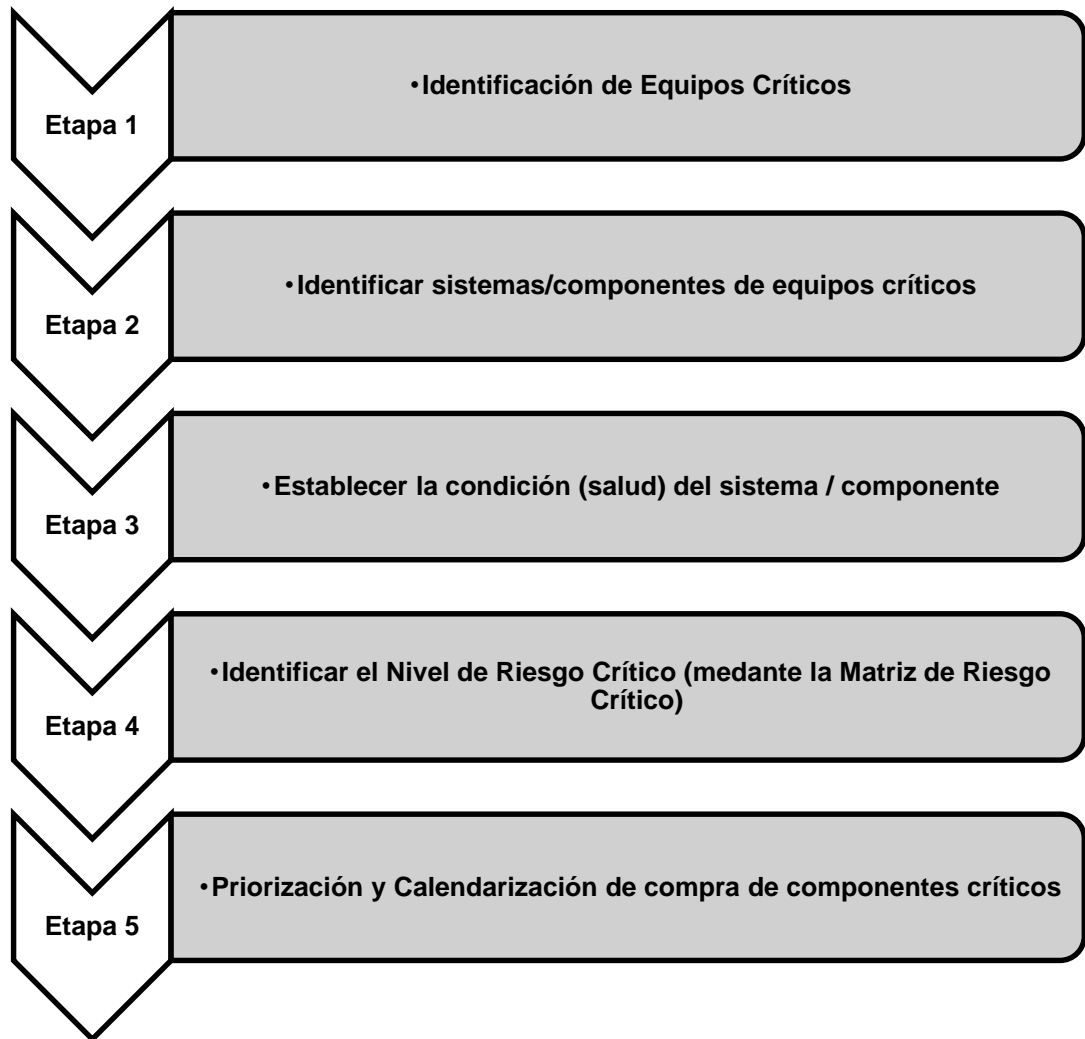


Figura 9. Proceso de cinco etapas para la toma de decisión de compra de repuestos críticos capitalizables.

Fuente: elaboración propia

Etapa 1. Establecer los Equipos Críticos.

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

Para el inicio de la metodología se revisa la configuración de planta o diagrama de flujo del proceso (PDF) por sus siglas en inglés Process Flow Diagram y se consolida la totalidad de activos. En el ejercicio de identificación de equipos críticos de planta concentradora se contabilizaron 125 activos, los cuales intervienen directa o indirectamente con el proceso productivo. Ante el vasto universo de equipos se ha logrado identificar el 10% con alto impacto a la producción, el estudio de criticidad por lo tanto se basa en 12 equipos.

Los activos identificados como “importantes” por su impacto en el proceso productivo ingresaran a la matriz de valorización de la criticidad de los activos, con la finalidad de priorizar los análisis de condición de la salud del equipo y sus componentes, y de esta manera priorizar el ejercicio presupuestario de compra de repuestos.

Para el análisis de criticidad de equipos, se tomarán en cuenta factores como: frecuencia de falla, tiempo promedio para ser reparados, impacto operacional, impacto en la seguridad, costo del repuesto y el tiempo de llegada del repuesto al almacén de Mina (Lead time). Se empleará la siguiente valoración para cada uno de los factores mencionados, donde (1) muy bajo, (2) bajo, (3) medio y (4) alto.

Tabla 14.

Análisis de Criticidad

Factor	Valor
Frecuencia de Falla	
Una sola falla cada 2 años	1
Una sola falla cada año	2
Entre dos a seis fallas al año	3
Más de seis fallas al año	4
Tiempo promedio para reparar (MTTR)	
Menos de 1 hora	1
Entre 1 a 3 horas	2
Entre 4 a 3 horas	3
Más de 5 horas	4
Impacto operacional	
Afecta menos al 10% de la producción	1
Afecta entre 10 a 30% de la producción	2
Afecta entre 30 a 50% de la producción	3
Afecta más del 50% de la producción	4
Impacto en la Seguridad	
Cero riesgos personales ni materiales	1
Riesgo bajo de personas / materiales	2
Riesgo medio	3
Riesgo alto	4
Costo del repuesto	
Menos de US\$ 5K	1
Entre US\$ 5K y 50K	2
Entre US\$ 50K y 150K	3
Mayor de US\$ 150K	4
Tiempo de llegada de repuesto (Lead Time)	
Menos de 15 días	1
Entre 15 días a 1 mes	2
Entre 1 mes a 6 meses	3
Más de 6 meses	4

Fuente: Elaboración propia

El siguiente cuadro se muestra los rangos de criticidad para la calificación de los resultados del análisis realizado a los activos de planta concentradora, según corresponda: Criticidad alta, media o baja.

Tabla 15. Rango de evaluación de Criticidad

Rango de criticidad	
30 < índice de Criticidad < 50	Criticidad alta – Color Rojo
20 < índice de Criticidad < 29	Criticidad Media – Color Amarillo
5 < índice de Criticidad < 19	Criticidad Baja – Color Verde

Fuente: Elaboración propia

En la tabla siguiente muestra la calificación del índice de criticidad para priorización de activos que serán estudiados a profundizar a fin de elaborar el presupuesto de mantenimiento enfocado en la criticidad de los activos. En el anexo 1 se muestra la totalidad de equipos de planta evaluados.

Tabla 16.

Calificación del índice de criticidad para priorización de activos}

ID	TAG de equipo	Descripción	FF		CONSECUENCIA DE FALLA (CF)				FF*CF
			Frec. de Falla	Tiempo Prom. Repar.	Impacto Oper.	Impacto en Seguridad	Costo del repuesto	Llegada al almacén	Índice de Criticidad
1	31-BM-002	Molino de Bolas 2	3	3	3	1	4	4	45
2	31-PS-002	Sistema Bombeo 2	3	1	3	1	2	3	30
3	31-BM-003	Molino de Bolas 3	2	2	3	1	4	4	28
4	31-CB-001	Faja 1	2	3	4	1	3	2	26
5	31-PS-001	Sistema Bombeo 1	2	1	3	1	2	3	20
6	31-CM-007	Chancadora 1	1	3	4	1	4	4	16
7	31-BM-001	Molino de Bolas 1	1	1	3	1	4	4	13
8	31-BM-004	Molino de Bolas 4	1	1	3	1	4	4	13
9	31-CB-021	Faja 2A	1	2	3	1	2	2	10
10	31-CB-022	Faja 2B	1	2	3	1	2	2	10
11	31-HR-001	Harnero 1	1	1	2	1	2	2	8
12	31-HR-002	Harnero 2	1	1	2	1	2	2	8

Fuente: Elaboración propia

Etapa 2. Identificar sistemas y componentes de equipos críticos.

En esta etapa se desglosan los equipos críticos previamente identificados en sistemas y componentes. Por ejemplo: El molino de bolas 2 en la tabla de criticidad obtuvo el mayor índice, por lo que el activo se desglosará en sistemas y componentes, a fin de realizar los análisis por condición.

Tabla 17. Sistemas y componentes críticos

Equipo		Molino de Bolas 2 (TAG 31-BM-002)
Sistema	ID	Componente
Sistema Hidráulico	1	Trunnion - Feed
	2	Bearing Pads - Feed
	3	Trunnion - Discharge
	4	Bearing Pads - Discharge
Sistema Eléctrico	1	Estator
	2	Bobinas
	3	Rotor
	4	Polos
	5	e-house
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación
	2	Cilindro 1
	3	Cilindro 2
	4	Tapa de descarga
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga

Fuente: Elaboración propia

Nota: Para fines didácticos que ayuden a comprender la metodología, se desarrollara el proceso para el equipo Molino de Bolas.

Etapa 3 Establecer la condición o salud de sistemas y componentes de equipos críticos.

En esta etapa se identifican los sistemas con mayor tasa de fallas y los componentes que pueden ser monitoreados, a fin de predecir su comportamiento confiable en un periodo determinado, o en su defecto podrá identificar alertas tempranas para priorizar la intervención de los equipos y asegurar la confiabilidad requerida.

Los componentes a ser monitoreados son aquellos que responden a un comportamiento captado por técnicas predictivas o de monitoreo de condición, en las que destacan el análisis de vibraciones, análisis de aceite, análisis de corriente, análisis de comportamiento de elongación de pernos, y también se incluyen los ensayos no destructivos (NDT) non destructive testing por sus siglas en inglés, entre otras técnicas.

Para el caso de los molinos de bolas se identifican componentes que pueden ser monitoreados, como, por ejemplo; la condición de pernos estructurales, fisuras internas y corrosión interna estructural.

Además, los sistemas eléctricos pueden ser monitoreados por medio de técnicas de análisis de corriente y se cuenta con la tasa de fallas históricas. La tabla muestra el grado de monitoreo y análisis histórico a fin de determinar la confiabilidad y la condición del activo.

Tabla 18.

Matriz de componentes monitoriables y con historial de fallas.

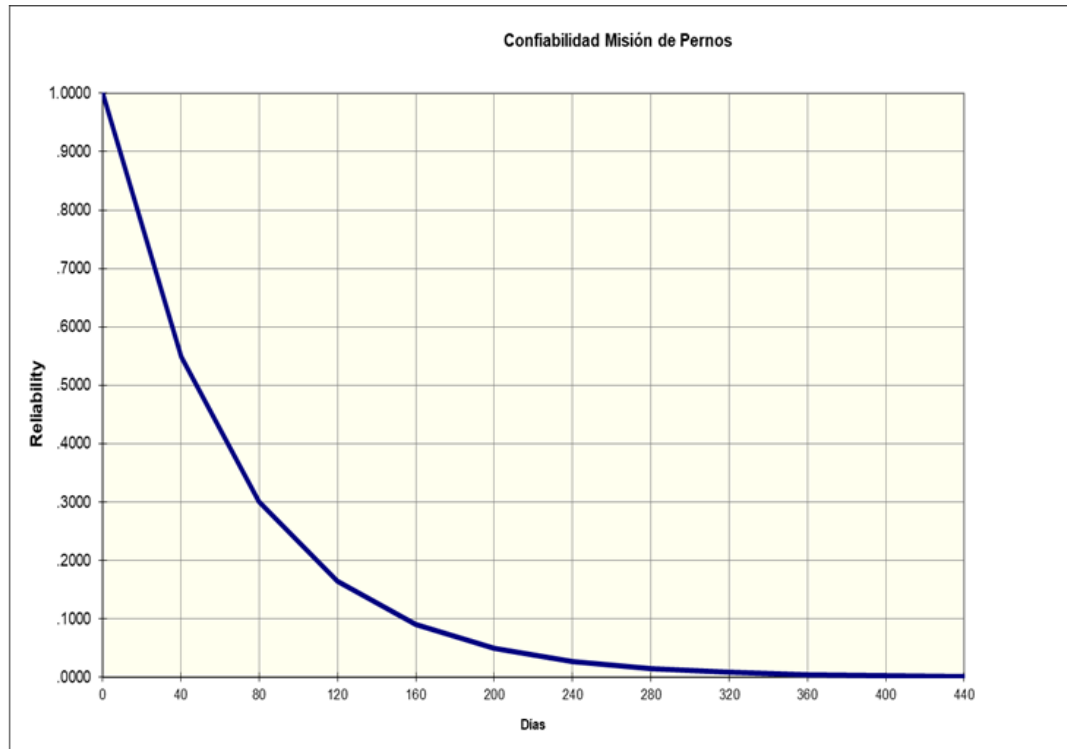
Equipo		Molino de Bolas		
Sistema	ID	Componente	Técnica Predictiva	Sistema de Historial de fallas
Sistema Hidráulico	1	Trunnion – Feed	A.V	SI
	2	Bearing Pads – Feed	A.A	SI
	3	Trunnion – Discharge	A.V	SI
	4	Bearing Pads - Discharge	A.A	SI
Sistema Eléctrico	1	Estatador	A.C	SI
	2	Bobinas	A.C	SI
	3	Rotor	A.C	SI
	4	Polos	A.C	SI
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación	NDT	SI
	2	Cilindro 1	NDT	SI
	3	Cilindro 2	NDT	SI
	4	Tapa de descarga	NDT	SI
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación	E.P	SI
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell	E.P	SI
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2	E.P	SI
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga	E.P	SI

Leyenda:

- A.A Análisis de Aceite
- A.C Análisis de corriente
- A.V Análisis de Vibraciones
- NDT Ensayo no destructivo (Ultrasonido)
- E.P Medición de elongación de Pernos

Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, para la identificar la confiabilidad de los pernos críticos, se cuenta con historial de tasa de fallas la cual permite calcular la confiabilidad del sistema de sujeción de los pernos.



MTBF and MTTR		
Total production time (up time + down time)	12936	Hours
Down Time	154.7	Hours
Number of breakdowns	8	Hours
Mean Time Between Failures (MTBF)	66.5	Days
Mean Time To Repair (MTTR)	19.3	Hours

Figura 10. Curva de confiabilidad de pernos críticos - Tapa de descarga

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo señalado en el anterior párrafo, para el análisis de sistema eléctrico se tiene información del modo de fallas de las “puestas a tierra”, por tanto, se tendrá información relevante para el desarrollo de la curva de confiabilidad y posterior priorización de intervención.

El análisis de confiabilidad mostrado tiene como objetivo evaluar, de manera metódica y cuantitativa, el nivel de riesgo que representa el modo de “falla a tierra” de estator en los molinos de bolas. La metodología determina la confiabilidad de los molinos mediante la evaluación de su desempeño histórico asociado con fallas a tierra del estator, con lo que se calculó la probabilidad de ocurrencia de una falla a tierra a futuro.

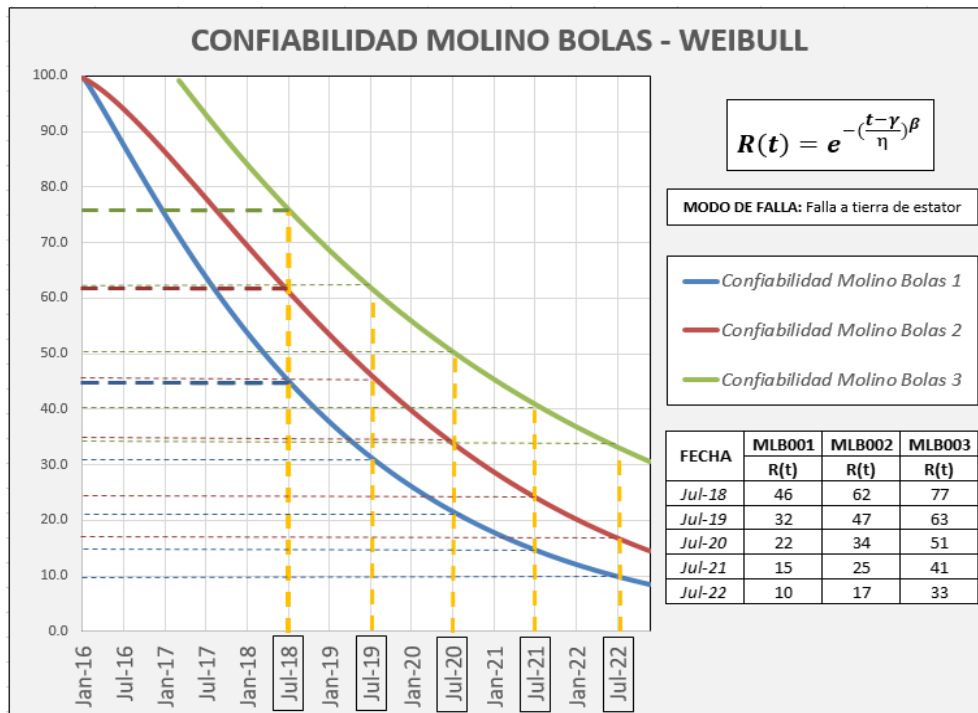


Figura 11. Curva de confiabilidad - Estatores de Molino

Fuente: Elaboración propia

Paso 4. Identificar el Nivel de riesgo crítico por medio de la Matriz de Riesgo Crítico

Una vez demostrada objetivamente la condición de los activos por medio de las técnicas predictivas y por medio del análisis de la tasa de fallas, traducidas en el análisis de confiabilidad se procede a ingresar en la tabla de valorización de riesgo valores numéricos del 1 al 25 desarrollados en la Matriz de Riesgo Crítico.

La Matriz de Riesgo Crítico, es un desarrollo extremadamente minucioso con costos actualizados a detalle que permiten un análisis objetivo. Para el desarrollo de la

matriz se requiere la participación multidisciplinaria a fin de consolidar puntos de vista de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de una falla catastrófica.

Tabla 19.

Matriz de riesgo crítico

Grado de severidad	Consecuencias				Probabilidad				
	Clasificación	Seguridad	Impacto a Producción	Costo de Mantenimiento	1	2	3	4	5
					< 1%	1% - 5%	5% - 25%	25% - 50%	> 50%
					Remoto	Extremadamente Improbable	Muy Poco Probable	Poco Probable	Probable
5	Desastrosa	Varias fatalidades. Varias personas con lesiones permanentes.	Más de 20 días de producción perdida. Daño extensivo > \$ 8M	Daño extenso: > \$8M	5	10	15	20	25
4	Catastrófica	Una fatalidad. Estado vegetal. Enfermedad ocupacional avanzada.	De 14 a 20 días de producción perdida. Daño Mayor \$4M - \$8M	Daño Grave entre: \$4M - \$8M	4	8	12	16	20
3	Grave	Lesiones que incapacitan a la persona temporalmente. Lesiones por posición ergonómica. Lesiones parciales	De 6 a 14 días de producción perdida. Daño Localizado \$1M - \$4M	Daño Localizado entre: \$1M - \$4M	3	6	9	12	15
2	Seria	Lesiones que no incapacita a la persona temporalmente. Enfermedades que generan incapacidad temporal.	De 1.5 a 6 días de producción perdida. \$0.5M - \$1M	Daño menor entre: \$0.5M - \$1M	2	4	6	8	10
1	Moderada	Lesiones que no incapacitan a la persona.	Menos de 1.5 días de producción perdida. < \$0.5M	Daño leve: < \$1M	1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de calificación de los componentes críticos de acuerdo a la matriz. Para la evaluación de consecuencias de la matriz dichas fallas probables en función a su impacto a la producción y costos directos. Se procedió a ponderar la probabilidad de falla con la consecuencia evaluada, determinándose de esta manera el nivel de riesgo generado

Tabla 20.

Condición de componentes críticos y nivel de riesgo

Item	Sistema	Componente	BM001			BM002			BM003			BM004		
			Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto
1	Sistema Hidráulico	Trunnion - Feed	3	12	10	3	12	10	3	12	10	5	5	5
2		Bearing Pads - Feed	3	12	10	3	12	10	3	12	10	5	5	5
3		Trunnion - Discharge	3	12	8	3	12	8	3	12	8	5	5	5
4		Bearing Pads - Discharge	3	12	8	3	12	8	3	12	8	5	5	5
Sistema Hidráulico			12	48	36	12	48	36	12	48	36			
5	Sistema Eléctrico	Estator	4	8	10	4	8	10	4	8	10	5	5	5
5.1		Bobinas	4	10	8	4	16	8	4	6	6	5	5	5
6		Rotor	3	8	10	3	8	10	3	8	10	5	5	5
6.1		Polos	3	10	5	3	10	5	3	10	5	5	5	5
7		E-House	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sistema Eléctrico			14	36	33	14	42	33	14	32	31			
8	Sistema Estructural	Tapa de Alimentación	2	5	3	2	5	3	4	10	6	2	5	3
9		Cilindro 1	2	5	3	2	5	3	4	10	6	2	5	3
10		Cilindro 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12		Tapa descarga	2	5	3	4	20	6	6	20	6	2	5	3
13		Pernos Trunnión-Tapa Alimentación	2	2	2	2	2	2	4	8	4	2	2	2
15		Pernos Tapa Alimentación - Shell	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16		Pernos Shell cilindro 1 - Shell cilindro 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21		Pernos Trunnión-Tapa Descarga	4	8	4	4	8	4	4	8	4	2	2	2
Sistema Estructural			28	44	32	45	105	62	42	86	52	28	43	33

NIVEL DE RIESGO			
BM001	BM002	BM003	BM004
130	197	168	61
ALTO	ALTO	ALTO	BAJO

Fuente: Elaboración propia

BM001	Molino de Bolas #1 – 30' x 41'
BM002	Molino de Bolas #2 – 30' x 41'
BM003	Molino de Bolas #3 – 30' x 41'
BM004	Molino de Bolas #4 – 30' x 41'

Paso 5. Priorización y calendarización de compras de repuestos.

Este paso consiste en evaluar los flujos futuros de caja que nos van a reportar dichas decisiones.

Tabla 21.

Matriz de priorización y calendarización para compra de repuestos

Equipo			Molino de Bolas				
Sistema	ID	Componente	2017	2018	2019	2020	2021
Sistema Hidráulico	1	Trunnion - Feed					
	2	Bearing Pads - Feed					
	3	Trunnion - Discharge					
	4	Bearing Pads - Discharge	X			X	
Sistema Eléctrico	1	Estator	X		X		X
	2	Bobinas	X		X		X
	3	Rotor					
	4	Polos					
	5	e-house					
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación					
	2	Cilindro 1					
	3	Cilindro 2	X			X	
	4	Tapa de descarga	X			X	
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación					
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell					
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2					
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga	X			X	

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Evaluación de la situación Actual

Actualmente el proceso de elaboración del presupuesto de CAPEX se desarrolla con mayor objetividad tomando en cuenta la condición del activo. Se ha demostrado con evidencia objetiva que los activos están degradando sus componentes.

Ante evidencias empíricas se ha demostrado objetivamente el grado de degradación de los componentes críticos, logrando predecir el cambio de componentes de manera oportuna. Las reuniones de han reducido a 2 logrando eficiencia en la toma de decisiones de compra. El uso de los repuestos para el año pasado logro superar el 85% (Ver anexo 2).

Tabla 22.

Eficiencia de Gasto capex, periodo 2014 - 2017

Año	2014	2015	2016	2017
US\$ Presupuesto CAPEX	\$1,000,000.00	\$1,100,000.00	\$1,150,000.00	\$1,200,000.00
US\$ Utilización del Comp.	\$752,300.00	\$738,900.00	\$916,600.00	\$1,027,030.00
Eficiencia de Gasto CAPEX (%)	75.2	67.2	79.7	85.6

Fuente: Elaboración propia

El 2017 luego de la implementación de la optimización de las herramientas de confiabilidad no se registraron eventos de detenciones por falta de equipos, cabe señalar que el 2016 tampoco se registraron eventos de detenciones por falta de repuestos críticos, sin embargo, se sabe que ese mismo año se tuvo una alta tasa de compra y utilización de repuestos además de un presupuesto superior a los años anteriores.

El 2017 se redujo el presupuesto en un plan de validación y justificación objetiva de la condición de los activos.

Tabla 23.

Impacto de detenciones por espera de repuestos. Periodo 2014 - 2017

Equipos Críticos	2014	2015	2016	2017
Chancadora 1	-	-	-	-
Faja 1	-	-	-	-
Molino 1	-	\$482,500.00	-	-
Molino 2	-	-	-	-
Molino 3	-	-	-	-
Molino 4	\$212,500.00	-	-	-
Sistema de Bombeo 1	-	-	-	-
Sistema de Bombeo 2	-	-	-	-
TOTAL	\$212,500.00	\$482,500.00	\$0.00	\$0.00
TOTAL (4 Años)		\$695,000.00		

Fuente: Elaboración propia

En líneas generales después de la implementación de han optimizado los costos de compras, se ha desarrollado un cronograma una lista de consumos de repuestos de manera objetivo bajo la filosofía de condición de los activos sustentados por el monitoreo de condición de los activos.

4.1.6.1. En materia de Disponibilidad y Confiabilidad

Sin duda los indicadores de gestión más importantes para medir el correcto desempeño de la gestión de activos son la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos y sistemas.

Por ello para la evaluación de la situación actual y la verificación de la efectividad del plan de abastecimiento de equipos críticos, producto de la implementación de las herramientas de confiabilidad, se comparó el desempeño de los equipos durante el 2017, versus el desempeño de los 3 años anteriores.

Por otra parte, es importante respetar la disponibilidad presupuestada (Budget), debido a que los mantenimientos planificados son declarados un año antes y por

consecuencia los tiempos de detención son comprometidos en la utilización de los equipos, para el cálculo de la producción y posterior ganancia neta por la venta del mineral.

Por tanto, se corrobora que el año 2017 muestra claramente una mejora significativa en la disponibilidad y la confiabilidad en los molinos de bolas principalmente, considerando que la disponibilidad estuvo por encima de la disponibilidad presupuestada y además se tiene un nivel de confiabilidad (MTBF) aceptable.

Tabla 24

Disponibilidad y Confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Periodo 2014-2017.

Equipos Críticos	Indicador	Unidad	2014	2015	2016	2017
Chancadora 1	Disponibilidad	%	98.5	97.8	96.7	97.2
	Disponibilidad (Budget)	%	98	98	98	98
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	738	650	733	655
Faja 1	Disponibilidad	%	90	87	95	96.3
	Disponibilidad (Budget)	%	90.5	87	90.5	96
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	536	480	520	434
Molino 1	Disponibilidad	%	97	95	98.7	99
	Disponibilidad (Budget)	%	98.9	98	98.9	97.2
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	585	528	732	741
Molino 2	Disponibilidad	%	97	98	97	98.3
	Disponibilidad (Budget)	%	96	97	97	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	645	720	680	701
Molino 4	Disponibilidad	%	93.5	98	99	97.3
	Disponibilidad (Budget)	%	94	97	98.9	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	485	560	650	645
Sistema de Bombeo 1	Disponibilidad	%	97	98	97	95.5
	Disponibilidad (Budget)	%	97.5	97.5	97.5	95
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	524	655	531	394

Fuente: Elaboración propia

A modo de resumen, en la tabla 24 se muestra el comportamiento de la disponibilidad real, comparada con la disponibilidad presupuestada y confiabilidad

del molino de bolas # 4 en el periodo 2014-2017, el cual fue afectado por la detención no planificada por espera de repuestos el año 2014.

Para el 2017 se muestra un alto desempeño, 0.3% por encima de la disponibilidad presupuestada.

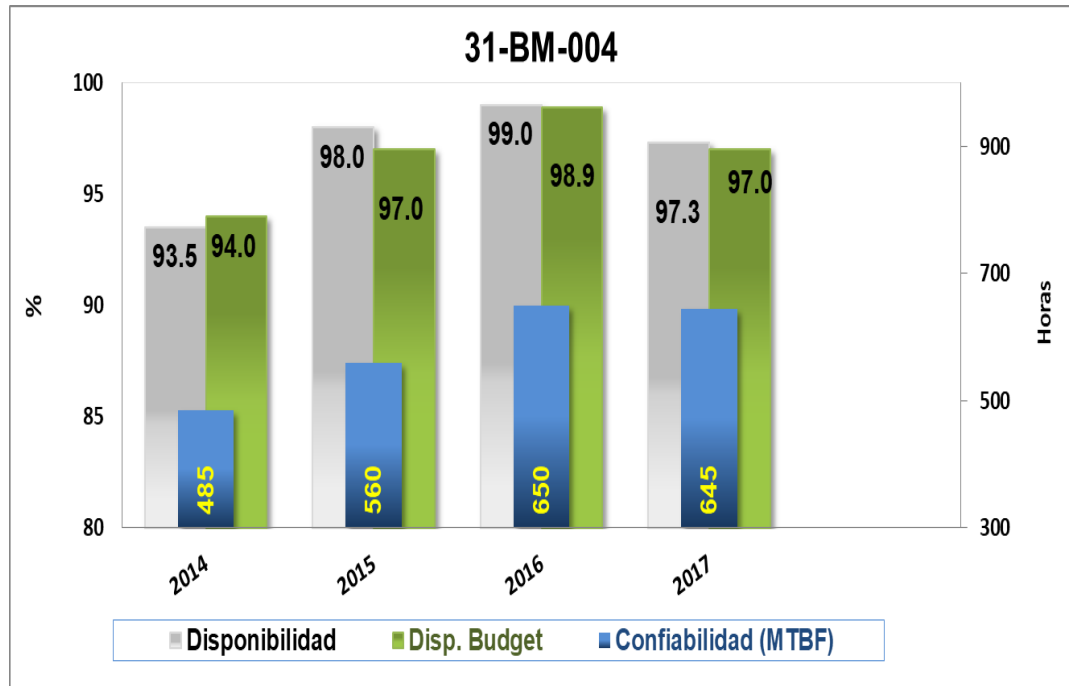


Figura 12 Disponibilidad real, disponibilidad budget y Confiabilidad de Molino de Bolas #4. Periodo 2014-2017.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera en la figura 12 muestra un desempeño de 1.8% por encima de la disponibilidad presupuesta por mantenimientos planeados. Para ambos casos la confiabilidad estuvo por encima del promedio de los tres últimos años.

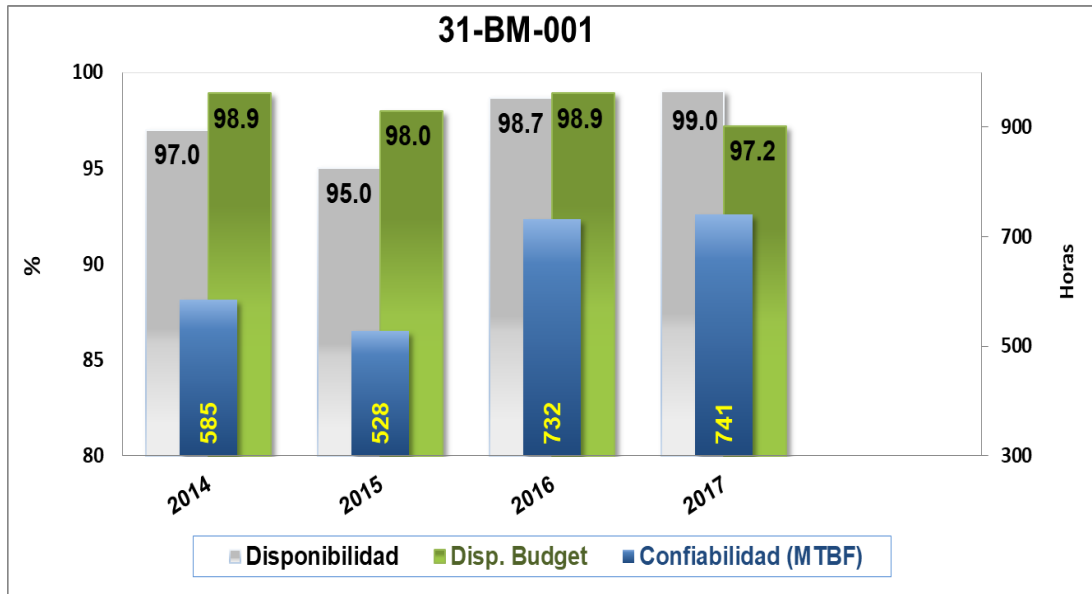


Figura 13 Disponibilidad real, disponibilidad budget y Confiabilidad de Molino de Bolas #1. Periodo 2014-2017.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente los figuras 12 y 13 muestran una clara evolución en el año 2017, donde se logra asegurar la disponibilidad presupuestada y la confiabilidad operacional de los equipos críticos, debido principalmente a que se evitaron paradas no planificadas por falta de repuestos, asegurando de esta manera la continuidad operativa.

Tabla 25

Resumen con indicadores antes y después de la mejora

	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ANTES	DESPUES
Variable Independiente	Herramientas de Confiabilidad Operacional	Una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas metodologías de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional (Durán, 2000)	Confiabilidad	MTBF	732 Horas	741 Horas
			Análisis de Riesgo Crítico	Probabilidad x Consecuencia	0	ALTA
			Tasa de Falla	1 /MTBF	0.001366	0.001366
			Disponibilidad	(Tiempo requerido – Tiempo de Parada del Equipo) / Tiempo Disponible	98.7%	99%
Variable Dependiente	Presupuesto de Capital de mantenimiento	La serie de inversiones que se realizan en los diferentes equipos e instalaciones con el fin tanto de mantener como de aumentar los niveles de la producción, o también, para mantener el funcionamiento de un negocio o un sistema particular (Amendola, y otros, 2016)	Capital Expenditure – Inversiones de Capital	US\$ Uso de repuestos comprados / US\$ Total de repuestos Presupuestados	74%	85.6%

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

De acuerdo al análisis inicial del proceso o ejercicio de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, se pudo identificar que:

El presupuesto se realiza de manera empírica, es decir en base a la experiencia del personal y la observación de eventos de falla, y en algunos casos en base al limitado historial del ciclo de vida del activo, información registrada en el sistema informático de gestión de mantenimiento. Adicionalmente en algunos equipos se toman en cuenta el plan de mantenimiento original brindado por el fabricante del equipo. También se evidenció que durante el desarrollo de la lista componentes críticos, no se consideraban los impactos que estos pudieran generar tanto en producción como en seguridad, al no tenerlos en almacén. Otro factor no considerado en el proceso es el “tiempo de espera de una orden” (Order Led Time. OLT, por sus siglas en inglés). Vale decir el tiempo que toma desde la generación de una orden en el sistema (Fecha de Ingreso de la Orden) hasta el día que el componente llega a las instalaciones de la planta de procesamiento de mineral. Finalmente, las variables de condición o variables de la salud de los equipos, evidenciada por la técnica de Monitoreo de Condiciones (MBC por sus siglas en inglés) no es considerada para la ejecución del plan de compra de repuestos. En conclusión, se puede afirmar que inicialmente el proceso de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, considera solamente dos factores; el historial limitado de fallas y el plan de mantenimiento original.

Como consecuencia de lo evidenciado, el presente estudio se enfoca en optimizar la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento utilizando herramientas de confiabilidad operacional, que soporten de manera objetiva la toma de decisiones de la Gerencia de Mantenimiento, de modo que se asegure la utilización de la planta concentradora, con pleno control de costos de componentes capitalizables y manejo de riesgos aceptables.

Por tanto, de acuerdo a lo señalado por Godoy (2014) las industrias intensas en activos enfrentan desafíos continuos para aumentar utilización, reducir costos y manejar los riesgos. La falta de una guía en estas decisiones puede conducir a una sobre-exigencia de los equipos y componentes asociados, afectando la disponibilidad, confiabilidad y productividad del sistema.

Para el proceso de implementación de la metodología de optimización de la elaboración del presupuesto, se han considerado herramientas de confiabilidad altamente efectivas como; el análisis de criticidad de equipos, la condición de los activos por medio del

monitoreo de condiciones o el monitoreo de la salud del equipo, la tasa de fallas para el cálculo de probabilidad de sobrevivencia y principalmente se ha diseñado una matriz de Riesgo Critico personalizada que permite priorizar la lista de componentes a ser comprados de acuerdo al impacto que estos puedan generar tanto a nivel operativo como a nivel de seguridad, medio ambiente y costos directos.

Banjevi (2018) nos proporcionan como referencia un modelo enfocado en la determinación de decisiones para los requerimientos de compra de repuestos en base a la variable de la vida útil remanente, la cual es estimada por medio de evaluaciones de la edad del componente y los indicadores de condición que representan la salud del componente. La principal conclusión del estudio se resume en que el mantenimiento basado en condiciones es ampliamente aceptado por sus beneficios por la disminución esperada en el inventario, ya que la adquisición de piezas se puede desencadenar mediante la identificación de una falla potencial.

Así mismo Johnston (2017) manifiesta que primero, el equipo de trabajo debe establecer la importancia de un activo en la cadena de producción definiendo si el activo es: critico, vital o secundario para la producción. Este es un paso crucial y sin dudas será el primer desafío para obtener el consenso del grupo. Los miembros del equipo pueden tener opiniones encontradas sobre cuáles son los activos más críticos, dependiendo de su perspectiva y sus posiciones respectivas dentro de la organización. Afortunadamente, hay herramientas para ayudar al equipo a dejar atrás sus opiniones y tomar decisiones objetivas. Adicionalmente menciona que: la matriz de riesgo critico es una herramienta especialmente útil para evaluar, categorizar y priorizar la necesidad de un activo. Luego de implementación de las herramientas de confiabilidad a fin de optimizar del presupuesto de capital de mantenimiento, se logra distinguir bastos beneficios que impactan directamente en la Gestión de Activos.

Las primeras mejoras identificadas se centran; en la optimización de costos anuales por la disminución de compras de repuestos al tener identificados, priorizados y calendarizados los componentes para cambio, mejora en la eficiencia de ejecución del presupuesto por tiempos de entrega conocidos, y sobre todo, por conocer la condición de deterioro o daño real del componente, que permite la priorización de la intervención para cambio. Finalmente se ha identificado un cambio en los comportamientos de los principales actores, al mostrar mayor participación y unificación de criterios enfocados a la estrategia del negocio.

Teniendo en cuenta lo que menciona Godoy (2014) en su investigación, llega a la conclusión que, para cumplir con la continuidad operativa, los datos de condición pueden

ser una herramienta poderosa para incluir en la gestión de repuesto. La necesidad de centrarse en piezas de repuesto críticas y de graves consecuencias en el rendimiento del equipo exige una técnica amigable que se puede utilizar en un entorno donde las decisiones se necesitan tomar rápidamente a fin de garantizar la continuidad operativa.

Adicionalmente Barreto (2015) En su Investigación sobre *“Modelos de control de inventarios para la reducción de costos de repuestos de mantenimiento en taladros de perforación Offshore en la provincia de Tumbes”*, advierte que la información necesaria para estimar el valor de ahorro en los costos de repuestos de mantenimiento debería incluir: historial de fallas de componentes, valores contractuales del tiempo no productivo y análisis de modos efectos de falla (AMEF).

Finalmente se puede afirmar que la metodología desarrollada para la optimización del presupuesto de componentes capitalizables, contribuye al mejoramiento continuo y la rentabilidad de la compañía a través de la generación de valor que pasa desde una visión de mantenimiento limitada por intereses particulares hacia una perspectiva de la gestión de activos físicos corporativos.

CONCLUSIONES

- Al analizar la situación inicial del ejercicio de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, se logró identificar que los criterios utilizados para la compra de repuestos críticos eran ineficientes, ya que se basaba principalmente en la experiencia del personal. Esta práctica empírica privada de criterios técnicos generó pérdidas por lucro cesante los años 2014 y 2015. Llegando a representar el 58% del presupuesto anual del año 2017, debido a la indisponibilidad de los activos por la espera de repuestos.
- El modelamiento del proceso de optimización del presupuesto de componentes capitalizables se realizó empleando herramientas de confiabilidad operacional como; el análisis de criticidad, el análisis de confiabilidad y mediante una matriz la evaluación de riesgo crítico, basada en el impacto en la producción y la probabilidad de ocurrencia de fallas. Estas herramientas resultaron ser altamente eficientes y eficaces por la asertividad en la ocurrencia de fallas y la priorización en la compra de componentes críticos.
- En la evaluación y análisis de la situación posterior, se observa que el año 2017 se logra asegurar la disponibilidad presupuestada y la confiabilidad operacional de los equipos críticos, debido a que se evitaron paradas no planificadas por falta de repuestos, asegurando de esta manera la continuidad operativa. De igual manera, se registra un 85.6% de eficiencia de gasto del presupuesto de componentes capitalizables, resultando superior a los tres años anteriores.

RECOMENDACIONES

Es recomendable que el jefe del área del área de Confiabilidad sea el dueño del proceso de elaboración del presupuesto y además involucre al área de finanzas a fin de que las necesidades de compra de activos de mantenimiento sean entendidas en su real magnitud, con el objetivo único de negocio, el cual es asegurar la continuidad de la operación.

Es imperativo que el jefe de planeamiento exija una buena base datos de fallas y de condición de los equipos. Ya que ambas fuentes de información suministran la materia prima para un proceso eficiente y efectivo de elaboración del presupuesto.

En la investigación se ha considerado que la falta de repuestos puede ser satisfecha solo con la compra planificada de los componentes y el requerimiento de urgencia al proveedor. Sin embargo, debido a operaciones similares en Perú y Sudamérica la falta de repuestos también puede ser cubierta con el préstamo de otras empresas. Por ello se recomienda que mediante el área de logística se pueda prever este tipo de contingencias.

Si bien en la presente investigación y desarrollo de modelo se han considerado tres herramientas de confiabilidad, en el futuro, cuando se disponga de mayor información, el área de Confiabilidad debería considerar el análisis de modos y efectos de falla (AMEF). Con el objetivo de proveer fallas que se podrían generar más adelante, y no solo tener referencia histórica.

Se recomienda a la Gerencia de Mantenimiento formalizar el modelo de elaboración del presupuesto de capital, mediante una directiva para la ejecución sostenida y sistemática en los ejercicios presupuestales anuales, tanto a nivel interno como a nivel corporativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amendola, L., Tibaire, A., Depool, M., Castillo, M., Borrell, L., & Sanchez, A. (2016). *Impacto del CAPEX y OPEX en la Gestión de Activos. Impact of capex and opex asset management* (pág. 252). Cartagena: Adventure Works.
- Arata, A. (2005). *Organización liviana y gestión participativa*. Santiago de Chile: RIL.
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*. Santiago de Chile: RIL.
- Arias, X. (2017). Perú: Evolución reciente del sector minero-metálico y perspectiva. *Mecados y Regiones*, 32.
- Banjevic, D., Jardine, A., Louit, D., & Pascual, R. (15 de junio de 2018). *Condition-based spares ordering for critical components*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327011000148>
- Barabadi, A. (2016). Reliability and Spare Parts Provision Considering. *International Journal of Performability Engineering*, 497-506.
- Barreto, D. (2015). *Modelos de Control de Inventarios para la Reducción de Costos de Repuestos de Mantenimiento en Taladros de Perforación OffShore en la Provincia de Tumbes*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Becerra, G., & Paulino, J. (2012). *El análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión de mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación de un centro minero*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Del Castillo, A., Cabrera, J., Diaz, A., & Toledo, M. (2016). Obtención de un modelo de criticidad para los equipos y sistemas tecnológicos de una termoeléctrica. *Scielo*, 207 - 2017.
- Durán, J. (2000). ¿Qué es Confiabilidad Operacional? *Club Mantenimiento*, 32-34.
- Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Enfoque de estimación de piezas de repuesto basado en el entorno de operación y confiabilidad: A case study in Kiruna Mine, Sweden. *Quality in Maintenance Engineering*, 169-186.

Godoy, D. (2014). *Modelos Integrados para Gestión de Repuestos Críticos en las Industrias Intensivas en Activos*. Santiago de Chile.

Gonzales, M. (2006). *Diseño estrategia operación centrada en confiabilidad para minera Spence S.A.* Santiuago de Chile: Spence.

Huerta, R. (14 de Agosto de 2018). *El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional*. Obtenido de clubdemantenimiento.com: http://www.mantenimientoplanificado.com/Articulos%20gesti%C3%B3n%20mantenimiento_archivos/de%20confiabilidad/ANALISIS%20DE%20CRITICIDAD.pdf

Jhonston, M. (18 de junio de 2018). *Selecting the correct maintenance strategy*. Obtenido de Reliability Web: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/selecting-the-correct-maintenance-strategy>

Johnston, M. (2017). Cómo seleccionar la estrategia de mantenimiento adecuada. *UP TIME MAGAZINE*, 16-21.

Robles, A. (2015). Análisis, Diagnostico y Propuestas de Mejora en la Gestión de Activos Físicos de Grúas Pórtico. Lima, Perú.

ANEXOS

Anexo 1 Tabla de Criticidad de Equipos Planta Concentradora

Tabla de Criticidad de Equipos Planta Concentradora									
ID	TAG de equipo	Descripción	FF	CONSECUENCIA DE FALLA (CF)					FF ² C
			Frecuencia de Falla	Tiempo Prom. Reparación	Impacto Operacional	Impacto en Seguridad	Costo del repuest	Llegada al almacén	Indice de Criticidad
1	31-BM-002	Molino de Bolas 2	3	3	3	1	4	4	45.0
2	31-PS-002	Sistema de Bombeo 2	3	1	3	1	2	3	30.0
3	31-BM-003	Molino de Bolas 3	2	2	3	1	4	4	28.0
4	31-CB-001	Faja 1	2	3	4	1	3	2	26.0
5	31-PS-001	Sistema de Bombeo 1	2	1	3	1	2	3	20.0
6	31-CP-007	Chancadora 1	1	3	4	1	4	4	16.0
7	31-BM-001	Molino de Bolas 1	1	1	3	1	4	4	13.0
8	31-BM-004	Molino de Bolas 4	1	1	3	1	4	4	13.0
9	31-CB-021	Faja 2A	1	3	3	1	3	2	12.0
10	31-CB-022	Faja 2B	1	3	3	1	3	2	12.0
11	31-AF-001	Alimentador de Placas 1	1	1	2	1	2	2	8.0
12	31-AF-002	Alimentador de Placas 0	1	1	2	1	2	2	8.0
13	33-CLS-001	Ciclón 1	0.7	2	1	1	2	1	4.9
14	33-CLS-002	Ciclón 2	0.7	2	1	1	2	1	4.9
15	33-CLS-003	Ciclón 3	0.7	2	1	1	2	1	4.9
16	33-CLS-004	Ciclón 4	0.7	2	1	1	2	1	4.9
17	31-CB-032	Faja 3B	1	2	1	0.5	2	2	7.5
18	31-CB-031	Faja 3A	1	2	1	0.5	2	2	7.5
19	31-CB-040	Faja 4	0.7	2	1	0.5	2	2	5.3
20	31-CB-050	Faja 5	0.6	2	1	0.5	2	2	4.5
21	32-CR-001A	Celda Rougher Fila A1	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
22	32-CR-002A	Celda Rougher Fila A2	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
23	32-CR-003A	Celda Rougher Fila A3	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
24	32-CR-004A	Celda Rougher Fila A4	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
25	32-CR-005A	Celda Rougher Fila A5	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
27	32-CR-001B	Celda Rougher Fila B1	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
28	32-CR-002B	Celda Rougher Fila B2	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
29	32-CR-003B	Celda Rougher Fila B3	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
30	32-CR-004B	Celda Rougher Fila B4	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
31	32-CR-005B	Celda Rougher Fila B5	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
32	32-CR-006B	Celda Rougher Fila B6	0.7	3	0.25	0.1	1.5	1.5	4.4
33	33-PS-010A	Sist. Alim. Ciclones 10A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
34	33-PS-011A	Sist. Alim. Ciclones 11A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
35	33-PS-020A	Sist. Alim. Ciclones 20A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
36	33-PS-021A	Sist. Alim. Ciclones 21A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
37	33-PS-030A	Sist. Alim. Ciclones 30A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
38	33-PS-031A	Sist. Alim. Ciclones 31A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
39	33-PS-040A	Sist. Alim. Ciclones 40A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
40	33-PS-041A	Sist. Alim. Ciclones 41A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
41	33-PS-050A	Sist. Alim. Ciclones 50A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
42	33-PS-051A	Sist. Alim. Ciclones 51A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
43	33-PS-060A	Sist. Alim. Ciclones 60A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
44	33-PS-061A	Sist. Alim. Ciclones 61A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
45	33-PS-010B	Sist. Alim. Ciclones 10B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
46	33-PS-011B	Sist. Alim. Ciclones 11B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
47	33-PS-020B	Sist. Alim. Ciclones 20B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
48	33-PS-021B	Sist. Alim. Ciclones 21B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
49	33-PS-030B	Sist. Alim. Ciclones 30B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7

ID	TAG de equipo	Descripción	FF	CONSECUENCIA DE FALLA (CF)					FF°C	
			Frecuencia de Falla	Tiempo Prom. Reparación	Impacto Operacional	Impacto en Seguridad	Costo del repuest	Llegada al almacen	Indice de Criticida	
50	33-PS-031B	Sist. Alim. Ciclonas 31B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
51	33-PS-040B	Sist. Alim. Ciclonas 40B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
52	33-PS-041B	Sist. Alim. Ciclonas 41B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
53	33-PS-050B	Sist. Alim. Ciclonas 50B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
54	33-PS-051B	Sist. Alim. Ciclonas 51B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
55	33-PS-060B	Sist. Alim. Ciclonas 60B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
56	33-PS-061B	Sist. Alim. Ciclonas 61B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
57	33-CLS-01A	Ciclon A1	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
58	33-CLS-02A	Ciclon A2	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
59	33-CLS-03A	Ciclon A3	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
60	33-CLS-04A	Ciclon A4	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
61	33-CLS-05A	Ciclon A5	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
62	33-CLS-06A	Ciclon A6	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
63	33-CLS-01B	Ciclon B1	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
64	33-CLS-02B	Ciclon B2	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
65	33-CLS-03B	Ciclon B3	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
66	33-CLS-04B	Ciclon B4	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
67	33-CLS-05B	Ciclon B5	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
68	33-CLS-06B	Ciclon B6	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
69	32-PS-001A	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 1 A	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
70	32-PS-002A	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 2 A	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
71	32-PS-001B	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 1 B	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
72	32-PS-002B	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 2 B	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
73	33-ACC-001A	Agitador Celda Columna A	0.2	2	0.5	1	1	1	1.1	1.1
74	33-ACC-001B	Agitador Celda Columna B	0.2	2	0.5	1	1	1	1.1	1.1
75	33-CC-001	Sist. De Bombeo Colector Concentrado 1	1	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	1.7	1.7
76	33-CC-002	Sist. De Bombeo Colector Concentrado 2	1	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	1.7	1.7
77	33-EC-001	Sist. Espesador Concentrado 1	1	3	2	1	2	2	10.0	10.0
78	33-PDC-001	Sist. De Bombeo Concentrado 1	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
79	33-PDC-002	Sist. De Bombeo Concentrado 2	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
80	33-PFC-001	Sist. Bombeo Alim. Concentrado 1	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
81	33-PFC-002	Sist. Bombeo Alim. Concentrado 2	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
82	33-FIL-002	Sist. Agitador de Concentrado a Filtros	1	3	4	1	2	2	12.0	12.0
83	33-PS-001A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 1A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
84	33-PS-001B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 1B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
85	33-PS-002A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 2A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
86	33-PS-002B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 2B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
87	33-PS-003A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 3A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
88	33-PS-003B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 3B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
89	33-PS-004A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 4A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
90	33-PS-004B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 4B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
91	33-FP-001	Filtro de Concentrado 1	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
92	33-FP-002	Filtro de Concentrado 2	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
93	33-FP-003	Filtro de Concentrado 3	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
94	33-FP-004	Filtro de Concentrado 4	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
95	33-FA-005	Sistema de Liberación de Aire 1	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
96	33-FA-004	Sistema de Liberación de Aire 2	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
97	33-FA-003	Sistema de Liberación de Aire 3	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
98	33-FA-004	Sistema de Liberación de Aire 4	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
99	33-FIL-001	Sist. Agitador de Filtrado 1	1	3	3	3	2	1	12.0	12.0
100	35-PS-001	Sist. Bombeo Transferencia 1	2	1	1	1	0.5	0.5	8.0	8.0
101	35-PS-002	Sist. Bombeo Transferencia 2	2	1	1	1	0.5	0.5	8.0	8.0
102	33-CS-001	Sist. Clarificador 1	1	3	3	3	2	1	12.0	12.0
103	33-PSC-001	Sist. de Bombeo descarga de clarificador 1	1	1	0.5	1	1	1	4.5	4.5
104	33-PSC-002	Sist. de Bombeo descarga de clarificador 2	1	1	0.5	1	1	1	4.5	4.5
105	34-EP-001	Sist. Mecanismo espesador Pasta 1	1	2	3	2	1	1	9.0	9.0
106	34-PS-001	Sist. De Bombeo de Pasta 1	1	1	2	3	2	0.5	8.5	8.5
107	34-PS-002	Sist. De Bombeo de Pasta 2	1	1	2	3	2	0.5	8.5	8.5
108	32-AC-001	Sist. Agitador Almacenamiento Concentrado	0.5	3	3	0.5	3	2	5.8	5.8
109	35-CPS-001	Compresor 1	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
110	35-CPS-002	Compresor 2	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
111	35-CPS-003	Compresor 3	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
112	35-CPS-004	Compresor 4	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
113	34-LS-001	Tomillo alimentador de Cal	0.5	1	0.5	0.5	2	0.5	2.3	2.3
114	35-PF-001	Sist. de Floculante 1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
115	35-PF-002	Sist. de Floculante 2	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
116	35-PF-003	Sist. de Floculante 3	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
117	36-PS-002	Sistem. Sellado de agua 1	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
118	36-PS-002	Sistem. Sellado de agua 2	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
119	35-PS-003	Sistema de Bombeo Relaves 1	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
120	35-PS-002	Sistema de Bombeo Relaves 2	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 2 Eficiencia de Gasto de Componentes Capitalizables Presupuestados

Eficiencia de Gasto de Componentes Capitalizables Presupuestados

ID	TAG	Descripción de Componente	Año			
			2014	2015	2016	2017
1	31-BM-MT-001	Motor Eléctrico Sist. Bombeo de Ciclones	\$56,800.00	-	\$56,800.00	-
2	31-BM-BO-052	Bobinas de Molino de Bolas	\$200,500.00	-	-	-
3	31-AF-SH-011	Motor Hidráulico de Alimentador de Placas	-	\$171,000.00	-	-
4	31-AF-SH-012	Bomba Hidráulica de Alimentador de Placas	-	\$97,000.00	-	-
5	31-AF-SM-001	Kit de Placas y Sprocket	-	-	\$40,130.00	-
6	31-PS-VO-001	Carcaza de Bomba Ciclones	-	-	\$46,800.00	\$46,800.00
7	31-PS-HO-001	Alojamiento de Rodamientos de Bomba Ciclones	-	\$25,800.00	\$25,800.00	-
8	33-EC-SH-005	Sist. Hidráulico Espesador Concentrado	-	-	-	\$130,230.00
9	31-BM-SH-005	Tapa de descarga de Molino de Bolas	-	-	-	\$680,000.00
10	31-CP-MS-001	Eje Principal de Chancadora Primaria	-	-	\$245,210.00	-
11	31-CP-MS-007	Kit de Elementos de desgaste Ch. Primaria	-	-	\$155,060.00	-
12	33-FP-SH-001	Kit de Placas de Filtro de Concentrado	-	\$145,029.00	-	-
13	31-BM-SH-015	Bearing Pads - Discharge	-	-	-	\$216,800.00
14	31-CP-SH-001	HydroSet de Chancadora Primaria	-	\$126,800.00	-	-
15	33-CLS-CC-030	Kit de Nido de Ciclones	-	-	\$85,800.00	-
16	31-BM-SH-025	KIT Bearing Pads - Discharge	\$261,000.00	-	\$261,000.00	-
17	31-CB-RE-001	Caja Reductora de Faja	\$85,000.00	-	-	-
18	31-CB-RE-041	Caja Reductora de Faja	\$37,000.00	-	-	-
19	33-FIL-SM-001	Sist. Mecánico de Agitador de Filtrado	-	\$173,271.00	-	-
20	32-AC-SH-011	Sist. Hidráulico Agitador Alm. Concentrado	\$112,000.00	-	-	-
GASTO REAL (Utilización de Componente)			\$752,300.00	\$738,900.00	\$916,600.00	\$1,027,030.00
PRESUPUESTO DE COMPONENTES CAPEX DE MANTENIMIENTO			\$1,000,000.00	\$1,100,000.00	\$1,150,000.00	\$1,200,000.00
EFICIENCIA DE GASTO - CAPEX (%)			75.2	67.2	79.7	85.6

Fuente: Elaboración Propia