

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE COSTO DEL CICLO DE VIDA A LOS
MOTORES MTU 20V-4000

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Airton Leandro Avallai Osorio

Profesor Guía:

Sr. Carlos Alberto Parra Márquez

DEDICATORIA

Quiero agradecer a mis padres Aldo y Verónica, por darme todo su apoyo en esta etapa tan importante de mi formación y desarrollo personal, gracias por los consejos y la preocupación.

A los profesores que participaron durante el proceso académico, quienes me entregaron las herramientas y conocimientos necesarios, para lograr el crecimiento profesional en principios y valores.

Al profesor guía Carlos Parra Márquez, por su importante apoyo, preocupación al destinar de su tiempo para guiarme en este proceso.

RESUMEN

KEYWORDS: ANÁLISIS DE COSTOS, CICLO DE VIDA, MTU, MOTOR DIESEL, MTTR, WOODWARD, COLLAHUASI, REPOWER.

El trabajo de título, “Aplicación del análisis de costo del ciclo de vida a los motores MTU 20V-4000 utilizado en camión Komatsu 930E-4SE”, busca visibilizar la aplicación de unas de las metodologías de aplicación de costo de ciclo de vida, para guiar la toma de decisiones en cuanto a qué motor debe seguir operando en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, en sus versiones 20V4000C23 y 20V4000C22, con el fin de cumplir con las horas de operación diarias establecidas por minera.

Como punto de partida ponemos en contexto, la problemática existente en la minera con los motores MTU, antecedentes generales, y conceptos claves que ayudaran a entender la relación de la empresa Detroit S.A (suministro, mantenimiento y reparación de motores diésel) con la compañía minera doña Inés de Collahuasi y la necesidad de aplicar una metodología de análisis de costo de ciclo de vida.

A continuación, se introduce la metodología Woodward de análisis del Costo del Ciclo de Vida, desarrollada en 1997 y se destacan los principales conceptos y variables involucradas en esta metodología. Asimismo, se detalla la adaptación de la ecuación principal y la ecuación de cálculo de costos por fallos específicamente al ámbito de los motores de combustión en el sector minero.

La ecuación principal del Costo del Ciclo de Vida se posiciona como elemento central en este proceso de implementación. Se explica exhaustivamente su aplicación paso a paso, subrayando su importancia dentro del análisis. Además, se aborda la ecuación de costos asociados a la confiabilidad. Para facilitar la comprensión, se presenta un ejemplo simplificado que ayuda a ilustrar el proceso y a consolidar el entendimiento de esta metodología

Finalmente, se procede a exponer las características fundamentales y las disparidades entre los motores 20V4000C23 y 20V4000C22. Siguiendo el método previamente planteado en la metodología, se lleva a cabo la aplicación de datos reales concernientes a estos motores, como sus tipos de fallas, frecuencia, tiempo medio de reparación (MTTR) y los costos asociados a cada uno. Todos estos costos principales son minuciosamente detallados para elaborar una tabla resumen que contiene los costos totales de ambos motores. Esta tabla permitirá analizar los resultados obtenidos, identificar las divergencias en los costos y evaluar la contribución de cada elemento en el costo total.

Esta etapa final del estudio busca proporcionar una visión integral de los costos relacionados con los motores 20V4000C23 y 20V4000C22, permitiendo así un análisis comparativo detallado. Se pretende no sólo identificar las diferencias en los costos totales, sino también comprender la contribución relativa de los diversos factores que intervienen en la composición del costo total de cada motor, ofreciendo así una visión más completa y esclarecedora de las distintas implicaciones financieras entre ambas opciones.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RESUMEN

SIGLA Y SIMBOLOGIA

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 4

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES. 5

1.1 PROBLEMÁTICA. 6

1.2 DETROIT CHILE S.A. 7

1.2.1 Misión 8

1.2.2 Visión 8

1.2.3 Historia 8

1.2.4. Representaciones oficiales Detroit Chile S.A. 9

1.2.5. Divisiones Detroit Chile S.A. 9

1.2.6. Sucursales Detroit Chile S.A. 10

1.2.7. Mineras Detroit Chile S.A. 10

1.3. FAENA COLLAHUASI 10

1.3.1 Proceso productivo 11

1.4. CAMIÓN KOMATSU 930E-4SE 11

1.5. MOTOR DETROIT DIESEL MTU 20V4000 12

1.6. CONCEPTO DE REPOWER 13

**CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD ADAPTADA A
LOS MOTORES DEL SECTOR MINERO.** 16

2.1 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS. 17

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS COSTES. 18

2.2.1. Costes de investigación y desarrollo inicial. 19

2.2.2. Costes de producción y Construcción. 20

2.2.3. Costes de Operación y Soporte. 20

2.2.4. Costes de Desincorporación y Retirada. 20

2.3. PROCESO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCV. 21

2.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONFIABILIDAD EN LOS
MODELOS DE ACCV. 23

2.5. MODELO DE ACCV DE WOODWARD.	24
2.5.1 Características del modelo Woodward	25
2.5.2. Procedimiento de la implementación de Woodward.	25
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL ACCV A LOS MOTORES MTU 20V4000C23 Y 20V4000C22.	34
3.1 MOTORES MTU 20V4000.	35
3.2. CI - COSTE INICIAL DE ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN	37
3.2.1 Costes de desarrollo	37
3.2.2 Costes de adquisición	37
3.3. CO - COSTES OPERACIONALES	37
3.4. CMP - Costes de Mantenimiento Preventivo	38
3.5. CMM - Costes de Mantenimiento Mayor	39
3.6. TCPf - COSTES TOTALES POR CONFIABILIDAD	40
3.6.1 Frecuencia de fallos	40
3.6.2 Costos asociados a cada tipo de fallo.	41
3.6.3. Calcular los costes totales por fallos por año TCPf [\$/año]	43
3.6.4 Costos totales por fallo en valor presente	45
3.7. CTCV - COSTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA.	47
3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	48
CONCLUSIÓN	54
BIBLIOGRAFÍA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación casa matriz, Detroit Chile S.A.	7
Figura 1-2. Representaciones, Detroit Chile S.A.	9
Figura 1-3. Camión Komatsu 930E-4SE	12
Figura 1-4. Motor MTU 20V4000C23	13
Figura 1-5. <i>Repower</i> equipado con motor C23 para camión 930E-4SE	14
Figura 3-1. Motor 20V4000C23	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Tiempos entre fallos.	30
Tabla 2-2. Costos totales de ejemplo simplificado	32
Tabla 3-1. Frecuencia de fallos – Motor 20V4000C22	41
Tabla 3-2. Frecuencia de fallas – Motor 20V4000C23	41
Tabla 3-3. Costo por fallo – Motor 20V4000C22	42
Tabla 3-4. Costo por fallo – Motor 20V4000C23	43
Tabla 3-5. Costos totales por fallo por año – Motor 20V4000C22	44
Tabla 3-6. Costos totales por fallo año – Motor 20V4000C23	45
Tabla 3-7. Costos totales por fallo en valor presente – Motor 20V4000C22	46
Tabla 3-8. Costos totales por fallo en valor presente – Motor 20V4000C23	47
Tabla 3-9. CTCV – Motor 20V4000C22	48
Tabla 3-10. CTCV – Motor 20V4000C23	48
Tabla 3-11. CTCV – Motores C22 & C23.	49
Tabla 3-12. CTCV de motores C22 & C23 sin costo de alquiler.	51
Tabla 3-13. CTCV de motores C22 & C23 con reducción de frecuencia de fallas.	53

ÍNDICE DE DIAGRAMAS CONCEPTUALES

Diagrama Conceptual 2-1. Desglose de los costos.	19
Diagrama Conceptual 2-2. Proceso de retirada.	21
Diagrama Conceptual 2-3. Distribución costos del ejemplo simplificado	32

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Tiempo promedio entre fallos	24
Ecuación 2.2. Tiempo promedio para reparar	24
Diagrama Conceptual 2-3. Procedimiento Woodward	26
Ecuación 2.3. Costos totales del ciclo de vida en valor presente.	26
Ecuación 2.4. Frecuencia de fallos.	29
Ecuación 2.5. Costos por fallos.	29
Ecuación 2.6. Costos totales por fallos.	29
Ecuación 2.7. Costos totales por fallo en valor presente	30

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1. División de costos del motor 20V4000C23	50
Gráfico 3-2. División de costos de motor 20V4000C22	50

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

- MTU: Unión fabricante de motores y turbinas.
- SAG: Semiautógenos
- ACCV: Análisis de Coste de Ciclo de Vida
- CAEX: Camión de Extracción
- CTCV: Costos Totales de Ciclo de Vida
- UF: Unidad de Fuerza
- HP: High Power (Alta Potencia)
- QL: Qualification Levels (Niveles de Calificación)
- USD: United States Dollar (Dólar estadounidense)
- MTTR: Medium Time To Repair (Tiempo Medio de Reparación)
- MTBF: Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre fallos)
- PTFR: Proportional time failure rate (Tasa de Fallos Proporcional al Tiempo)
- LCCA: Life Cycle Cost Analysis (Análisis de Costo de Ciclo de Vida)

SIMBOLOGÍAS

- h: hora
- l: litros
- \$: dólar
- in: Pulgadas
- %: Porcentaje
- Ton: Toneladas
- Km: Kilómetros
- Kg: Kilogramos
- 3D: Tridimensional
- Hp: Caballos de fuerza
- cc: Centímetros cúbicos
- p.p.m: partes por millón
- r.p.m: revoluciones por minuto
- m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar

INTRODUCCIÓN

Chile destaca como uno de los principales protagonistas en la producción y exportación mundial de cobre. Su territorio alberga una variedad de yacimientos mineros donde se lleva a cabo la extracción principalmente de cobre y molibdeno. Esta actividad extractiva se ejecuta a gran escala, lo cual impulsa a la industria minera a invertir considerablemente en la obtención de maquinaria y equipos especializados.

En las minas de explotación a cielo abierto, la utilización de equipos para la extracción y transporte de mineral se convierte en un requisito esencial. Uno de estos equipos destacados son los camiones CAEX, los cuales desempeñan un papel crucial en el transporte de mineral. Estos vehículos están equipados con motores diésel que transforman la energía química en energía mecánica, proporcionando el impulso necesario para su funcionamiento. La confiabilidad de los motores de combustión es crucial para el funcionamiento continuo de estos equipos; un fallo en el motor podría paralizar por completo la operación minera. Debido a esta realidad, las compañías mineras optan por colaborar con empresas especializadas en el mantenimiento de maquinaria y equipos, en este caso específico, los motores diésel.

Una de las empresas especializadas es “Detroit S.A.”, líder en mantenimiento de motores diésel y representante del fabricante alemán de motores MTU en Chile, Perú y Brasil. En Chile, abastece con motores a las faenas mineras en el norte y centro del país.

En el capítulo 1 se abordará la problemática y se proporcionará información detallada sobre la empresa Detroit S.A, incluyendo su historia, misión, visión y representaciones. Asimismo, se describirá la ubicación y el proceso productivo de la Compañía minera Doña Inés de Collahuasi. Con el objetivo de comprender la relación entre la empresa Detroit S.A y la compañía minera, se presentará información acerca del camión Komatsu 930E-4SE, que opera en las instalaciones de la faena minera Collahuasi. Este camión de extracción desempeña trabajos de carga y transporte de material, y para su funcionamiento y propulsión, requiere estar equipado con un motor de combustión interna. Dicho motor transforma la energía química del combustible en energía mecánica, la cual se transmite al alternador principal.

En lo que respecta a los motores, en su configuración original, son equipados con un motor Cummins, sin embargo, las empresas propietarias de los camiones de extracción optan por reemplazar el motor original con un motor MTU. En este contexto, se introducen dos conceptos que están presente en el capítulo 1: El motor MTU 20V4000 utilizado en el camión 930E-4SE y el concepto de “*repower*”, que se refiere a la realización de las modificaciones necesarias en el camión para instalación del motor MTU, esto permite llevar a cabo la repotenciación con éxito.

Una vez identificada la problemática, surge la necesidad imperante de llevar a cabo un análisis exhaustivo del costo de ciclo de vida de un activo. Sin embargo, esta evaluación debe estar cimentada en una metodología sólida, y en la actualidad, se presentan múltiples enfoques para ello. Por esta razón, en el segundo capítulo se detalla la metodología de análisis de costo de ciclo de vida propuesta por Woodward en 1997. En este apartado se abarca tanto su contexto histórico, como su procedimiento integral y las diversas aplicaciones.

El tercer capítulo adquiere protagonismo al llevar a cabo la concreción del análisis de costo de ciclo de vida, adaptando la metodología de Woodward. Este enfoque aplica minuciosamente a los motores 20V4000C23 y 20V4000C22, detallando información de importancia acerca de estas unidades. Elementos tales como la potencia, la tecnología que los caracteriza, el consumo de combustible y las principales diferencias entre ambos motores que presentan de manera integral. Además, como parte central del desarrollo en este capítulo, se exponen datos de vital relevancia, abordando los costos de inversión, operacionales y de mantenimiento.

Luego de llevar a cabo la aplicación del Análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV) a los motores fabricados por MTU, el cuarto capítulo se adentra en el minucioso análisis de los resultados extraídos de este proceso. Como desenlace, se identifica la alternativa más beneficiosa y la menos favorable. Este discernimiento sienta las bases para la formulación de los planes de acción necesarios para la implementación de las recomendaciones pertinentes.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un análisis comparativo de los costos de ciclo de vida entre los motores MTU 20V4000C23 y 20V4000C22, considerando su operación en el camión Komatsu 930E-4SE en la Compañía Minera doña Inés de Collahuasi. Para comparar y contrastar los costos de manera integral y determinar la opción que genere el menor costo de ciclo de vida.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Conocer el contexto operacional de la empresa Detroit S.A en relación con la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, con el fin de definir la problemática existente en los motores MTU en sus versiones 20V4000, utilizados en el camión 930E-4SE.

Explicar la metodología del Análisis de Costos de Ciclo de vida, desarrollada por Woodward en 1997, adaptada al sector de flota de camiones de extracción

Justificar los resultados obtenidos del proceso de análisis, aplicando la metodología de análisis de costo de vida de Woodward en los motores 20V4000C23 y 20V4000C22.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.

1. ANTECEDENTES GENERALES.

1.1 PROBLEMÁTICA.

La empresa Detroit S.A. posee un contrato directo con la compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, en el cual se compromete al suministro de motores diésel del fabricante MTU. Estos motores tienen como principal destino los camiones CAEX y los cargadores frontales de Komatsu en operación. El acuerdo establece que Detroit S.A. debe mantener equipos de trabajo en turnos de día y noche bajo una modalidad 7x7. Este conjunto de profesionales es responsable de llevar a cabo la instalación de los motores en los diversos equipos, realizar mantenimiento preventivo en los motores ya incorporados en cargadores frontales y camiones mineros de las marcas Komatsu y Liebherr. Además, se encargan de llevar a cabo diagnósticos de fallas y ejecutar tareas de mantenimiento correctivo ya sea en el taller, como en el terreno, según las necesidades identificadas. Además, la empresa se encarga de la gestión logística y el almacenamiento de repuestos e insumos.

La entrega de los motores se considera concluida cuando el motor se encuentra instalado en el equipo y ha sido puesto en funcionamiento. Para lograrlo, se deben llevar a cabo modificaciones específicas en el modelo 930E – 4SE, las cuales serán abordadas en detalle más adelante. Este proceso se ha mantenido durante los últimos 7 años y ha involucrado una flota de camiones. Durante el primer año de implementación, se observó una disminución en la disponibilidad debido a una alta tasa de fallas. Ante esta problemática, se llevaron a cabo diversas mejoras, como el aumento en la capacitación de los técnicos y la creación de una aplicación para el monitoreo y control remoto de los parámetros de funcionamiento. Si bien esta última mejora logró prevenir fallas catastróficas, no logró reducir la tasa de fallas en general.

Una propuesta que se puso en marcha como prueba consistió en la instalación de un motor con características similares al motor originalmente utilizado. Estos motores comparten dimensiones principales y son del mismo fabricante MTU. Además, el motor de prueba ya ha sido implementado en otras operaciones a menor altitud que la faena en Collahuasi, la cual se ubica a 4.400 metros sobre el nivel del mar. Es importante señalar que la altitud tiene un impacto significativo en el rendimiento de los motores.

Tras un año de operación del motor de prueba, se constató que este ofrecía una mayor disponibilidad y una tasa de fallas más baja en comparación con el motor original. Sin embargo, la comparación entre ambos motores no se limita únicamente a la tasa de fallas y la disponibilidad. Un dilema que enfrenta la empresa es la consideración de los costos, que abarcan la adquisición y operación de los motores, entre otros aspectos. Por lo tanto,

1.2.1 Misión

Atender las necesidades de nuestros clientes con personal altamente capacitado, respetando nuestros compromisos basados en seguridad, calidad, plazo e integración de soluciones, todo en armonía con el medio ambiente generando resultados positivos para nuestros clientes, colaboradores, accionistas y la comunidad integral.

1.2.2 Visión

Ser reconocidos en el mercado por entregar servicio de alta calidad, siendo una empresa referente y líder en las actividades que participa.

1.2.3 Historia

La compañía fue constituida como sociedad comercial el 10 de septiembre de 1949.

Entre sus principales actividades, en orden correlativo se encuentran:

- ❖ Distribución de combustible y lubricantes.
- ❖ Representante de Vehículos General Motors – Inglaterra.
- ❖ En 1976 es representante oficial de Detroit Diesel y Allison Corporation. En años siguientes se adquieren nuevas representaciones, como lo son MTU y Donaldson.
- ❖ En 1990 inicia operaciones el astillero de Puerto Montt, donde se construyen embarcaciones de trabajo, dando servicios de mantención y reparación.
- ❖ En diciembre 1996, las acciones son colocadas en la bolsa de comercio de Santiago.
- ❖ A principio del 2001, la compañía cambia su razón social a Detroit Chile S.A, creándose una nueva división de turismo, construyéndose el hotel Loberías del Sur.
- ❖ En el primer semestre del 2002, se adquiere las instalaciones de un astillero, en el estado de Santa Catarina en Brasil, creándose la filial Detroit Brasil Limitada.
- ❖ En septiembre de 2007 las filiales Detroit Brasil Limitada y Naviera Detroit Chile S.A. constituyeron Starnav Serviços Marítimos Limitada, sociedad radicada en Brasil y que se dedica a prestar servicios marítimos especializados para la industria petrolera y portuaria de ese país.
- ❖ En el área de remolcadores, desde el año 2017, se inicia la actividad de operación conjunta de remolque portuario en los principales puertos de Brasil con una moderna flota de remolcadores
- ❖ A partir de enero de 2019 la compañía tomó la representación de los productos MTU en Argentina,

- ❖ Desde el año 2020 obtiene la distribución de los productos MTU en Perú consiguiendo así incrementar negocios de motores, en el importante mercado minero, marino y de generación eléctrica.

1.2.4. Representaciones oficiales Detroit Chile S.A.

Detroit Chile S.A, posee diversas representaciones oficiales tales como:

- MTU.
- Allison transmission.
- Donaldson.
- Motores Baudouin
- Weichai
- Twin Disc

En la figura 1-2 se puede observar los logos de las distintas representaciones que Detroit S.A tiene bajo su responsabilidad.



Fuente: Detroit S.A

Figura 1-2. Representaciones, Detroit Chile S.A.

1.2.5. Divisiones Detroit Chile S.A.

La empresa, cuenta con diferentes rubros, a nivel nacional como internacional, entre las principales, están:

- ❖ División Motores
- ❖ Astilleros
- ❖ Servicios marítimos portuarios
- ❖ División Turismo

1.2.6. Sucursales Detroit Chile S.A.

Detroit Chile S.A, posee varias sucursales dentro del país, entre las principales se encuentran:

- ❖ Chile.
 - Santiago
 - Iquique
 - Antofagasta
 - Copiapó
 - Coquimbo
 - Puerto Montt
 - Puerto Chacabuco
- ❖ Brasil:
 - Santa Catarina
 - Macaé
 - Rio de Janeiro
- ❖ Argentina:
 - Buenos Aires
- ❖ Perú:
 - Lima

1.2.7. Mineras Detroit Chile S.A.

- ❖ El Teniente.
- ❖ Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.
- ❖ Radomiro Tomic.
- ❖ Chuquicamata.
- ❖ Codelco Andina.
- ❖ Los Bronces.
- ❖ Escondida.
- ❖ Zaldívar.
- ❖ Rajo Inca
- ❖ El Soldado

1.3. FAENA COLLAHUASI

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, es una compañía minera dedicada a la producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno. Es una de las seis principales cupríferas del mundo y el segundo yacimiento más grande de Chile.

La explotación se realiza a rajo abierto y se concentra en los yacimientos Rosario y Ujina. Estos se ubican en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, en el extremo norte de Chile a una altura promedio de 4.400 m.s.n.m.

La producción de concentrado de cobre es trasladada como pulpa a través de un sistema de dos mineroductos, de 7 y 8 pulgadas respectivamente y 203 [Km] de extensión, hasta el Terminal Marítimo Collahuasi en el sector de Patache, ubicado a 65 [Km] al sur de Iquique.

1.3.1 Proceso productivo

En la Compañía Doña Inés de Collahuasi el mineral es beneficiado en una planta concentradora, ubicada en el sector de Ujina del área cordillera, mediante flotación convencional para producir concentrado de cobre y de molibdeno.

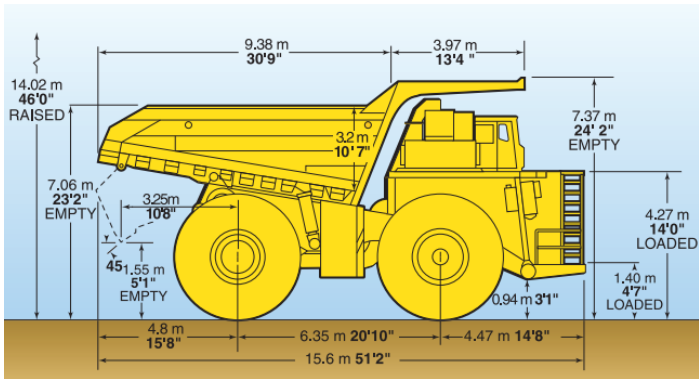
- ✓ Concentrado de cobre, es obtenido del procesamiento de los minerales sulfurados luego de ser sometidos a operaciones de chancado primario y molienda en 3 molinos SAG y 4 molinos de bolas, para luego pasar a un proceso de remolienda, flotación convencional y posterior disminución del porcentaje de humedad a través de 2 espesadores de concentrado. Los relaves del proceso de flotación son reducidos en humedad en 7 espesadores y depositados posteriormente en el tranque de relaves ubicado al noreste de la planta concentradora, desde donde se recircula agua para el proceso. El concentrado de cobre que se obtiene es enviado como pulpa a través de un mineroducto de 203 [Km] de longitud de 8 [in] hasta el sector de Puerto Patache, donde es espesado (2 espesadores) y filtrado (en 4 filtros de prensa) hasta obtener una humedad no mayor que 10%. El concentrado es almacenado en un galpón cerrado con presión negativa, desde donde es finalmente extraído para ser embarcado.
- ✓ Concentrado de molibdeno es obtenido como sub-producto del concentrado de cobre a través de la planta de Molibdeno ubicada en el área de Puerto Patache. El concentrado de molibdeno es sometido a flotación selectiva, espesamiento a través de 2 espesadores y filtrado para su posterior embalaje en maxi sacos y posterior venta

1.4. CAMIÓN KOMATSU 930E-4SE

El camión 930E-4SE es un vehículo de carga utilizado en aplicaciones mineras. Está diseñado específicamente para transportar cargas pesadas en condiciones difíciles y terrenos poco preparados. Estos camiones se caracterizan por su gran capacidad de carga y por su capacidad para operar en minas a cielo abierto. El peso bruto del camión es de 420.000 [Kg], con capacidad de carga nominal de 320 [Ton]

El camión 930E-4SE está equipado con un motor diésel de alta potencia, generalmente es un motor diésel Cummins de QSK 78 con una potencia de 3.300 [hp] a 1.900 [r.p.m], este motor está conformado por 18 cilindros con un peso de 9.608 [Kg]. En la figura 1-3 se puede observar un camión CAEX del fabricante Komatsu modelo 930E-4SE con sus dimensiones principales.

Los modelos de camiones de extracción del fabricante Komatsu están denominados con un conjunto de 3 números, seguido de una letra, un guion, otro número sólo y letras. Para el modelo de camión en estudio, el 930 corresponde al peso bruto del equipo (peso del equipo + peso de la carga) en libras. Un total de 930.000 libras esto es igual a 420 [Ton] e igual a 420.000 [Kg]. La letra E indica que su propulsión es eléctrica, el -4 indica información como la revisión, actualización o la versión y por ultimo las ultimas letras, SE indican que es una versión especial.



Fuente: Komatsu Chile

Figura 1-3. Camión Komatsu 930E-4SE

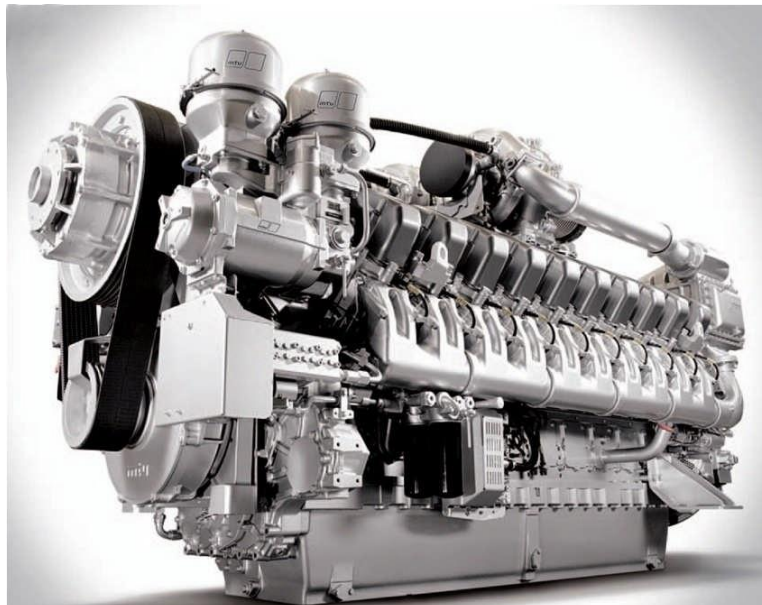
1.5. MOTOR DETROIT DIESEL MTU 20V4000

El motor diésel de combustión interna es el responsable de convertir la energía química del combustible en energía mecánica. Esta energía mecánica se transfiere a un alternador principal de corriente alterna, que la convierte en energía eléctrica para alimentar los motores eléctricos de tracción.

Los motores 20V4000 son diseñados, creados y desarrollados por el fabricante alemán MTU, quién fabrica motores para trenes, navíos, vehículos militares, maquinaria agrícola, minera y grupos electrógenos. Estos motores pueden adaptarse para utilizar diferentes combustibles según la aplicación y las necesidades, como el diésel, la gasolina y el gas. La fábrica MTU, perteneciente al grupo Rolls-Royce, tiene instalaciones en Alemania, Estados Unidos y China.

Las siglas de los motores 20V4000 tienen una clasificación y denominación específica. "20V" hace referencia a un motor de 20 cilindros en disposición en V. mientras que la denominación "4000" indica la cilindrada unitaria en centímetros cúbicos, es decir 4000 [cc] por cada cilindro.

Este motor está diseñado y fabricado con tecnología de punta, lo que permite reducir el tiempo de reparación en el camión en comparación con otros motores de diferentes fábricas. Además, su avanzada tecnología le permite cumplir con normas de emisiones, como la normativa China NRMM Stage III y la EPA Nonroad T2 Comp (40CFR89). También cuenta con una función de optimización del consumo de combustible, lo que maximiza la eficiencia en el uso de combustible. En la figura 1-4, se muestra un motor MTU 20V4000C23, donde se pueden observar los componentes principales, como las tapas de válvulas, la bomba de combustible y el sistema de filtración de aceite.



Fuente: MTU – Rolls-Royce

Figura 1-4. Motor MTU 20V4000C23

1.6. CONCEPTO DE REPOWER

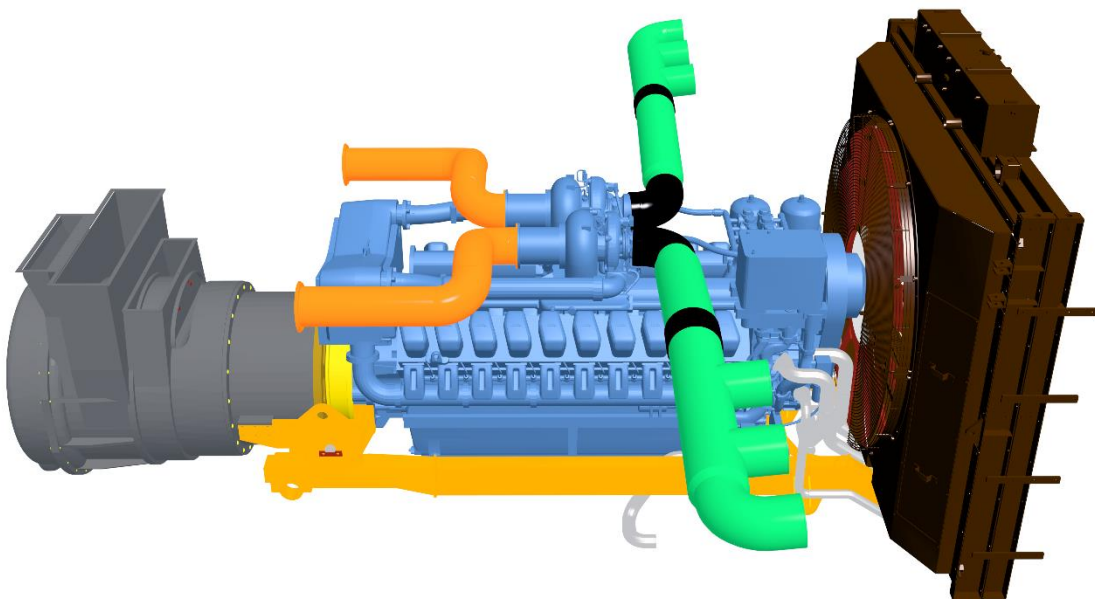
El camión minero Komatsu 930E-4SE de fábrica es equipado con un motor Cummins QSK 78, por lo tanto, el marco legal de las garantías del camión contempla que su operación con el motor Cummins, estas garantías son por un tiempo acotado. Una vez finalizado este tiempo el propietario/a del camión puede modificarlo, como es el caso de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi quien, por medio de la empresa Detroit S.A realiza los *repower* a sus camiones.

El concepto de *Repower* consiste en equipar el camión con otro motor de mayor potencia y de mejor rendimiento de consumo de combustible.

Para el caso del camión 930E-4SE, se equipa con un motor MTU 20V4000, para ello se debe modificar el suschasis, el radiador y montar componentes que permitan el acople del motor con el alternador principal.

Si bien el principal motivo del *repower* es la repotenciación del camión, esto conlleva otros beneficios, como la reducción de uso de combustible, la disminución de tiempo de reparación y ofrece la opción de control de parámetros vía remota para prevenir daños al motor.

La figura 1-5 es un modelado en 3D de un *repower* armado, donde se visualiza, de color café se representa el conjunto radiador, este conjunto de está compuesto por 4 enfriadores, el principal corresponde al sistema de enfriamiento del motor, el secundario es para refrigerar el sistema de intercooler, los dos enfriadores restantes son para refrigerar el combustible y para el funcionamiento del aire acondicionado. El subchasis (de color amarillo), es el responsable de soportar todos los componentes y es quien se conecta de manera mecánica al chasis del camión. Además, se puede ver el motor 20V4000C23 (de color azul) con sus respectivos ductos de admisión (color verde) y el escape (color naranja); y el alternador principal (gris), el cual se encarga de generar la energía eléctrica que alimenta a los motores eléctricos de tracción.



Fuente: Detroit S.A

Figura 1-5. *Repower* equipado con motor C23 para camión 930E-4SE

La empresa Detroit S.A, en calidad de representante del fabricante de motores MTU para Chile y países de Latinoamérica, se especializa en el suministro, mantenimiento y reparación de motores diésel. Su enfoque se dirige hacia diversas empresas que operan en la extracción de minerales. Uno de sus destacados contratos directos es con la prominente Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

En esta asociación estratégica, Detroit S.A despliega su gama completa de servicios. Dentro de estos, se destaca el suministro de motores 20V4000 en sus variantes 20V4000C23 y 20V4000C22. Estos motores son destinados a potenciar la flota de camiones Komatsu 930E-4SE de la compañía. Este involucramiento en el reemplazo y equipamiento de estos motores contribuye al mejoramiento y optimización de las operaciones mineras.

Mediante esta colaboración, Detroit S.A no sólo proporciona motores de alto rendimiento, sino que también brinda servicios de mantenimiento y reparación, asegurando así un funcionamiento ininterrumpido y eficiente de la flota de vehículos de extracción. La alianza con la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi demuestra la capacidad de Detroit S.A para cumplir con los rigurosos estándares y demandas del sector minero, y fortalece su posición como un socio confiable en la industria.

Al analizar la problemática en cuestión, se hace evidente la dificultad que enfrentan los motores para alcanzar su óptimo rendimiento operativo. Esta dificultad repercute negativamente en la disponibilidad del equipo en el que están instalados. Esta situación se puso de manifiesto en el motor inicial, el modelo 20V4000C23, el cual mostró una baja disponibilidad acompañada de una alta tasa de fallos. Sin embargo, esta condición fue revertida al equipar otro camión de la flota con la segunda versión de los motores MTU, el modelo 20V4000C22. Las disponibilidades y tasas de fallo difieren entre ambos motores, y exhiben un comportamiento inversamente proporcional, al igual que sus costos. Estos costos son un factor crucial en la toma de decisiones por parte de la gerencia, al determinar qué versión de motor debe prevalecer en la operación de Collahuasi.

Lo anteriormente descrito manifiesta la necesidad de realizar un análisis de costo de ciclo de vida a ambos motores, este análisis debe considerar múltiples factores y variantes, En cuanto a los análisis existen una variedad de metodologías, una de las más destacada y seleccionada para ser desarrollada en el presente estudio, es la que fue propuesta por Woodward en 1997. Para el desarrollo que considera la aplicación esta metodología, resulta crucial adquirir un profundo conocimiento de su proceso y de los datos esenciales requeridos para su evaluación, En este contexto, el segundo capítulo proporciona una visión detallada del Análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV) de Woodward, estableciendo el camino para su posterior ejecución.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD
ADAPTADA A LOS MOTORES DEL SECTOR MINERO.

2. METODOLOGÍA ACCV DE WOODWARD ADAPTADA LOS MOTORES DEL SECTOR MINERO.

2.1 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS.

El Análisis de Coste de Ciclo de Vida (ACCV), comenzó a ser utilizado de forma estructurada desde 1970, en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, esto, en el contexto de la aviación militar, donde las metodologías desarrolladas por el Departamento de Defensa, sólo se enfocaban en los procesos de la adquisición y la logística, sin abordar la fase de diseño y producción.

Una vez reconocida la importancia de aplicar la metodología de Análisis de Coste de Ciclo de Vida, en los procesos de diseño, planificación y control de producción. La fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos llevo a cabo, una conferencia en 1984. La cual contó con la participación de las principales academias y organizaciones industriales. Durante el evento se identificaron 34 áreas de investigación, destacando especialmente las áreas de evaluación económica en la fase de diseño, análisis de ciclo de vida y diseño asistido por ordenador.

Para mejorar el diseño de los activos y reducir los cambios a lo largo del tiempo, se diseñó una técnica efectiva en el proceso de optimización de los costes, conocida ingeniería de ciclo de vida. Está ingeniería de ciclo de vida considera la fase inicial del desarrollo de un activo, comienza con la identificación de su necesidad, y partir de la identificación, se desarrolla el diseño conceptual, preliminar detallado, la utilización, el soporte y la desincorporación.

En los últimos años, expertos en ingeniería de valor, diseño y optimización de la producción perfeccionaron el proceso de cuantificación de costos, incorporando técnicas que cuantifican la confiabilidad y evalúan como los eventos de fallos afectan los costos totales del sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida. Estas mejoras han logrado reducir la incertidumbre en la toma de decisiones en áreas como, el diseño, desarrollo, sustitución y adquisición de activos de producción.

En todo el proceso, se toman una cantidad considerable de decisiones y acciones, técnicas y no técnicas durante el período funcionamiento de un activo.

Las acciones relacionadas con la fase de diseño del sistema productivo ejercen un impacto significativo en el Ciclo de Vida del activo y posee una influencia en los costos totales de producción. Una de las decisiones de particular interés están las relacionadas con la mejora de la confiabilidad, que abarca la calidad del diseño, la tecnología empleada, la complejidad técnica, la frecuencia de fallos, los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, los niveles de mantenibilidad y accesibilidad. Estos aspectos influyen significativamente en el costo total del ciclo de vida del activo y afectan en gran medida

las perspectivas de prolongar la vida útil de los sistemas de producción a costos razonables.

En el contexto de los análisis de costo de ciclo de vida, diversos expertos han propuesto diversas metodologías y definiciones. A continuación, se presentan algunas de estas definiciones.

Kirt and Dellisola define el ACCV como una técnica de cálculo económico que permite optimizar la toma de decisiones asociadas a los procesos de diseño, selección, desarrollo y sustitución de los activos que conforman un sistema de producción. La misma propone evaluar de forma cuantitativa todos los costes asociados al período económico de vida útil esperado, expresados en unidades monetarias equivalentes anualizados.

Woodhouse define el ACCV como un proceso sistemático de evaluación técnico - económica, aplicada en el proceso de selección y reemplazo de sistemas de producción, que cuantifica el impacto real de todos los costes, incluyendo los costes por fallas, a lo largo del ciclo de vida de los activos [\$/año]

En términos generales, la metodología de ACCV/LCCA permite seleccionar aquellos activos que generen los menores costes, ayudando de esta forma a maximizar la rentabilidad del proceso de producción.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS COSTES.

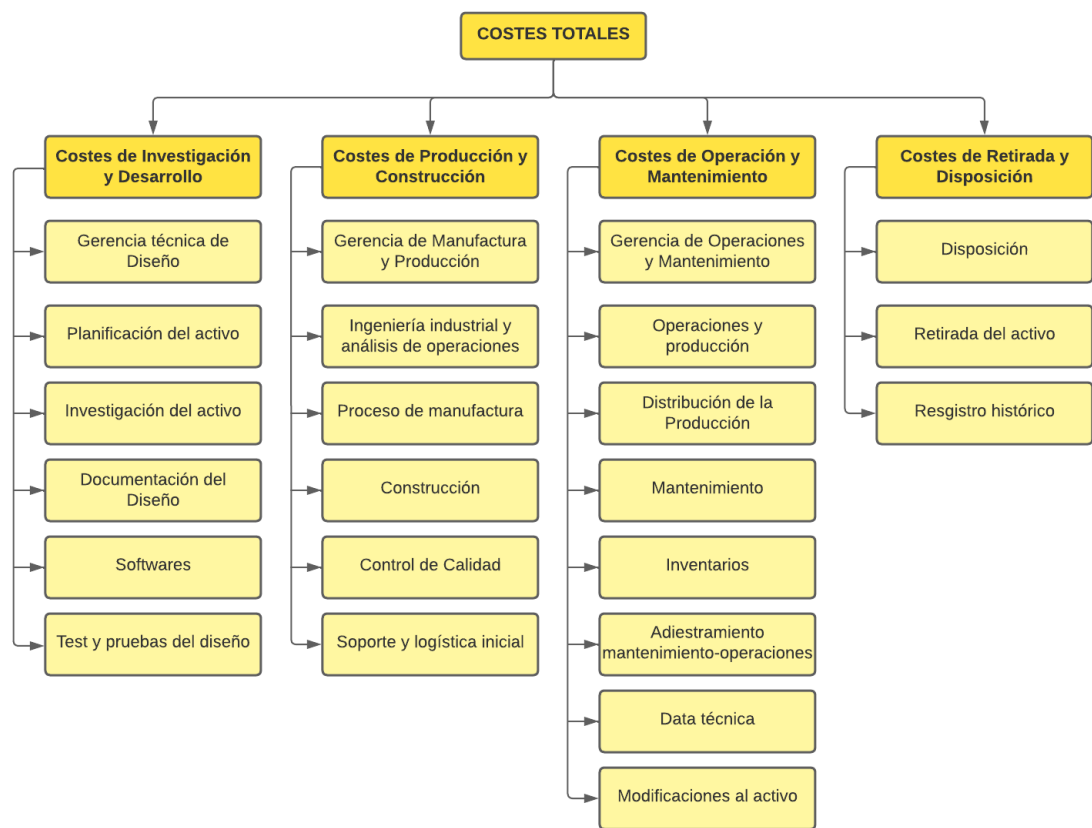
El costo total de un activo, desde su inicio hasta su retiro, recae en el usuario y tiene un impacto directo en la comercialización. Los compradores, pagan por los recursos necesarios para diseñar y comercializar el activo, mientras que los usuarios, invierten recursos necesarios para el uso, operación y desincorporación.

El costo total del ciclo de vida se divide en categorías y es conocida como Estructura Desglosada de Costos, que representa los tipos principales de costos asociados con el proceso de diseño, producción, comercialización, uso y desincorporación de un activo.

Es importante considerar que el nivel de desglose y las categorías de costos varían según factores, como la naturaleza del activo, la disponibilidad de información, proceso de diseño, fabricación, condiciones económicas, recursos humanos y la tecnología disponible

Un aspecto relevante se relaciona con la diferencia en la importancia de los distintos tipos de costos, esto hace referencia en que mientras la organización busca conocer el costo total del activo a desarrollar, el diseñador está interesado en los costos que puede controlar. Algunos costos que aparecen durante la vida del activo son complicados de visualizar en la fase de diseño y está relacionado en cómo la organización planea desarrollar el

producto. Por lo tanto, los costos totales del ciclo de vida de un activo deben categorizarse en costos relacionados con el proceso global de desarrollo y costos relacionados con el proceso de diseño del activo. Algunas categorías de costos en las que el diseñador puede no estar interesado son los costos de producción y construcción del activo. En el diagrama conceptual 2-1, se ilustran, la forma en cómo, se dividen las categorías los costos de ciclo de vida.



Fuente: Elaboración propia, en base a Fabrycky and Blanchard, 1991

Diagrama Conceptual 2-1. Desglose de los costos.

2.2.1. Costes de investigación y desarrollo inicial.

Los costos asociados con esta etapa están relacionados con las primeras fases de desarrollo del sistema, que incluyen en la conceptualización del proyecto, la ingeniería básica y los detalles del diseño. Es fundamental destacar que los resultados obtenidos en el proceso de análisis de costos son más efectivos durante las etapas iniciales de desarrollo, porque ya finalizado el diseño, resulta complicado realizar modificaciones significativas en los aspectos económicos. Además, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben aplicarse en las fases mencionadas, para buscar aprovechar al máximo las oportunidades de una ingeniería económica eficiente. Es importante tener en cuenta que aproximadamente dos tercios de los costos totales del ciclo de vida de un activo quedan determinados en la fase conceptual y diseño preliminar.

2.2.2. Costes de producción y Construcción.

Los costos de esta etapa están relacionados con actividades, que incluyen en la fabricación, el ensamblaje y las pruebas de los productos, así como también en las instalaciones de producción, las operaciones en la línea de producción, el control de calidad y los costos iniciales de soporte y logística, como los repuestos para el proceso de manufactura, las pruebas y los equipos de soporte de producción.

El objetivo primordial de esta fase es determinar los procesos más eficientes para llevar a cabo la producción del activo diseñado.

2.2.3. Costes de Operación y Soporte.

Estos costos abarcan gastos relacionados con la operación, consumo de energía, adquisición de insumos y materias primas, mantenimiento preventivo y correctivo, revisiones generales, así como diseño y modificaciones de ingeniería. Además, engloban los costos logísticos vinculados a la gestión de repuestos, costos de capacitación y cualquier otro costo que surja durante la vida útil del activo. Entre estos costos, los de operación y soporte destacan como los más significativos y, al mismo tiempo, son los más difíciles de prever.

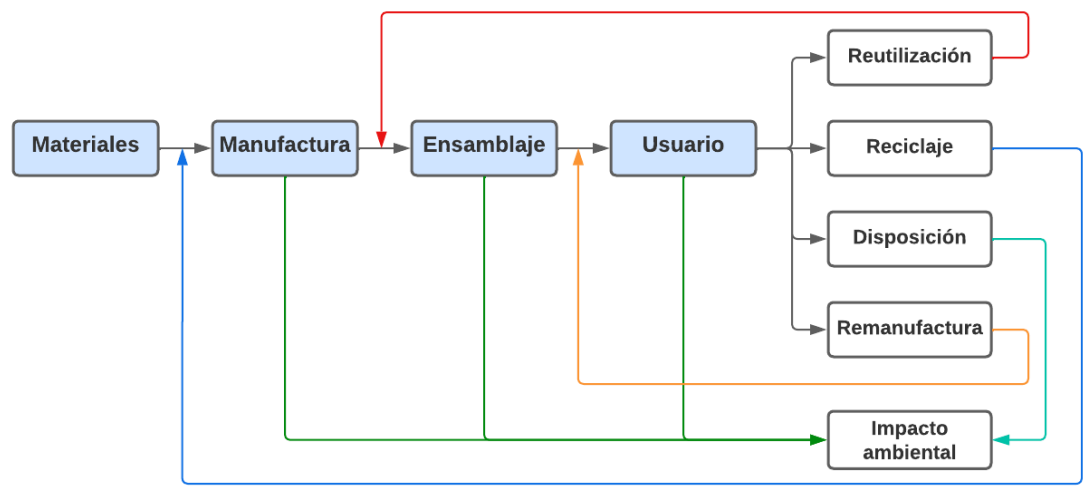
Un aspecto importante en esta etapa es la disponibilidad que el activo debe mantener para cumplir con las expectativas de producción. La disponibilidad tiene relación directa con la capacidad de mantener el activo en funcionamiento con el menor tiempo y costo posibles, sin comprometer su confiabilidad y seguridad. En la mayoría de los procesos de producción, cada minuto de inactividad representa pérdidas financieras. En este contexto, el tiempo se convierte en un costo, lo que implica que las actividades de mantenimiento deben realizarse de manera rápida, con tiempos de reparación cortos y eficiencia para cumplir con los niveles de disponibilidad requeridos por el usuario.

2.2.4. Costes de Desincorporación y Retirada.

Los costos en esta fase se relacionan con actividades que implican la transformación de materiales y la gestión de recursos energéticos, lo que genera residuos que afectan el entorno, como el consumo de energía, la contaminación del aire y la gestión de residuos son preocupaciones globales y temas de discusión pública. En consecuencia, en el futuro, los sistemas de producción deben desarrollar procesos y tecnologías de fabricación sostenibles.

Un análisis exhaustivo de los costos del ciclo de vida debe incluir todas las actividades relacionadas con la retirada y el desmantelamiento de activos. Lo que implica la limpieza de residuos, control de emisiones al medio ambiente, restauración ambiental en áreas de

producción, gestión y almacenamiento de productos desechados, entre otras actividades. En el diagrama conceptual 2-2 se observan de manera conceptual los procesos.



Fuente: Elaboración propia, en base Ishii et al. 1994

Diagrama Conceptual 2-2. Proceso de retirada.

2.3. PROCESO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCV.

Los aspectos de costos y diseño son procesos independientes. El diseño busca crear el mejor activo posible, mientras que en los costos se prioriza la minimización de los gastos relacionados con el diseño y la producción.

Es importante destacar que ambos procesos comparten objetivos, que incluyen el desarrollo de un activo, que cumple con las necesidades y a la vez es competitivo económicamente.

Se han desarrollado numerosas metodologías de ACCV, que proponen enfoques para evaluar diseños o alternativas de acción con el fin de utilizar eficientemente los recursos humanos y económicos disponibles en el desarrollo de sistemas de producción. Es importante destacar que los resultados obtenidos a través del ACCV son más efectivos durante las etapas de diseño conceptual y preliminar. Una vez completado el diseño, modificar significativamente los resultados económicos se vuelve complicado. Además, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben abordarse de manera específica durante la fase de diseño del activo para aprovechar al máximo las oportunidades de una ingeniería económica efectiva. Aproximadamente dos tercios de los costos totales del ciclo de vida de un activo o sistema se determinan durante la fase conceptual y de diseño preliminar.

El cálculo de los costos del ciclo de vida se debe aplicar a todas las etapas de diseño del sistema, desde el diseño y desarrollo hasta la producción, construcción, uso operativo y apoyo logístico.

A medida que avanza el ciclo de vida, el costo se convierte en un parámetro importante para evaluar configuraciones de diseño alternativas y seleccionar la solución. Es por ellos, que los datos de costos se desarrollan en base a las características definidas del diseño y la producción, y se utilizan en la estimación de los costos del ciclo de vida. Estas estimaciones se comparan con los requisitos iniciales para determinar el grado de cumplimiento y la necesidad de tomar medidas correctivas.

La falta de precisión en la estimación de costos es un factor crítico que puede tener consecuencias financieras devastadoras durante la ejecución de un proyecto industrial. En términos generales, la falta de precisión en las estimaciones de costos puede manifestarse de dos maneras: cuando las estimaciones son menores que los costos reales o cuando son mayores que los costos reales. Cuando las estimaciones subestiman los costos reales, los planes iniciales de contratación de mano de obra, la ejecución de actividades clave y la adquisición de materiales y equipos pueden volverse inalcanzables. En este escenario, se requiere una revisión y reorganización de los planes de desarrollo previamente establecidos, lo que normalmente resulta en un aumento de los costos para cumplir con los objetivos y metas del proyecto asociado al desarrollo del activo.

Por otro lado, cuando las estimaciones de costos son mayores que los costos reales, podría esperar un aumento en los beneficios del proyecto, lo cual generalmente no se materializa. En la práctica, el dinero adicional disponible tiende a ser gastado, a menos que la organización mantenga un control riguroso de los costos, lo cual es poco probable.

En el proceso de estimación de costos relacionados con el desarrollo de un activo, se encuentran una serie de requisitos que varían significativamente según la etapa del programa de diseño y producción, la complejidad de los procesos y el alcance de las técnicas de análisis empleadas. Durante las primeras etapas de desarrollo y diseño conceptual, la disponibilidad de datos es limitada y las estimaciones de costos dependen en su mayoría de modelos paramétricos, lo que implica un nivel de precisión de datos que oscila entre el 20% y el 50%. En las etapas intermedias de diseño, la cantidad de información disponible aumenta, lo que permite la utilización de modelos comparativos de costos para activos similares, lo que resulta en un nivel de precisión de datos de alrededor del 70% al 85%. En la fase de diseño detallado, se dispone de toda la información del activo, incluyendo especificaciones de producción, procesos de fabricación, requisitos de soporte y logística. En esta etapa, es común emplear modelos de estimación de costos detallados, lo que se traduce en un alto nivel de precisión de datos que se sitúa entre el 85% y el 95%. (Creese and Moore, 1990).

2.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONFIABILIDAD EN LOS MODELOS DE ACCV.

Woodhouse argumenta que, en la industria actual, es esencial llevar a cabo una evaluación detallada y cuantitativa del impacto económico de la confiabilidad a lo largo del ciclo de vida de un activo industrial para diseñar un sistema de producción eficiente y competitivo. Cuantificar la confiabilidad tiene dos objetivos principales. En primera instancia, permite anticipar cómo los procesos de producción pueden interrumpirse debido a eventos de fallos imprevistos y cómo varía la frecuencia de tales fallos. Y, en segundo lugar, facilita el análisis y la evaluación de los costos asociados a los fallos en términos de seguridad, medio ambiente, operaciones y producción.

En este contexto, la confiabilidad se refiere a la capacidad de un sistema de producción para mantener su funcionamiento de manera segura y eficiente a lo largo de su ciclo de vida. Cuando la confiabilidad disminuye y el proceso de producción se ve afectado por una cantidad significativa de eventos de fallos imprevistos, se generan costos considerables, principalmente relacionados con la restauración de la funcionalidad del sistema y los impactos en el proceso de producción. Estos costos se traducen en costos directos y costos de penalización.

Los costes totales por confiabilidad que son provocados por fallos imprevistos se pueden caracterizar de la siguiente forma:

- Costes por penalización.

Downtime, es la indisponibilidad de producción, pérdidas de oportunidad/producción diferida, pérdidas de producción, pérdidas operacionales, impacto en la calidad, impacto en seguridad y ambiente.

- Costes directos por mantenimiento correctivo.
 - Mano de obra: costes directos relacionados con la mano de obra, ya sea, propia o contratada, y en caso de una acción no planificada.
 - Materiales y repuestos: costes directos relacionados con los consumibles y los repuestos utilizados en caso de una acción no planificada.

El efecto en los costos ocasionado por un activo de baja confiabilidad está directamente relacionado en cómo se comportan los siguientes indicadores.

- Tiempo promedio entre fallos.

$$MTBF = \frac{\text{tiempos operacionales}}{\text{números de fallos}}$$

Ecuación 2.1. Tiempo promedio entre fallos

Sistemas con MTBF pequeños, reflejan valores de confiabilidad bajos y un alto número de fallos.

- Tiempo promedio para reparar.

$$MTTR = \frac{\text{tiempos de reparación}}{\text{números de fallos}}$$

Ecuación 2.2. Tiempo promedio para reparar

Sistemas con MTTR largos, reflejan valores de Mantenibilidad bajos, los cuáles son sistemas en los que se necesita gran cantidad de tiempo para poder recuperar su función.

Conforme a Woodhouse, una razón importante detrás del aumento de los costos en el ciclo de vida se origina con frecuencia en la falta de anticipación ante la aparición imprevista de eventos de fallos. Esto se debe principalmente a la falta de conocimiento y análisis en la fase de diseño con respecto a los aspectos relacionados con la confiabilidad. Este escenario resulta en un aumento de los costos de operación, que no fueron considerados inicialmente, impactando así, en la rentabilidad del proceso de producción.

2.5. MODELO DE ACCV DE WOODWARD.

El Modelo de Woodward, también conocido como el modelo de Tasa de Fallos Constante, es un enfoque utilizado en el Análisis de Coste de Ciclo de Vida (ACCV) para evaluar los eventos de fallos y sus efectos en un sistema de producción.

Este modelo se basa en la suposición de que la tasa de fallos de un activo es constante a lo largo de su vida útil. En otras palabras, se espera que el activo falle a una tasa constante durante su operación, sin tener en cuenta el tiempo transcurrido desde su inicio.

Al aplicar el Modelo de Woodward en el ACCV, se busca cuantificar las consecuencias de los fallos y su impacto en los costos totales de producción. Esto implica considerar los costos asociados a la baja confiabilidad, como los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, la frecuencia de los fallos y otros factores relacionados con la confiabilidad del activo.

2.5.1 Características del modelo Woodward

- Suposición de tasa de fallos constante.

El modelo se basa en la suposición de que la tasa de fallos de un activo es constante durante su vida útil. Esto implica que el activo tiene una probabilidad constante de fallar en cualquier momento, independiente del tiempo transcurrido desde su puesta en funcionamiento.

- Ventajas del modelo.

El modelo de Tasa de Fallos Constante es relativamente simple y fácil de aplicar. Es especialmente útil cuando no se cuenta con datos detallados sobre la confiabilidad del activo y se busca una estimación rápida de los costos de fallos.

- Limitaciones del modelo:

La suposición de una tasa de fallos constante puede no reflejar la realidad de todos los activos, ya que la confiabilidad puede variar a lo largo del tiempo debido a diferentes factores, como el envejecimiento, el desgaste o las condiciones de operación. Además, este modelo no considera las tasas de fallos iniciales más altas o bajas que pueden ocurrir al principio o al final de la vida útil del activo.

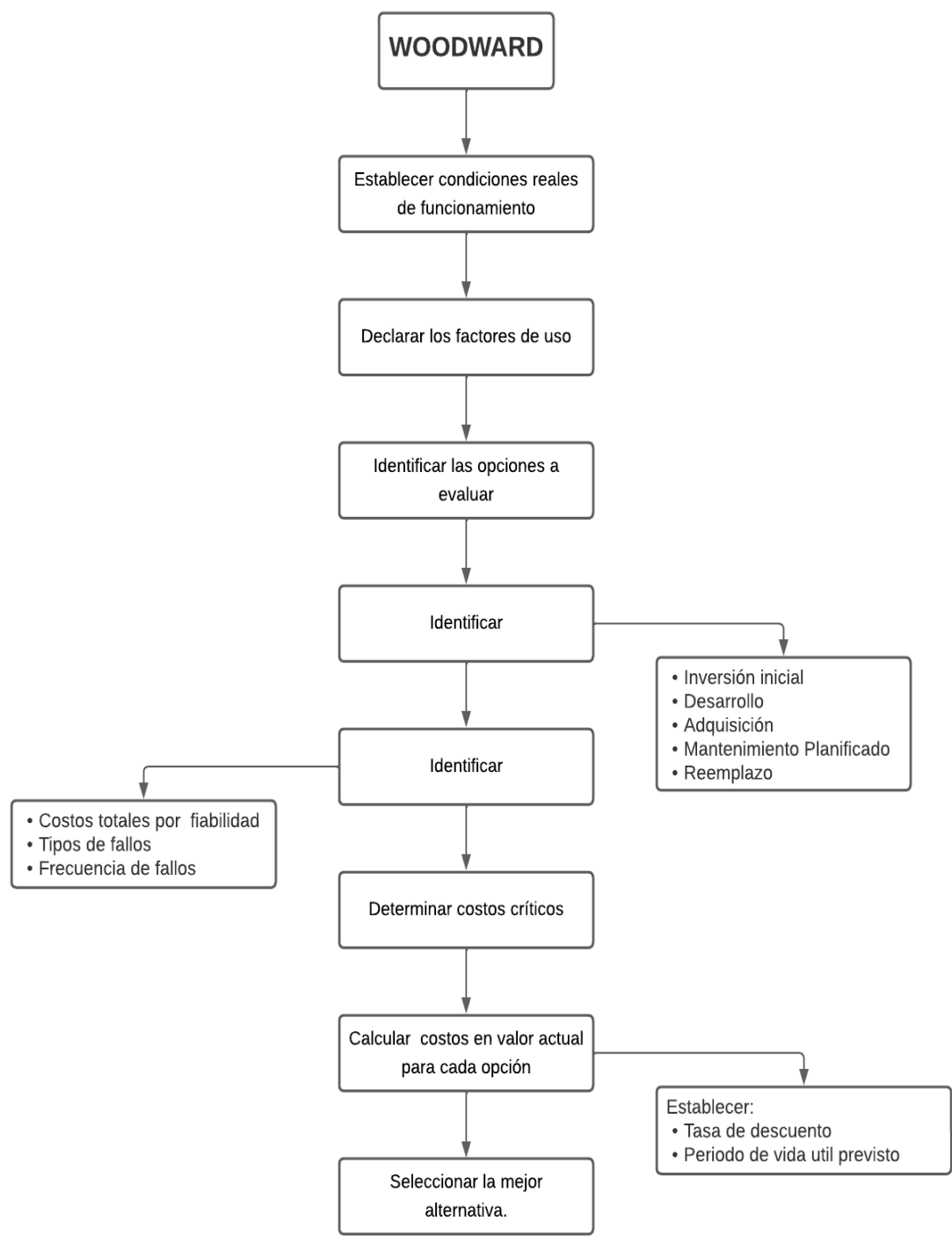
- Alternativas al modelo de Tasa de Fallos Constante.

Existen otros modelos más avanzados que tienen en cuenta variaciones en la tasa de fallos a lo largo del tiempo, como el modelo de Tasa de Fallos Weibull y el modelo de Tasa de Fallos Proporcional al Tiempo (PTFR). Estos modelos son más flexibles y se ajustan mejor a las características de confiabilidad de los activos en diferentes etapas de su vida útil.

En resumen, el Modelo de Woodward es una herramienta utilizada en el ACCV para evaluar los eventos de fallos y su impacto en los costos totales de producción. Se basa en la suposición de una tasa de fallos constante a lo largo de la vida útil del activo.

2.5.2. Procedimiento de la implementación de Woodward.

El modelo Woodward, establece un procedimiento, para lograr el cálculo del impacto de los costos de falla en el ciclo de vida de un activo. A continuación, se presenta el diagrama conceptual 2-3, donde se detalla el procedimiento que debe llevar a cabo, en función de las consideraciones que se deben tener presente.



Fuente: Elaboración propia

Diagrama Conceptual 2-3. Procedimiento Woodward

El modelo Woodward establece la siguiente expresión para calcular los distintos costos de un activo en su vida útil.

$$CTCV(P) = \sum_{T=1}^T CI + CO + CMP + TCPf + CMM - VR$$

Ecuación 2.3. Costos totales del ciclo de vida en valor presente.

Donde:

- (P) = Valor presente.
- $CTCV(P)$ = Costes totales del ciclo de vida en valor presente (P), para una tasa de descuento (i) y un período de vida útil esperado (T).
- CI = Coste inicial de adquisición e instalación, normalmente dado en valor Presente.
- CO = Costes operacionales, normalmente dado como valor Anualizado.
- CMP = Costes de Mantenimiento Preventivo, normalmente dado como valor Anualizado
- TCPf = Costes Totales por Confiabilidad (costes por fallos), normalmente dado como valor Anualizado. En este caso se asume tasa de fallos constante, por lo cual el impacto en costes es igual en todos los años.
- CMM = Costes de Mantenimiento Mayor – Especiales, normalmente dado como valor Futuro.
- VR = Valor de reposición

La metodología Woodward establece la ecuación 2.3, para calcular los costos totales del ciclo de vida de un activo, al ser adaptada al área de motores de combustión de camiones de extracción del sector minero, debe ser explicado el proceso de aplicación de la ecuación mencionada.

El primer paso para calcular los CTCV, es determinar los costos iniciales (CI), donde se consideran el costo de adquisición e instalación del motor de combustión interna, además de considerar los costos de investigación y los otros costos administrativos, licitaciones, y notas de garantías.

Segundo paso, es establecer los costos operacionales (CO), donde se establecen las cantidades y costos de los lubricantes, refrigerantes y combustible, para el caso del combustible se debe investigar el consumo del motor en sus fases de operación; para una mayor simplificación del cálculo, lo ideal es establecer el consumo del combustible en litros consumidos en una hora y luego llevarlo a un costo anual, de la misma forma se debe establecer el costo de los lubricantes y del refrigerante, en un valor anual de operación, además de adicionar el costo del operador.

En el tercer paso del cálculo principal para los costos totales, se determinan los costos por mantenimiento preventivo (CMP). La gran mayoría de los fabricantes de motores de combustión entregan el plan de mantenimiento, donde se indica los repuestos, las actividades y establece los periodos de tiempo en que se debe hacer cada actividad de mantenimiento. A partir de esa ficha se selecciona el plan de acuerdo al tiempo de operación que tendrá el motor, que en el área industrial está dada en horas. Ya

seleccionado el plan, se calculan todos los costos que conllevan realizar las mantenciones al equipo, como los costos de mano de obra, repuestos e insumos.

El costo de mantenimiento preventivo debe quedar expresado en valor anual.

En el cuarto paso, se deben determinar los costos totales por confiabilidad (TCP_f) y para esta determinación, se desarrollar una secuencia de pasos y cálculos que serán explicados más adelante, en detalle y con un ejemplo simplificado.

El costo de mantenimiento mayor (CMM), forma el quinto paso a desarrollar.

Para estos costos también se determinan con las indicaciones que dispone el fabricante del equipo, que establece los componentes a reemplazar, limpiar o inspeccionar, a través de esa fuente de información. Se calculan los costos de los repuestos, insumo y valor de la mano de obra. El costo total obtenido debe quedar en valor futuro.

En el área de motores industriales que operan en el sector minero y han cumplido su vida útil, son generalmente vendidos en el estado que quedaron tras dejar de operar, las ventas de estos activos en su mayoría son a las empresas gestoras de residuos metálico o en casos extraordinarios mineras de menor envergadura los compran para reparar y operarlos. La venta de los motores tras cumplir su vida útil se denomina en el cálculo de costos totales del ciclo de vida, como valor de reposición (VR).

En relación a la evaluación de los costos relacionados con la confiabilidad, el modelo propuesto por Woodward se centra en analizar el impacto de los fallos más significativos en la estructura de costos de un sistema de producción mediante un proceso simplificado que se resume de la siguiente manera: en primer lugar, se identifican los tipos de fallos más relevantes; a continuación, se asigna a cada tipo de fallo un valor constante de frecuencia de ocurrencia anual, este valor permanecerá constante a lo largo de la vida útil esperada; luego, se calcula el impacto anual en términos de costos provocado por los fallos en áreas como la producción, las operaciones, el medio ambiente y la seguridad; finalmente, se estima el impacto total en costos de los fallos para los años de vida útil esperada mediante su valor presente utilizando una tasa de descuento específica.

A continuación, se detallan los pasos que se deben seguir para calcular los costos asociados a los fallos según el Modelo de Woodward:

1. Definir los tipos de fallos (f). Donde $f = 1 \dots F$ para F tipos de fallos
2. Definir la frecuencia de fallos esperada por año S_f . Se expresa en fallos por año. Esta frecuencia asume un valor constante por año, para el ciclo de vida útil esperado y se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$S_f = \frac{N}{T} = \left[\frac{\text{fallos}}{\text{año}} \right]$$

Ecuación 2.4. Frecuencia de fallos.

Donde:

N = Número total de fallos

T = Número total esperado de año de vida útil.

3. Calcular los costes asociados a cada tipo de fallo C_f [\$/fallo]. Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

$$C_f = \sum_{f=1}^F MTTR_f \times Cpe_f \left[\frac{\$}{\text{falla}} \right]$$

Ecuación 2.5. Costos por fallos.

Donde:

MTTR = Tiempo medio para reparar cada fallo = hora/fallo

Cpe = Costes de penalización por hora. (producción, mano de obra, repuestos) = \$/hora

4. Calcular los costes totales por fallos por año TCP_f [\$/año]

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \times S_f \left[\frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Ecuación 2.6. Costos totales por fallos.

Donde:

C_f = Costo por fallo

S_f = Frecuencia de fallos

5. Calcular los costes totales por fallo en valor presente $PTCP_f [\$]$

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T}$$

Ecuación 2.7. Costos totales por fallo en valor presente

Donde:
TCPf = Costes totales por fallos por año
i = Tasa de descuento
T = Número total esperado de año de vida útil.

Luego de determinar los costos estimados relacionados con la confiabilidad, se sumarán a estos los demás costos evaluados, que incluyen la inversión inicial, el mantenimiento planificado, las operaciones, entre otros. Se procede a calcular el costo total en términos de valor presente, utilizando la tasa de interés elegida y el período de vida útil previsto, y se compara este resultado con los costos totales de las otras alternativas consideradas.

A continuación, se presenta una tabla que muestra el comportamiento de los tiempos entre fallos de un Motor diésel MTU 16V4000C11 de cargador frontal Tourneau L-2350, cuyos datos fueron entregados por el fabricante del equipo, para los 12 primeros años de vida útil.

2	4	7	3	6	2	7	9	3	2	5	3	8	4	6	8	3	5	2	8	8	6	3	5	6	7	4	6	7	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-1. Tiempos entre fallos.

A partir del procedimiento, propuesto por el modelo de Woodward, se debe a cuantificar el impacto de los costes de los fallos.

1. Se definen los tipos de fallos.
Dónde $f = 1 \rightarrow F$ para $F = 1$ tipo de fallo

2. Se define la frecuencia de fallos esperada por año S_f , Se usa la ecuación 2.4.
 $N = 30$ Eventos
 $T = 12$ años.

$$S_f = \frac{N}{T} = \frac{30}{12} = 2,5 \left[\frac{fallos}{año} \right]$$

Esta frecuencia asume un valor constante durante el período total de vida útil estimado de 12 años.

3. Se calculan los costes por fallos C_F [\$/fallo]. Los costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional, se usa la ecuación de 2.5.

$$MTTR = 8 \text{ [horas/fallo]}$$

$$C_{pe} = 650 \text{ [$/hora]}$$

$$C_f = \sum_{f=1}^F MTTR_f \times C_{pe_f} = 8 \times 650 = 5.200 \left[\frac{\$}{fallo} \right]$$

4. Se calculan los costes totales por fallos por año TCP_F , se usa la ecuación 2.6.

$$C_f = 5.200 \text{ [$/fallo]}$$

$$S_f = 2,5 \text{ [fallos/año]}$$

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \times S_f = 5.200 \times 2,5 = 13.000 \left[\frac{\$}{año} \right]$$

5. Se calculan los costes totales por fallo en valor presente $PTCP_F$, se usa la ecuación para 2.7, para un período de 12 años y para una tasa de descuento $i = 10\%$.

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} = 13.000 \times \frac{(1+0,1)^{12} - 1}{0,1 \times (1+0,1)^{12}} = \$88.578$$

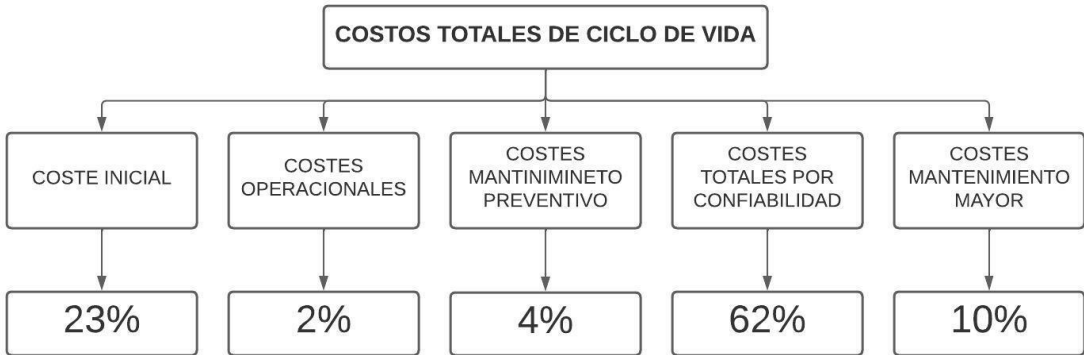
Una vez calculado los costos por fallos, se requiere cuantificar los distintos costos para el cálculo total de los costos del activo que se está evaluando. Para el caso del motor Diesel los costos principales están presentados en la tabla que se muestra a continuación.

TIPOS DE COSTES	VALOR (USD)	AÑO	VALOR POR VIDA ÚTIL (12 AÑOS)	
COSTOS INICIALES	\$32.200			
Motor diésel 16V4000C11 de cargador frontal Tourneau L-2350		0	\$32.200	
COSTOS ANUALES				
Costes operacionales		\$234	\$2.808	
Costes por mantenimiento preventivo		\$441	\$5.292	
Costes por Confiabilidad		\$7.382	\$88.578	
COSTOS FUTUROS				
Costes por mantenimiento mayor		\$4.668	3	\$4.668
Costes por mantenimiento mayor		\$4.668	6	\$4.668
Costes por mantenimiento mayor		\$4.668	9	\$4.668
COSTES TOTALES			\$142.882	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-2. Costos totales de ejemplo simplificado

Los costos totales para el motor diésel son de \$142.882 Dólares, durante su vida útil, de este total, \$88.578 son por costos por fallos, lo que representa un 62% de los costos totales. Tras este análisis, a continuación, se presenta la figura 2-4, la cual presenta el porcentaje que conforman del costo total de ciclo de vida.



Fuente: Elaboración propia

Diagrama Conceptual 2-3. Distribución costos del ejemplo simplificado

En el segundo capítulo, titulado "Metodología de Análisis del Costo del Ciclo de Vida de Woodward", se delineó el procedimiento junto con los cálculos correspondientes que serán empleados en el tercer capítulo. Esto se llevará a cabo con el propósito de desarrollar un análisis del ciclo de vida de los motores 20V4000C23 y 20V4000C22, lo que permitirá realizar una comparación y un análisis exhaustivo basado en los resultados obtenidos directamente relacionados a los costos.

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL ACCV A LOS MOTORES MTU
20V4000C23 Y 20V4000C22.

3. APLICACIÓN DEL ACCV A LOS MOTORES MTU 20V4000C23 Y 20V4000C22.

3.1 MOTORES MTU 20V4000.

En los capítulos anteriores, se ha mencionado que en la Minera Doña Inés de Collahuasi se realizan modificaciones en los camiones de extracción modelo 930E-4SE. Estas modificaciones permiten la instalación de motores diésel MTU, específicamente los modelos 20V4000C23 y 20V4000C22. La diferencia en sus denominaciones, específicamente en el último dígito, radica en el tipo de tecnología que incorporan, ya sea en lo que respecta al control electrónico, como a las mejoras en el sistema mecánico. Para su funcionamiento utilizan combustible diésel y, a pesar de que, ambos motores tienen una potencia aproximada de 3674 [hp] a 1800 [r.p.m], presentan diferencias significativas en cuanto al tiempo de respuesta en la entrega de esta potencia, según el nivel de tecnología que posean.

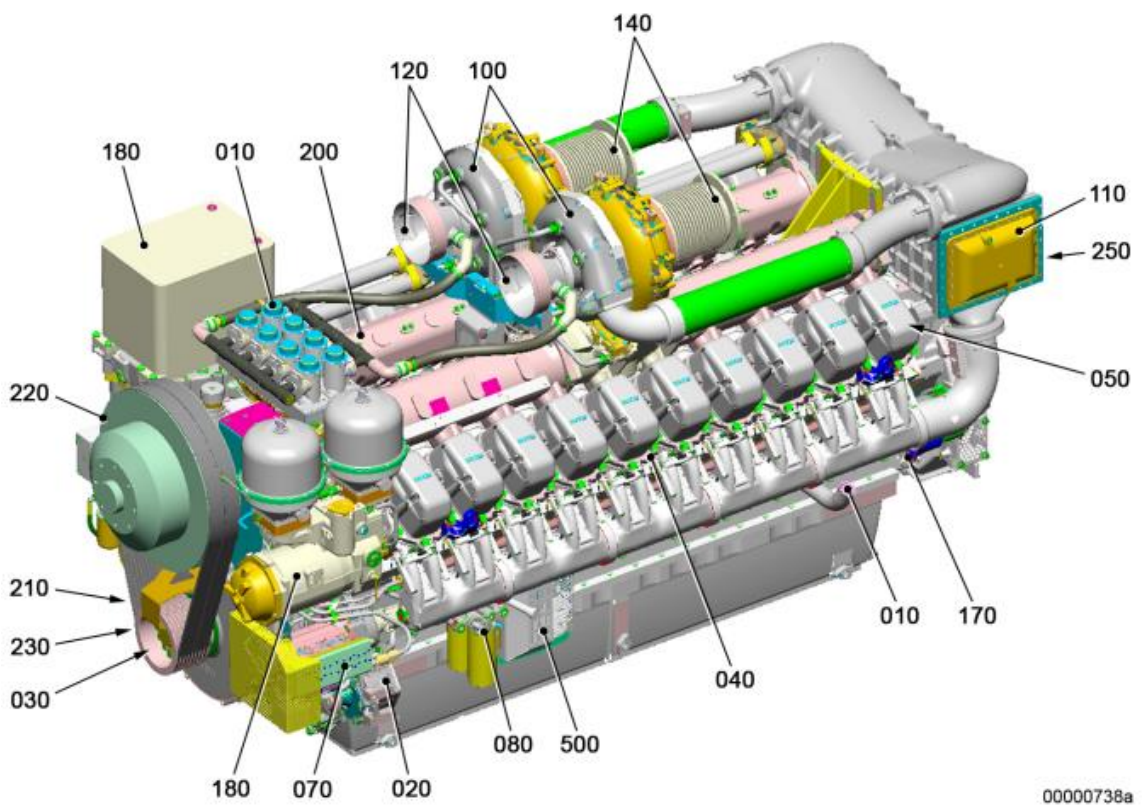
A continuación, se presentarán las características principales y las diferencias fundamentales entre ambos motores. Para posteriormente llevar a cabo un análisis del costo del ciclo de vida de los motores, utilizando la metodología desarrollada por Woodward.

- Los motores C22 y C23 están equipados con diferentes unidades de control electrónico del motor diésel, que se distinguen por sus diferencias en hardware y software.
- En el sistema de combustible, el motor C22 utiliza el Common Rail, sistema electrónico de inyección directa de combustible diésel. Por otro lado, el motor C23 utiliza el mismo sistema, pero se diferencia en el diseño de su inyector, el cual incorpora un acumulador, que le permite realizar múltiples inyecciones, incluyendo una preinyección, la inyección principal y una post-inyección.
- En cuanto a la refrigeración, el motor C23 se diferencia significativamente del motor C22. En el motor C23, sus turbocompresores, que son componentes destinados a la sobrealimentación del aire del motor, así como el sistema de escape por donde se evacúan los gases de la combustión, están refrigerados mediante un líquido refrigerante. Esta mejora en la refrigeración reduce drásticamente la temperatura de estos componentes, que en algunos casos pueden alcanzar los 800 [°C].
- En el sistema de lubricación, el motor C23 se distingue del motor C22 por estar equipado con una bomba de aceite de alto flujo.
- En cuanto al modo de control de la potencia, ambos motores difieren en su enfoque. El motor C22 ajusta la potencia en función del consumo de combustible,

mientras que el motor C23 gestiona la potencia en función de la demanda de torque al motor.

- En cuanto a las capacidades, el lubricante para ambos motores utiliza la misma cantidad de aceite, que según el fabricante es de 365 [l] con un aceite 15W-40. En el sistema de refrigeración, ambos motores C23 utilizan 780 litros de líquido refrigerante.
- En términos de consumo de combustible, ambos motores presentan similitudes en su operación normal, considerando el ralentí, la plena carga y la carga máxima. El consumo promedio es de alrededor de 450 litros por hora.

A continuación, se presenta una imagen del motor 20V4000C23, en la cual se podrá observar los componentes principales del motor que están montados por la periferia de la estructura principal del motor.



Fuente: Manual de motor 20V4000C23 - MTU

Figura 3-1. Motor 20V4000C23

010- Carter y sus componentes	020- Tren de engranajes
030- Dumper	040- Culata
050- Válvulas	070 Sistema de inyección de alta presión
080 Sistema de inyección de baja presión	100- Salida de gases de escape de turbo
110- Intercooler	120- Entrada de aire
140- Sistema de escape	170- Equipo de arranque
180- Sistema de lubricación	200- Sistema de refrigeración
210- Salida de potencia	220- Sistema de refrigeración de aire

230- Soporte delantero de motor

250- Salida de potencia mayor

500- Unidad de Control electrónico de motor.

El motor de combustión interna está compuesto por distintos sistemas que logran dar funcionamiento, entre ellos está, el sistema que se encarga del suministro de combustible, el de la lubricación y de la refrigeración. La gran mayoría de los sistemas, poseen piezas mecánica y electromecánicas, las cuales están sujetas a fallar por el desgaste que están sometidos.

3.2. CI - COSTE INICIAL DE ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN

3.2.1 Costes de desarrollo

En costo de investigación y del diseño se consideran todos los costos que se deben realizar para la investigación del motor, en cuanto a la disponibilidad del motor y su tasa de falla al operar a una mayor altura geográfica. También se incluyen todos los costos relacionados con los trabajos de licitaciones y las derivaciones de trabajo a terceros.

El costo de investigación y del diseño para los motores MTU 20V4000 en sus versiones C23 y C22 es de: \$25.000 USD.

3.2.2 Costes de adquisición

En los costes de adquisición, contemplan los costos de la compra del motor y el costo de su traslado, desde Alemania a Santiago de Chile vía marítimo. Estos costes son diferentes para las dos versiones de motor y se entregan estos valores a continuación.

Costo de Adquisición:

- Motor 20V4000-C23: \$903.000 USD
- Motor 20V4000-C22: \$1.102.500 USD

Coste total inicial de adquisición e instalación para ambos versión 20V4000.

CI – 20V4000C23: \$25.000 USD + \$903.000 USD = \$928.000 USD

CI – 20V4000C22: \$25.000 USD + \$102.500 USD = \$1.127.500 USD

3.3. CO - COSTES OPERACIONALES

El consumo de combustible de ambos motores en operación normal, comprendase el ralentí, plena carga y full carga, es de 450 litros por hora y el camión 930E-4SE está en operación las 22 [h] del día, los 365 días del año y el costo promedio del combustible es de \$1.30 USD por litro.

- Costo de combustible por día: \$12.870 USD
- Costo por año: \$4.697.550 USD

La capacidad total de lubricante para ambos motores es de 365 litros. Se utiliza el aceite Mobil DELVAC MX 15W-40, que tiene un costo de \$2,98 USD por litro y se realizan 16 cambios de aceite al año y 32 recargas adicionales debido al consumo del motor. Cada recarga se lleva a cabo mediante un sistema llamado "receiver" que suministra aceite cuando el nivel desciende, este sistema contiene su propio recipiente el cual debe ser llenado con aproximadamente 64 litros.

- Costo por un cambio de aceite: \$1.088 USD
- Costo por año (16 cambios de aceite): \$17.408 USD
- Costo por un relleno de aceite: \$191 USD
- Costo por año (32 recargas de aceite): \$6.112

El costo de total anual del lubricante para ambos motores es de: \$23.520 USD

En cuanto al liquido refrigerante del motor que posee una capacidad aproximada de 780 litros, los cuales se realiza un cambio de tres veces al año y utiliza el Mobil Fleet Charge 33% 1400 [p.p.m] con un costo de \$2,20 USD por litro.

El costo anual por refrigerante es de: \$5.148 USD

A continuación, se muestran los costos de los operadores en un año:

- Costos operadores anual: \$38.400 USD.

Costes Operacionales anual para ambos motores MTU 20V4000 en sus versiones C22 y C23 es de:

$$CO = \$4.697.550 \text{ USD} + \$23.520 \text{ USD} + \$5.148 \text{ USD} + \$38.400 \text{ USD} = \$4.764.618 \text{ USD}$$

3.4. CMP - Costes de Mantenimiento Preventivo

MTU indica el mantenimiento preventivo que tendrá el motor según las horas de operación que tendrá, para el área de minería el tiempo es de 18.000 horas, aproximadamente dos años y dos meses. En este plan de mantenimiento detalla las inspecciones y mantenciones al equipo contemplando los cambios de componentes. Además, aparte de detallar el plan también los clasifica según horas, clasificándolos en QLs. Existen QL-1, QL-2, QL-3

Para temas de estudios y análisis, se desglosó todo el plan de mantenimiento para QL, con sus respectivas horas. Para calcular todos los costos, se determinó todas las horas de trabajo que demora cada actividad, multiplicando por el valor de las horas hombre. También se determinó los costos de los repuestos y de los insumos que se utilizan. A continuación, se muestran los costos por QL y el total:

Costos anuales por QL para motor C23

- QL-1 diario: \$350 USD → QL-1 diario por año: \$127.750 USD
- QL-1 1.000 [h]: \$4.520 USD → QL-1 1.000 [h] por año: \$36.160 USD
- QL-1 3.000 [h]: \$1.439 USD → QL-1 3.000 [h] por año: \$5.037 USD
- QL-1 4.500 [h]: \$2.651 USD → QL-1 4.500 [h] por año: \$4.712 USD
- QL-2 6.000 [h]: \$204.404 USD → QL-2 6.000 [h] por año: \$272.539 USD
- QL-3 8.000 [h]: \$97.840 USD → QL-3 8.000 [h] por año: \$97.840 USD

Costos anuales por QL para motor C22

- QL-1 diario: \$280 USD → QL-1 diario por año: \$102.200 USD
- QL-1 1.000 [h]: \$3.823 USD → QL-1 1.000 [h] por año: \$30.584 USD
- QL-1 3.000 [h]: \$1.100 USD → QL-1 3.000 [h] por año: \$2.934 USD
- QL-1 4.500 [h]: \$2.242 USD → QL-1 4.500 [h] por año: \$3.986 USD
- QL-2 6.000 [h]: \$194.224 USD → QL-2 6.000 [h] por año: \$258.965 USD
- QL-3 8.000 [h]: \$89.875 USD → QL-3 8.000 [h] por año: \$89.875 USD

Los costes por mantenimiento preventivo se determinan por suma de los QLs, que corresponden a 1, 2 y 3. Valor total se muestra a continuación para los motores C22 y C23

CMP – 20V4000C23 = \$544.038 USD

CMP – 20V4000C22 = \$488.544 USD

3.5. CMM - Costes de Mantenimiento Mayor

Para el costo de mantenimiento mayor se calcula a partir de la información entregado por el fabricante del equipo, como se mencionó en el capítulo anterior. Los mantenimientos se clasifican por QLs, para este caso de mantenimiento mayor aplica el QL-4 para ambos modelos de motor.

Motor 20V4000C23

QL-4 18000[h]: \$575.800 USD

Motor 20V4000C22

QL-4 18000[h]: \$515.680 USD

CMM – 20V4000C23 = \$575.800 USD

CMM – 20V4000C22 = \$515.680 USD

3.6. TCPf - COSTES TOTALES POR CONFIABILIDAD

3.6.1 Frecuencia de fallos

Se determinó la frecuencia de cada tipo de fallo para cada motor que se evaluó, y estas frecuencias de fallos se consideraron constantes a lo largo de un año. Para definir los tipos de fallos de cada motor, se obtuvo información real de la vida útil operativa de motores en la faena Collahuasi, que habían alcanzado las horas de funcionamiento estimadas por el fabricante.

En el caso de los motores 20V4000 en sus versiones C22 y C23, se estableció una vida útil de 6,72 años o 54.000 horas. A continuación, se presentan las tablas que muestran los resultados obtenidos de la frecuencia de fallos, desglosando cada tipo de fallo para cada motor, donde se utilizó la ecuación 2.4.

MOTOR 20V4000C22		
TIPO DE FALLA	Nº DE EVENTOS	FRECUENCIA DE FALLAS [FALLAS/AÑOS]
UF	18	2,7
Filtro Automático	9	1,3
Bba. HP Comb.	11	1,6
Manguera Enfriador Comb.	10	1,5
Filtros Aire	28	4,2
Velas Filtro Aut.	11	1,6
inyector	32	4,8
Llave Comb.	13	1,9
Cañería Alta Riel	28	4,2
Abrazadera Manguillo	30	4,5
Arnés X1	9	1,3
Correa Alt. 24V	18	2,7
Llave Filtro Davco	9	1,3
Arnés X2	18	2,7
Conector inyector	8	1,2
Manguillo Refrig.	10	1,5
Filtros Comb	11	1,6
Tapon Refrig. Turbo	9	1,3
Núcleo enfriador aceite	12	1,8
Arnés XF33	7	1,0

Fuente:

Tabla 3-1. Frecuencia de fallos – Motor 20V4000C22

MOTOR 20V4000C23		
TIPO DE FALLA	Nº DE EVENTOS	FRECUENCIA DE FALLAS [FALLAS/AÑOS]
Enfriador de Aceite	32	4,8
Motor de arranque	30	4,5
Filtro centrifugo	28	4,2
Cañería Alta Riel	38	5,7
Correa Alt. 24V	39	5,8
Bellow Escape	19	2,8
Inyector	21	3,1
UF	38	5,7
Filtro Automático	11	1,6
Alternador	12	1,8
Bba Comb Baja	13	1,9
Termostato	14	2,1
Filtro de Aire	9	1,3
Manguera Enfriador Comb.	10	1,5
Bba. HP Comb.	20	3,0
Turbo	12	1,8
Bomba Agua	15	2,2
Manguillo Refrig.	13	1,9
Correa Fan	19	2,8
Núcleo enfriador aceite	14	2,1
Velas Filtro Aut.	11	1,6
Conector Inyector	10	1,5
Filtro Davco	9	1,3
Cabezal filtro	14	2,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-2. Frecuencia de fallas – Motor 20V4000C23

3.6.2 Costos asociados a cada tipo de fallo.

Una vez identificados los tipos de fallos y sus respectivas frecuencias en ambos motores, se procedió a estimar los costos asociados a cada tipo de fallo, basándose en la información proporcionada por mecánicos y el personal administrativo. Estos costos se expresan en dólares y se detallan en las siguientes tablas de cada motor. Uno de los costos incluidos es el "costo por alquiler," que indica el gasto requerido para reemplazar el equipo que se encuentra inactivo debido a una reparación.

Para la minera Collahuasi, el costo asciende a \$230 dólares por tonelada-hora, considerando que el camión de extracción 930E-4SE tiene una capacidad de carga de 320 toneladas. En un ciclo de carga y descarga de material, se estima un tiempo aproximado de una hora para realizar esta operación. Para el cálculo de los costos asociados a cada tipo de fallo, se utilizó la ecuación 2.5.

MOTOR 20V4000C22					
TIPO DE FALLA	MTTR	COSTO MANO OBRA [USD]	COSTO REPUESTOS	COSTO ALQUILER [USD]	COSTO POR FALLO [USD]
UF	64	\$ 5.568	\$ 40.000	\$ 4.710.400	\$ 4.755.968
Filtro Automatico	12	\$ 2.001	\$ 36.842	\$ 883.200	\$ 922.043
Bba. HP Comb.	13	\$ 2.088	\$ 57.895	\$ 956.800	\$ 1.016.783
Manguera Enfriador Comb.	4	\$ 696	\$ 2.105	\$ 294.400	\$ 297.201
Filtros Aire	5	\$ 1.286	\$ 2.316	\$ 368.000	\$ 371.602
Velas Filtro Aut.	14,15	\$ 1.231	\$ 1.895	\$ 1.041.440	\$ 1.044.566
Inyector	12,2	\$ 1.061	\$ 47.368	\$ 897.920	\$ 946.349
Llave Comb.	3	\$ 348	\$ 58	\$ 220.800	\$ 221.206
Cañeria Alta Riel	8,18	\$ 712	\$ 4.000	\$ 602.048	\$ 606.760
Abrazadera Manguillo	6,98	\$ 607	\$ 842	\$ 513.728	\$ 515.177
Arnes X1	6,78	\$ 590	\$ 1.263	\$ 499.008	\$ 500.861
Correa Alt. 24V	5,99	\$ 521	\$ 211	\$ 440.864	\$ 441.596
Llave Filtro Davco	4,92	\$ 428	\$ 189	\$ 362.112	\$ 362.729
Arnes X2	4,6	\$ 400	\$ 1.890	\$ 338.560	\$ 340.850
Conector Inyector	3,67	\$ 319	\$ 2.632	\$ 270.112	\$ 273.063
Manguillo Refrig.	3,25	\$ 283	\$ 789	\$ 239.200	\$ 240.272
Filtros Comb	2,23	\$ 194	\$ 184	\$ 164.128	\$ 164.506
Tapon Refrig. Turbo	2,08	\$ 181	\$ 18	\$ 153.088	\$ 153.287
Nucleo enfriador aceite	1,68	\$ 146	\$ 456	\$ 123.648	\$ 124.250
Arnes XF33	1,15	\$ 100	\$ 489	\$ 84.640	\$ 85.229

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-3. Costo por fallo – Motor 20V4000C22

MOTOR 20V4000C23					
TIPO DE FALLA	MTTR	COSTO MANO OBRA [USD]	COSTO REPUESTOS	COSTO ALQUILER [USD]	COSTO POR FALLO [USD]
Enfriador de Aceite	6,98	\$ 607	\$ 36.842	\$ 513.728	\$ 551.177
Motor de arranque	9	\$ 1.914	\$ 8.632	\$ 662.400	\$ 672.946
Filtro centrifugo	8	\$ 1.286	\$ 8.436	\$ 588.800	\$ 598.522
Cañería Alta Riel	12	\$ 712	\$ 7.185	\$ 883.200	\$ 891.097
Correa Alt. 24V	4	\$ 521	\$ 211	\$ 294.400	\$ 295.132
Bellow Escape	4,6	\$ 400	\$ 5.254	\$ 338.560	\$ 344.214
Inyector	12,2	\$ 1.061	\$ 73.684	\$ 897.920	\$ 972.665
UF	72,41	\$ 6.300	\$ 68.422	\$ 5.329.376	\$ 5.404.098
Filtro Automatico	24	\$ 3.271	\$ 48.421	\$ 1.766.400	\$ 1.818.092
Alternador	5	\$ 696	\$ 22.105	\$ 368.000	\$ 390.801
Bba Comb Baja	3	\$ 492	\$ 9.158	\$ 220.800	\$ 230.450
Termostato	13,5	\$ 1.175	\$ 2.110	\$ 993.600	\$ 996.885
Filtro de Aire	5	\$ 816	\$ 2.526	\$ 368.000	\$ 371.342
Manguera Enfriador Comb.	2	\$ 1.344	\$ 3.456	\$ 147.200	\$ 152.000
Bba. HP Comb.	13	\$ 3.220	\$ 84.211	\$ 956.800	\$ 1.044.231
Turbo	16	\$ 1.218	\$ 68.421	\$ 1.177.600	\$ 1.247.239
Bomba Agua	7	\$ 609	\$ 8.421	\$ 515.200	\$ 524.230
Manguillo Refrig.	3,25	\$ 283	\$ 1.579	\$ 239.200	\$ 241.062
Correa Fan	7	\$ 1.044	\$ 4.235	\$ 515.200	\$ 520.479
Nucleo enfriador aceite	3	\$ 146	\$ 2.104	\$ 220.800	\$ 223.050
Velas Filtro Aut.	14,15	\$ 1.231	\$ 3.579	\$ 1.041.440	\$ 1.046.250
Conector Inyector	12	\$ 1.566	\$ 4.211	\$ 883.200	\$ 888.977
Filtro Davco	3	\$ 428	\$ 1.067	\$ 220.800	\$ 222.295
Cabezal filtro	4	\$ 696	\$ 2.632	\$ 294.400	\$ 297.728

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4. Costo por fallo – Motor 20V4000C23

3.6.3. Calcular los costes totales por fallos por año TCPf [\$/año]

Para el calcular los costos totales por fallos, se utiliza la ecuación 2.6.

MOTOR 20V4000C22			
TIPO DE FALLA	FRECUENCIA DE FALLAS [FALLAS/AÑOS]	COSTOS POR FALLO [USD]	COSTOS TOTALES POR FALLO POR AÑO [USD]
UF	2,7	\$ 4.755.968	\$ 12.739.200
Filtro Automático	1,3	\$ 922.043	\$ 1.234.879
Bba. HP Comb.	1,6	\$ 1.016.783	\$ 1.664.377
Manguera Enfr. Comb.	1,5	\$ 297.201	\$ 442.263
Filtros Aire	4,2	\$ 371.602	\$ 1.548.341
Velas Filtro Aut.	1,6	\$ 1.044.566	\$ 1.709.855
Inyector	4,8	\$ 946.349	\$.506.426
Llave Comb.	1,9	\$ 221.206	\$ 427.928
Cañería Alta Riel	4,2	\$ 606.760	\$ 2.528.165
Abrazadera Manguillo	4,5	\$ 515.177	\$ 2.299.898
Arnés X1	1,3	\$ 500.861	\$ 670.796
Correa Alt. 24V	2,7	\$ 441.596	\$ 1.182.847
Llave Filtro Davco	1,3	\$ 362.729	\$ 485.798
Arnés X2	2,7	\$ 340.850	\$ 912.992
Conector Inyector	1,2	\$ 273.063	\$ 325.075

Manguillo Refrig.	1,5	\$ 240.272	\$ 357.547
Filtros Comb	1,6	\$ 164.506	\$ 269.281
Tapon Refrig. Turbo	1,3	\$ 153.287	\$ 205.295
Núcleo enfriador aceite	1,8	\$ 124.250	\$ 221.875
Arnés XF33	1,0	\$ 85.229	\$ 88.780

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5. Costos totales por fallo por año – Motor 20V4000C22

MOTOR 20V4000C23			
TIPO DE FALLA	FRECUENCIA DE FALLAS [FALLAS/AÑOS]	COSTOS POR FALLO [USD]	COSTOS TOTALES POR FALLO POR AÑO [USD]
Enfriador de Aceite	4,8	\$ 551.177	\$ 2.624.654
Motor de arranque	4,5	\$ 672.946	\$ 3.004.223
Filtro centrifugo	4,2	\$ 598.522	\$ 2.493.841
Cañería Alta Riel	5,7	\$ 891.097	\$ 5.038.939
Correa Alt. 24V	5,8	\$ 295.132	\$ 1.712.820
Bellow Escape	2,8	\$ 344.214	\$ 973.225
Injector	3,1	\$ 972.665	\$ 3.039.579
UF	5,7	\$ 5.404.098	\$ 30.558.886
Filtro Automático	1,6	\$ 1.818.092	\$ 2.976.044
Alternador	1,8	\$ 390.801	\$ 697.859
Bba Comb Baja	1,9	\$ 230.450	\$ 445.810
Termostato	2,1	\$ 996.885	\$ 2.076.843
Filtro de Aire	1,3	\$ 371.342	\$ 497.333
Manguera Enfriador Comb.	1,5	\$ 152.000	\$ 226.191
Bba. HP Comb.	3,0	\$ 1.044.231	\$ 3.107.830
Turbo	1,8	\$ 1.247.239	\$ 2.227.213
Bomba Agua	2,2	\$ 524.230	\$ 1.170.156
Manguillo Refrig.	1,9	\$ 241.062	\$ 466.340
Correa Fan	2,8	\$ 520.479	\$ 1.471.592
Núcleo enfriador aceite	2,1	\$ 223.050	\$ 464.688
Velas Filtro Aut.	1,6	\$ 1.046.250	\$ 1.712.612

Conector Inyector	1,5	\$ 888.977	\$ 1.322.882
Filtro Davco	1,3	\$ 222.295	\$ 297.717
Cabezal filtro	2,1	\$ 297.728	\$ 620.267

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-6. Costos totales por fallo año – Motor 20V4000C23

3.6.4 Costos totales por fallo en valor presente

En cálculo de los costos total por fallo en valor presente, se ocupó la ecuación 2.7.

MOTOR 20V4000C22		
TIPO DE FALLA	COSTOS TOTALES POR FALLO POR AÑO [USD]	COSTOS TOTALES POR FALLOS EN VALOR PRESENTE [USD]
UF	\$ 12.739.200	\$ 0.251.695
Filtro Automático	\$.234.879	\$.840.520
Bba. HP Comb.	\$ 1.664.377	\$.871.886
Manguera Enfr. Comb.	\$ 442.263	\$.091.742
Filtros Aire	\$ 1.548.341	\$.323.079
Velas Filtro Aut.	\$ 1.709.855	\$.086.981
Inyector	\$ 4.506.426	\$ 21.313.723
Llave Comb.	\$ 427.928	\$ 2.023.942
Cañería Alta Riel	\$ 2.528.165	\$ 11.957.285
Abrazadera Manguillo	\$ 2.299.898	\$ 10.877.667
Arnés X1	\$ 670.796	\$ 3.172.616
Correa Alt. 24V	\$ 1.182.847	\$ 5.594.427
Llave Filtro Davco	\$ 485.798	\$ 2.297.644

Arnés X2	\$ 912.992	\$ 4.318.112
Conector Inyector	\$ 325.075	\$ 1.537.486
Manguillo Refrig.	\$ 357.547	\$ 1.691.066
Filtros Comb	\$ 269.281	\$ 1.273.598
Tapon Refrig. Turbo	\$ 205.295	\$ 970.969
Núcleo enfriador aceite	\$ 221.875	\$ 1.049.388
Arnés XF33	\$ 8.780	\$ 419.898
COSTES TOTALES POR CONFIABILIDAD		\$ 159.963.724

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-7. Costos totales por fallo en valor presente – Motor 20V4000C22

MOTOR 20V4000C23		
TIPO DE FALLA	COSTOS TOTALES POR FALLO POR AÑO [USD]	COSTOS TOTALES POR FALLOS EN VALOR PRESENTE [USD]
Enfriador de Aceite	\$ 2.624.654	\$ 12.413.639
Motor de arranque	\$ 3.004.223	\$ 14.208.862
Filtro centrifugo	\$ 2.493.841	\$ 11.794.944
Cañería Alta Riel	\$ 5.038.939	\$ 23.832.316
Correa Alt. 24V	\$ 1.712.820	\$ 8.101.006
Bellow Escape	\$ 973.225	\$ 4.602.992
Inyector	\$ 3.039.579	\$ 14.376.084
UF	\$ 30.558.886	\$ 144.532.204
Filtro Automático	\$ 2.976.044	\$ 14.075.584
Alternador	\$ 697.859	\$ 3.300.614
Bba Comb Baja	\$ 445.810	\$ 2.108.517
Termostato	\$ 2.076.843	\$ 9.822.696
Filtro de Aire	\$ 497.333	\$ 2.352.201
Manguera Enfr. Comb.	\$ 226.191	\$ 1.069.798
Bba. HP Comb.	\$ 3.107.830	\$ 14.698.884
Turbo	\$ 2.227.213	\$ 10.533.890
Bomba Agua	\$ 1.170.156	\$ 5.534.405
Manguillo Refrig.	\$ 466.340	\$ 2.205.614
Correa Fan	\$ 1.471.592	\$ 6.960.087
Núcleo enfriador aceite	\$ 464.688	\$ 2.197.801

Velas Filtro Aut.	\$ 1.712.612	\$ 8.100.019
Conector Inyector	\$ 1.322.882	\$ 6.256.744
Filtro Davco	\$ 297.717	\$ 1.408.089
Cabezal filtro	\$ 620.267	\$ 2.933.631
COSTES TOTALES POR CONFIABILIDAD		\$ 327.420.621

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-8. Costos totales por fallo en valor presente – Motor 20V4000C23

TCPf – 20V4000C22 = \$159.963.724 USD
TCPf – 20V4000C23 = \$327.420.621 USD

3.7. CTCV - COSTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA.

A continuación, se presentan dos tablas, una para cada motor en estudio, en la cuales se presentan los resultados de los principales costos que fueron calculados y explicados anteriormente, según su tipo costo se calcula si corresponde a valor presente o valor futuro para tasa de interés correspondiente a lo igual que el valor de vida útil, para el caso de ambas versiones de motor diésel la tasa y la vida útil son iguales.

MOTOR MTU 20V4000C22		
Interés (i) = 10%	Total años: 6,72 (54.000 horas)	
TIPOS DE COSTES	VALOR (USD)	VALOR POR VIDA ÚTIL (6,72 AÑOS)
COSTOS INICIALES		
Motor diésel MTU 20V4000C22 de Camión Komatsu 930E-4SE	\$ 1.127.500	\$ 1.127.500
COSTOS ANUALES		
Costes operacionales	\$ 4.764.618	\$ 22.534.877
Costes por mantenimiento preventivo	\$ 488.544	\$ 2.310.632
Costes por Confiabilidad	\$ 33.821.619	\$ 159.963.724
COSTOS FUTUROS		
Costes por mantenimiento mayor (2,24 años)	\$ 515.680	\$ 416.544
Costes por mantenimiento mayor (4,48 años)	\$ 515.680	\$ 336.466
Valor reposición (6,72 años)	\$ -214.762	\$ -113.188
COSTO TOTALES DE CICLO DE VIDA		\$ 186.576.555

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-9. CTCV – Motor 20V4000C22

MOTOR MTU 20V4000C23		
Interés (i) = 10%	Total años: 6,72 (54.000 horas)	
TIPOS DE COSTES	VALOR (USD)	VALOR POR VIDA ÚTIL (6,72 AÑOS)
COSTOS INICIALES		
Motor diésel MTU 20V4000C23 de Camion Komatsu 930E-4SE	\$ 903.000	\$ 903.000
COSTOS ANUALES		
Costes operacionales	\$ 4.764.618	\$ 22.534.877
Costes por mantenimiento preventivo	\$ 544.038	\$ 2.573.098
Costes por Confiabilidad	\$ 69.227.543	\$ 327.420.621
COSTOS FUTUROS		
Costes por mantenimiento mayor (2,24 años)	\$ 575.800	\$ 465.106
Costes por mantenimiento mayor (4,48 años)	\$ 575.800	\$ 375.692
Valor reposición (6,72 años)	\$ -171.570	\$ -90.424
COSTO TOTALES DE CICLO DE VIDA		\$ 354.181.971

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-10. CTCV – Motor 20V4000C23

3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los tipos de costos, que conforman el costo total de ciclo de vida de ambos motores.

TIPOS DE COSTES	MOTOR 20V4000C22 (USD)	MOTOR 20V4000C23 (USD)
COSTOS INICIALES		
Motor diésel MTU en Camión Komatsu 930E-4SE	\$ 1.127.500	\$ 903.000
COSTOS ANUALES		
Costes operacionales	\$ 22.534.877	\$ 22.534.877
Costes por mantenimiento preventivo	\$ 2.310.632	\$ 2.573.098
Costes por Confiabilidad	\$ 159.963.724	\$ 327.420.621
COSTOS FUTUROS		
Costes por mantenimiento mayor (2,24 años)	\$ 416.544	\$ 465.106
Costes por mantenimiento mayor (4,48 años)	\$ 336.466	\$ 375.692

Valor reposición (6,72 años)	\$ -113.188	\$ -90.424
CTCV (P)	\$ 186.576.555	\$ 354.181.971

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-11. CTCV – Motores C22 & C23.

Al comparar los costos totales del ciclo de vida de ambos motores en estudio, se puede evidenciar que el motor 20V4000C22 presenta una ventaja económica (de costo) respecto a su competencia el motor 20V4000C23. Por lo tanto, la opción ganadora o la opción mas beneficiosa y rentable es el motor 20V4000C22. Este motor tiene un costo inferior al del motor C23, aproximadamente en un 52,68% menos.

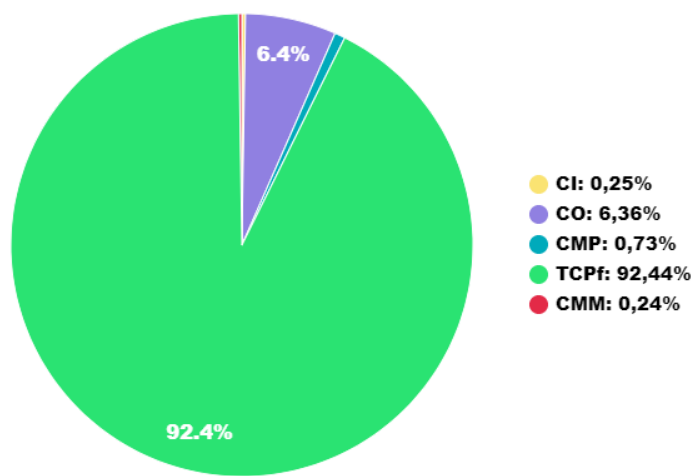
Si bien, la mayoría de los costos del motor C23 son mayores que los del motor C22, en cuanto al costo de inversión ocurre lo contrario, y es una situación incongruente, dado que el motor C23 al estar equipado con mayor tecnología, debiese poseer un costo mayor. Sin embargo, El C22 es mayor en su costo debido a su tiempo operando en diferentes faenas mineras del norte del país, además, es un motor con trayectoria que ofrece una disponibilidad mayor, ya que durante su tiempo de prueba se fueron aplicando campañas para evitar futuras fallas catastróficas hasta llegar a su punto de ideal de operación.

Un dato técnico, que cabe mencionar es el tiempo que demora en alcanzar la potencia el motor C22, que puede ser considerada su única desventaja frente al motor C23. Que resulta ser un factor que no representa un impacto en su operación y productividad en la parte económica.

En los costos de operación en los dos motores en estudio son iguales, pese al nivel de tecnología que posee uno más que el otro, no se ve reflejado en el consumo de combustible ni el consumo de lubricante producido por la evaporación. La ventaja de la tecnología sólo se ve reflejada en el tiempo que se demora en generar la potencia, esto quiere decir que el motor C23 le toma menor tiempo en generar la potencia requerida por el camión.

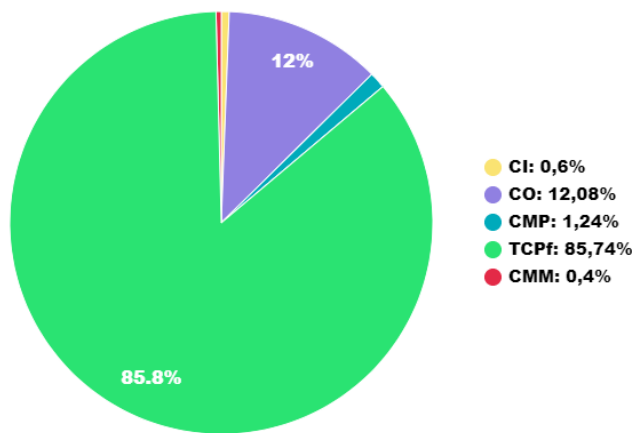
La disparidad en los costos totales de mantenimiento preventivo entre los motores en estudio es mínima. Sin embargo, el costo más elevado en uno de los motores radica directamente en los gastos asociados a los repuestos, especialmente en los sistemas de escapes refrigerados, que son componentes críticos en el caso del motor C23. El mismo fenómeno ocurre en los costos por mantenimiento mayor, que son mayores en el motor C23, dado que los repuestos son más costosos.

A continuación, se presenta dos gráficos, cada grafico representa de manera clara la distribución y el porcentaje de participación de cada costo, en el costo total del ciclo vida de ambos motores MTU de forma general.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3-1. División de costos del motor 20V4000C23



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3-2. División de costos de motor 20V4000C22

- CI: Costo Iniciales
- CO: Costos Operacionales
- CMP: Costos por Mantenimiento Preventivo
- TCPf: Costos por Confiabilidad
- CMM: Costos por Mantenimiento Mayor

En ambos motores diésel, los costos por confiabilidad representan la mayor parte de los costos totales, que en el caso del motor C23 son del alrededor de un 92,44%, mientras que en el motor C22 representan un 85,74% de los costos totales del ciclo de vida en sus 6.72 años de vida útil o 54.000 horas. Sin embargo, los valores de costos por confiabilidad son notablemente elevados, es importante señalar que, dentro de ese porcentaje de participación, una porción significativa corresponde a los costos por alquiler de camión de extracción cuando el equipo está detenido por reparación, donde se requiere destinar fondos para cumplir con las toneladas requeridas por día.

Para el motor C23, donde dentro de su 92,44% por costos por confiabilidad, un 97,68% corresponden a costo por alquiler y en el caso del motor C22, de 85,74% de participaciones de costos por confiabilidad un 98,31% se atribuyen a los costos por reemplazo de equipo.

Al excluir los costos por alquiler de camión CAEX de los gastos asociados a la confiabilidad y teniendo en cuenta los costos por fallos, el motor C23 presenta un costo 2,8 veces mayor que el motor C22. Esta disparidad se debe a que el motor C23 experimenta 24 tipos de fallas y experimenta mayores eventos durante su vida útil en comparación con el motor C22. A continuación se presenta una tabla resumen de costo de ciclo de vida de ambos motores, suponiendo que no existe el costo por alquiler del equipo.

TIPOS DE COSTES	MOTOR 20V4000C22 (USD)	MOTOR 20V4000C23 (USD)
COSTOS INICIALES		
Motor diésel MTU en Camión Komatsu 930E-4SE	\$ 1.127.500	\$ 903.000
COSTOS ANUALES		
Costes operacionales	\$ 22.534.877	\$ 22.534.877
Costes por mantenimiento preventivo	\$ 2.310.632	\$ 2.573.098
Costes por Confiabilidad	\$ 2.710.776	\$ 7.580.290
COSTOS FUTUROS		
Costes por mantenimiento mayor (2,24 años)	\$ 416.544	\$ 465.106
Costes por mantenimiento mayor (4,48 años)	\$ 336.466	\$ 375.692
Valor reposición (6,72 años)	\$ -113.188	\$ -90.424
CTCV (P)	\$ 29.323.608	\$ 34.341.640

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-12. CTCV de motores C22 & C23 sin costo de alquiler.

Los motores diésel, poseen una gran variedad de sistemas, mecanismos y controles electrónicos para poder funcionar, lo que los convierte en equipos con alta probabilidad de falla. En este sentido el equipamiento y nivel de tecnología de los motores es determinante en cuanto a los tipos de fallas y sus frecuencias. En el caso de estudio, ambos motores se equiparon al mismo modelo de camión y en la misma faena minera, sin embargo, las condiciones geográficas y ambientales no fueron favorables para el óptimo funcionamiento del motor, la ausencia de oxígeno en la zona de trabajo, cuya altura geográfica rondan entre 4.200 m.s.n.m. y 5.600 m.s.n.m. reduce la capacidad de los motores de generar potencia. Además, junto con la polución, genera un sobre esfuerzo en los motores para generar la potencia, aumentando el consumo de combustible e incrementando la incidencia de las fallas.

El motor 20V4000C22, posee un tiempo medio anual por reparación por falla de 4 horas y con un costo medio por falla de \$423.495 dólares, mientras que el motor 20V4000C23, con un tiempo medio anual de 3,93 horas y un costo medio de \$733.032 dólares por falla.

La alta tasa de fallas del motor en su versión C23. se debe en gran medida a que es un motor relativamente nuevo, que se ha probado en algunas de las faenas mineras con condiciones desfavorables a nivel país. Donde se ha probado en las mineras con mayores condiciones desfavorables a nivel país. Se espera que, a largo plazo, las fallas y sus frecuencias se reduzcan a través de campañas (componentes mecánicos, electrónicos y electromecánicos) permitan alcanzar el nivel de operación que posee el motor C22, que paso por el mismo periodo de prueba, hace algunos años.

Frente a la situación previamente expuesta, se espera que el motor C23 logre una disminución del 51,2% en las frecuencias de fallas anuales. Esto se traduce en una reducción de las fallas promedio de 2,2 a 1,37 por año, generando así un descenso del 48,85% en los costos totales relacionados con la confiabilidad. Con esta optimización, se proyecta alcanzar un costo por confiabilidad de \$159.781.263 USD en el motor C23, representando una disminución del 85,65% en el costo total del ciclo de vida en comparación con el motor C22.

Es importante señalar que cualquier mejora destinada a reducir los costos asociados con la confiabilidad no puede afectar la cantidad de mano de obra debido a la reducida mantenibilidad del motor en el camión, por el reducido espacio de trabajo. Ambos motores presentan un nivel de mantenibilidad reducido, dado que comparten el mismo modelo de camión y tienen dimensiones muy similares.

Es importante resaltar que en el caso del motor C23, para que logre la reducción en la frecuencia de fallas requiere de un período de 3 años, durante los cuales se llevarán a cabo campañas e investigaciones con el objetivo de implementar mejoras. Por otro lado, el

motor C22 ha alcanzado su nivel óptimo de funcionamiento, y en este punto no se continuarán buscando mejoras adicionales.

A continuación se presenta una tabla resumen de los CTCV, si ocurre una reducción del 51,2% de la frecuencia de fallas del motor C23.

TIPOS DE COSTES	MOTOR 20V4000C22 (USD)	MOTOR 20V4000C23 (USD)
COSTOS INICIALES		
Motor diésel MTU 20V4000C22 de Camión Komatsu 930E-4SE	\$ 1.127.500	\$ 903.000
COSTOS ANUALES		
Costes operacionales	\$ 22.534.877	\$ 22.534.877
Costes por mantenimiento preventivo	\$ 2.310.632	\$ 2.573.098
Costes por Confiabilidad	\$ 159.963.724	\$ 159.781.263
COSTOS FUTUROS		
Costes por mantenimiento mayor (2,24 años)	\$ 416.544	\$ 465.106
Costes por mantenimiento mayor (4,48 años)	\$ 336.466	\$ 375.692
Valor reposición (6,72 años)	\$ -113.188	\$ -90.424
CTCV (P)	\$ 186.576.555	\$ 186.542.613

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-13. CTCV de motores C22 & C23 con reducción de frecuencia de fallas.

Al cumplir los 6,72 años de vida útil, los motores son retirados del equipo y son puesto a la venta en el mismo estado que fueron extraídos del equipo, a este costo, se le denomina valor reposición en el análisis de costo de ciclo de vida.

CONCLUSIÓN

En la actualidad, la mayoría de las empresas no emplean metodologías de análisis del Costo del Ciclo de Vida (ACCV) en sus activos, lo cual resulta en una falta de reconocimiento de la importancia que esto conlleva para la toma de decisiones estratégicas.

En un futuro próximo, las empresas enfrentarán a la necesidad de incorporar este método de análisis, lo que implica la evaluación cuidadosa de qué metodología se adapta mejor a la realidad de sus activos. Este proceso de evaluación debe considerar las ventajas, desventajas, nivel de precisión y cantidad de información que requiere cada metodología.

Entre las diversas metodologías disponibles, se destaca la propuesta de Woodward en 1997, reconocida por su capacidad de proporcionar cálculos rápidos a una tasa de fallos constante. Es crucial para las empresas evaluar meticulosamente las distintas opciones disponibles, considerando cómo cada metodología se alinea con la naturaleza y las necesidades de sus activos. Esta evaluación permitirá una adopción más efectiva y precisa de la metodología de análisis del ACCV, preparando así a las empresas para tomar

decisiones más informadas y acertadas en relación con la gestión y mantenimiento de sus activos.

El análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) se presenta como una herramienta integral para evaluar los costos totales asociados con un activo a lo largo de su vida útil, considerando adquisición, operación y disposición. Entre sus fortalezas, destaca su capacidad para abordar exhaustivamente los costos en todas las etapas del ciclo de vida, proporcionando así una visión completa y precisa de los costos asociados. Además, el ACCV permite a las organizaciones tomar decisiones informadas al considerar no solo los costos iniciales, sino también los costos operativos y de mantenimiento a lo largo del tiempo, promoviendo así una gestión más eficiente de los recursos. Otra fortaleza relevante es la capacidad del ACCV para facilitar la comparación entre diferentes opciones, al evaluar sus costos totales a lo largo del ciclo de vida. Esto no solo permite la selección de alternativas más rentables a largo plazo, sino que también contribuye a una planificación estratégica más sólida. Además, el enfoque sostenible del ACCV destaca la importancia de considerar los impactos ambientales y sociales a lo largo de la vida útil de un activo, fomentando prácticas más responsables y sostenibles.

Sin embargo, el ACCV no está exento de limitaciones. La precisión de sus resultados depende en gran medida de la calidad de las proyecciones y estimaciones futuras, introduciendo incertidumbre en el análisis. La recopilación y análisis de datos para un ACCV pueden ser complejos y consumir tiempo, especialmente en proyectos o activos de naturaleza compleja. La obtención de información también representa un desafío, ya que algunas empresas limitan la entrega de datos por razones legales o de propiedad intelectual, comprometiendo la integralidad del análisis. La veracidad de la información es crucial, ya que la falta de precisión puede afectar la validez de las conclusiones y la toma de decisiones.

En el contexto de los motores de combustión en el sector minero, se evidencia que la metodología de Woodward se adapta mejor a la realidad, especialmente considerando la confidencialidad de la información disponible. Tras aplicar este análisis, se identificó como opción más favorable (desde el punto económico) el motor 20V4000C22. Este motor requiere una inversión inicial más elevada. No obstante, se destaca a largo plazo debido a su menor tasa de fallos, su sólida trayectoria en la industria minera y su facilidad de mantenimiento, consolidándose como la elección más económica y viable en términos de gestión y mantenimiento de activos en el sector minero.

Es fundamental que Detroit SA evalúe minuciosamente los resultados y análisis para tomar la decisión correcta respecto a qué motor seleccionar para la minera. Además, es crucial considerar posibles mejoras a nivel de diseño operacional que puedan implementarse en la opción menos ventajosa.

En el marco del estudio de análisis de costo de ciclo de vida (ACCV), se implementó la metodología de Woodward de 1997, seleccionada por ser un modelo fundamental en la primera ejecución de un ACCV en la empresa. La elección se fundamentó en su simplicidad, proporcionando un entendimiento inicial y una base comprensible para la aplicación y análisis de los resultados. Sin embargo, se sugiere una mejora en el proceso de cálculo de costos de ciclo de vida, incorporando las probabilidades de Weibull mediante la metodología propuesta por William y Scott. La inclusión de modelos basados en la distribución de Weibull permitiría una evaluación más precisa de la confiabilidad y el tiempo de vida de los activos, contribuyendo así a una optimización más avanzada y robusta en el análisis de ciclo de vida. Esta propuesta apunta a un enfoque más avanzado en la gestión de activos, proporcionando una perspectiva más completa para la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

Wolter J. Fabrycky. (1997). Análisis del coste del ciclo de vida de los sistemas. España Gráficas Algorán, S.A

WOODHOUSE, J. Managing Industrial Risk: Getting Value for Money in Your Business. London: Chapman & Hall Inc, 1993, p.200-241. ISBN: 9780412475900.

Crespo Márquez, P. Moreu de León, J.F. Gómez Fernández, C. Parra Márquez and M. López Campos (2009). The maintenance management framework. Journal of Quality in Maintenance Engineering 15(2):167-178. DOI: 10.1108/13552510910961110 <http://dx.doi.org/10.1108/13552510910961110>

Parra, C., y Crespo, A. 2015. “Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. Desarrollo y aplicación práctica de un Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM)”. Segunda Edición. Editado por INGEMAN, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Sevilla, España.DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29363.66083>

Parra C. and Crespo A, 2006. On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models. Safety and Reliability for Managing Risk. Guedes Soares & Zio (eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5, p.2203-2214.

PARRA, C., CRESPO, A., KRISTJANPOLLER, F., VIVEROS, P. Stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the cycle cost analysis (LCCA). Case Study for the Rail Freight and Oil Industries. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability, 2012, 226 (4), p. 392-405.
<https://doi.org/10.1177/1748006X12441880>

WOODWARD, D. G. Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application. International Journal of Project Management, Dec. 1997, Vol. 15, No. 6. p. 335-344. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0).

Detroit S.A. Nosotros Detroit Chile [en línea] < <https://www.detroit.cl/nosotros/>>
 [consulta: 02 Agosto 2023]