UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE JOSÉ MIGUEL CARRERA - VIÑA DEL MAR

INTEGRACIÓN DE LA INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD A LAS ETAPAS DE PRE-INVERSIÓN DE UN PROYECTO

Trabajo de titulación para optar al título profesional de ingeniero en MATENIMIENTO INDUSTRIAL

Alumno:

Sr. Felipe Humberto Del Carmen Arriaza Galaz

Profesor Guía:

Sr. Ricardo Ciudad Cartagena.

2022

Derechos de autor

“© Felipe Humberto Del Carmen Arriaza Galaz, 2021”

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida la reproducción total o parcial

sin autorización previa solo por escrito.

RESUMEN

Keywords: COSTO CICLO DE VIDA, CRISTAL BALL, EVALUACIÓN DE PROYECTO, JACK KNIFE, PREPARACIÓN DE PROYECTO, PROYECTOS, WOODWARD.

Este trabajo de titulación aborda el análisis del costo de ciclo de vida de un activo físico, dentro del contexto de la preparación y evaluación de proyectos de inversión. Los evaluadores de proyectos normalmente no desarrollan este análisis con mayor detalle, solo consideran el costo de la inversión y, operación y mantenimiento, lo cual conlleva a una inexactitud en el costo al que incurrirá el inversionista, debido a no considerar los costos resultados de la baja confiabilidad del activo, que veremos en detalle en este trabajo.

Analizaremos dos activos físicos (Georradares), que representan diferentes costos iniciales para el proyecto, y diferentes programas de mantenimiento preventivo. Estos antecedentes fueron entregados a la compañía minera por el proveedor del activo y servicios de mantenimiento. Estos serán utilizados para el análisis en el contexto de la adquisición de un equipo (georradar) que tendrá participación en el desarrollo de las operaciones mineras, específicamente en el monitoreo y control permanente de los frentes de trabajo, de acuerdo con el artículo 245 del reglamento de seguridad minera.

El objetivo general del trabajo de titulación es demostrar los beneficios que significa realizar el análisis de costo de ciclo de vida, disminuyendo el riesgo y la incertidumbre de la toma de decisión al momento de adquirir un activo que participe directa o indirectamente en la operación. Utilizaremos herramientas de análisis como: método Jack Knife; para evaluar la criticidad del activo, flujo de los costos, modelo de Woodward del costo ciclo de vida de un activo, software Cristal Ball; realizando la sensibilización de los costos, podremos obtener información que nos permita la toma de decisión con menor riesgo e incertidumbre.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación de las técnicas descritas en este trabajo de titulación, puedo justificar su consideración en la etapa de preparación y evaluación de proyecto, debido a que en los flujos de costos tradicional se evidencia la capacidad de proyectar costos de operación y mantenimiento en distintos periodos, incluyendo los costos por baja confiabilidad durante el horizonte de proyecto. El análisis de criticidad de los activos indica que deben ser clasificados como críticos, esto utilizando el método Jack Knife, que nos permitió identificar los componentes a los cuales deberemos asignar mayor interés y solicitar implementar programas de mantenimientos especiales y asignar recursos adicionales para asegurar el máximo de disponibilidad del activo finalmente seleccionado.

Cristal Ball nos permite disminuir nuestra incertidumbre, al realizar simulaciones y entregando posibles escenarios a partir de lo que podemos controlar, que es el MTTR. Adicionalmente se realizaron simulaciones utilizando el IPC como variable aleatoria, la cual afectaría a los costos de mantenimiento. Con estas simulaciones podemos considerar la asignación de recursos y establecer lineamientos en los alcances de contrato, necesarios para mantener los indicadores en los márgenes que aseguran el control de los costos.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 3

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA 4

1. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA 5

1.1. MÉTODO JACK KNIFE PARA EVALUAR LA CRITICIDAD DE ACTIVO 5

1.2. COSTES DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO 6

1.3. MODELO DE ACCV DE WOODWARD 9

1.4. SIMULACIÓN CRISTAL BALL 12

1.5. ACTIVOS PARA ANALIZAR 14

1.5.1. Geo radar IBIS 14

1.5.2. Geo radar Groundprobe SSR-XP 15

CAPÍTULO 2 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL COSTO DE CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO 17

2. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL COSTO DE CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO 18

2.1. ANÁLISIS CRITICIDAD DE ACTIVOS Y COMPONENTES MEDIANTE MÉTODO JACK KNIFE 18

2.1.1. IBIS MSR 135 21

2.1.2. Groundprobe SSR39XT 21

2.1.3. Recomendaciones 22

2.2. ANÁLISIS DE LCC FLUJO DE COSTOS 25

2.3. ANÁLISIS DE LCC MODELO WOODWARD 29

2.3.1. Recomendaciones 33

CAPÍTULO 3: SENSIBILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA 35

3. SENSIBILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA 36

3.1. SENSIBILIZACIÓN FLUJO DE LOS COSTOS 36

3.2. SENSIBILIZACIÓN MÉTODO WOODWARD 39
3.3. SENSIBILIZACIÓN UTILIZANDO CRISTAL BALL 41
3.3.1. Simulaciones Radar Groundprobe SSR39XT 43
3.3.2. Simulaciones Radar IBIS MSR 135..... 44
CONCLUSIONES 51
BIBLIOGRAFÍA 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Registro consolidado MTBF – MTTR Radar IBIS MSR 135 19
Tabla 2-2 Registro consolidado MTBF – MTTR Radar Groundprobe SSR39XT..... 20
Tabla 2-3 Resumen Tasa de falla-T parada-MTTR..... 23
Tabla 2-4 Curva ISO Indisponibilidad utilizada en ambos gráficos 24
Tabla 2-5 Costo del ciclo de vida de radar Groundprobe..... 27
Tabla 2-6 Costo del ciclo de vida de radar IBIS MSR135 28
Tabla 2-7 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor Groundprobe SSR39XT 29
Tabla 2-8 Auditoria de cálculos Excel radar Groundprobe SSR39XT 30
Tabla 2-9 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor radar IBIS MSR135..... 31
Tabla 2-10 Auditoria de cálculos Excel radar IBIS MSR135 31
Tabla 2-11 resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward Radar Ibis MSR 135..... 32
Tabla 3-1 Falta titulo 37
Tabla 3-2 Falta titulo 38
Tabla 3-3 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor radar IBIS MSR135, con sensibilización en tiempo de detención 39
Tabla 3-4 valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor Groundprobe SSR39XT, con sensibilización de tiempo de detención 40
Tabla 3-5 Resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward 40
Tabla 3-6 Falta titulo 41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1 Representación gráfica de dispersión Jack Knife. 6
Gráfico 1-2 Relación de los costos durante todo el ciclo de vida, entre alternativas . 8
Gráfico 1-3 Gráfico de previsión (Cristal Ball Oracle). 14
Gráfico 2-1 Jack Knife sistemas radar IBIS MSR 135 20
Gráfico 2-2 Jack Knife sistemas radar Groundprobe SSR39XT..... 21
Gráfico 2-3 Jack Knife comparación de criticidad Equipos 23
Gráfico 3-1 Simulaciones Cristal Ball 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 pruebas . 42
Gráfico 3-2 Simulación Cristal Ball 43
Gráfico 3-3 Simulación Cristal Ball 44
Gráfico 3-4 Simulación Cristal Ball 44

Gráfico 3-5 Simulación Cristal Ball, con simulación de variables MTTR, MTBF, IPC. 45
Gráfico 3-6 Simulación Cristal Ball, con simulación de variable IPC 46
Gráfico 3-7 Simulación Cristal Ball, con simulación de variables..... 47
Gráfico 3-8 Simulación Cristal Ball, con variación de costos considerando solo el IPC 47
Gráfico 3-9 Sensibilidad IBIS y Groundprobe. IPC 48
Gráfico 3-9 Sensibilidad IBIS y Groundprobe. MTTR - MTBF 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Radar IBIS (Image by Interferometric Survey)..... 15
Figura 1-2 Radar GROUNPROBE SSR-XT 16

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1 Costos generados por un activo durante su ciclo de vida..... 9
Ecuación 1-2 Frecuencia de fallos. 10
Ecuación 1-3 Costos asociados a cada tipo de falla..... 11
Ecuación 1-4 Costo total por confiabilidad. 11
Ecuación 1-5 Costo total por fallo valor presente. 12
Ecuación 3-1 Costo total por fallo al año. 41

SIGLAS

ACCV	:	Análisis costo ciclo de vida.
CAE	:	Costo anual equivalente.
CAPEX	:	Gastos de capital, (del inglés Capital expenditures).
CI	:	Costes de operación.
CMM	:	Coste de mantenimiento mayor.
CMP	:	Costos de mantenimiento preventivo.
CTCV (P)	:	Costos totales del ciclo de vida en valor presente.
EN	:	Norma europea.
FMCW	:	Onda continua en frecuencia modulada (del inglés Frequency modulated continuous wave).
IPC	:	Índice de precios al consumidor.
ISO	:	International organization for estandaritazion.
LCC	:	Costo ciclo de vida (del inglés life cycle cost).
MTBF	:	Tiempo medio entre fallas (Del inglés mean time between failures).
MTTR	:	Tiempo medio para reparar, (del inglés mean time to repar).
OPEX	:	Costos de operación, (del inglés Operational expenditures).
SAR	:	Radar de apertura sintética, (del inglés Synthethic apertura radar).
TBF	:	Tiempo entre falla (del inglés time between failures).
TCP*f*	:	Costes totales por confiabilidad.
TTR	:	Tiempo para reparación (del inglés time to repar).
UNE	:	Los documentos normativos UNE (acrónimo de Una Norma Española)
USD	:	Dólar americano.

SIMBOLOGÍAS

%	:	Porcentaje.
Σ	:	Sigma.
Log	:	Logaritmo.
δ	:	Delta.

INTRODUCCIÓN

Durante la preparación y evaluación de proyectos de inversión, se pretende acceder a la mayor cantidad de información posible con el objetivo de contar con las herramientas para tomar la mejor decisión al término de esta etapa.

El objetivo de la etapa de prefactibilidad de un proyecto es recopilar toda la información necesaria para tomar la decisión de inversión o desestimar esta. De aprobar el estudio de prefactibilidad, se iniciará con el estudio de factibilidad, donde la única diferencia con el estudio de prefactibilidad es la fuente de información. La fuente es esta última etapa es primaria, se ahonda en detalle de los datos obtenidos, con el objetivo de profundizar en la fuente de la información y lograr desarrollar un estudio que permita tomar la mejor decisión, que en definitiva es realizar o no realizar la inversión.

El realizar la inversión de adquisición de un activo que participará en la operación es de gran importancia para el funcionamiento proyectado de la empresa. En el caso de este estudio, un activo que asegura el funcionamiento de la operación, porque así lo dicta la ley. Cuando las operaciones mineras (rajo abierto) planifican su desarrollo a largo plazo, deben considerar el monitoreo constante de los taludes. Con la ayuda de los georradares aseguran el trabajo seguro de personas y equipos. El georradar realiza escaneo de las paredes rocosas que se encuentran afectadas por gran cantidad de fallas y diaclasas que se encuentran en constante desplazamiento, normalmente movimientos seguros para la operación, ya que se encuentran bajo control al estar monitoreados las 24 horas del día. Esto permite mantener una constante operación extractiva minera, y solo cuando el georradar lo indica, se deberá detener la operación y retirar personas y equipos del frente de carguío.

Una deficiente evaluación de un proyecto, que en este caso es la adquisición de un activo, puede llevar a un error en el activo correcto para el normal funcionamiento de y desarrollo de las operaciones mineras. Llevando a costos excesivos y fuera de presupuesto.

El análisis del costo del ciclo de vida, utilizando técnicas de análisis como flujo de los costos estimados dentro del horizonte de proyecto, modelo de Woodward, ayudarán en la toma acertada de inversión. En este trabajo de titulación aplicaremos ambas técnicas de análisis que nos permitirá realizar una comparación de ambos activos.

Apoyándonos con herramientas como el método de Jack Knife, que mediante un gráfico de dispersión logarítmica podremos analizar el riesgo que significa cada sistema del activo, a la proyección de costos asociados al mantenimiento.

Utilizaremos el software Cristal Ball para graficar los posibles escenarios, del punto de vista de los costos, a que nos enfrentaremos. Estos posibles resultados

podrán ser analizados e incorporados al análisis de costos y posterior toma de decisión, gracias a las previsiones entregadas por el software.

Teniendo acceso a los resultados de estas técnicas de análisis, es que podremos implementar las medidas de control necesarias para disminuir el riesgo e incertidumbre de falla en la toma de decisión. En este caso que se refiere a la adquisición de un activo mediante la licitación de un contrato de proveer de un activo de monitoreo de taludes mediante un georradar y, mantenimiento y operación de este por un periodo establecido. La empresa que contrata el servicio podrá requerir de medidas de control adicionales para proteger sus operaciones.

OBJETIVO GENERAL

Demostrar el beneficio del análisis de LCC, utilizando herramientas como; método de Jack Knife, método de Woodward, flujo de los costos, y Cristal Ball, vinculando los resultados obtenidos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir técnicas para análisis de riesgo y costo del ciclo de vida de activos, mediante recopilación bibliográficas, justificando su desarrollo en la etapa de preparación de proyecto.
- Aplicar las técnicas descritas, comparando los activos propuestos, logrando como resultado los costos de ciclo de vida mínimos estimados.
- Sensibilizar los resultados obtenidos, a través de la modificación de variables que afectan los costos, disminuyendo el riesgo e incertidumbre en la toma de decisión de inversión.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

1. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

Este capítulo presenta las propuestas que permitirán optimizar la decisión de adquirir un activo que se ajuste a las necesidades de la organización, del punto de vista económico o financiero, dentro del horizonte de evaluación del proyecto. De esta forma se disminuirá la incertidumbre y riesgo de la toma de decisión a la hora de aprobar o rechazar un proyecto de inversión.

El error de estimación de costos durante la evaluación de proyectos de inversión en activos físicos proviene de recopilación incompleta de información relacionada con el costo de ciclo de vida.

Las herramientas de este capítulo se han desarrollado para que, de forma sencilla, de obtenga una visión general del desarrollo un análisis del costo de ciclo de vida de un activo.

1.1. MÉTODO JACK KNIFE PARA EVALUAR LA CRITICIDAD DE ACTIVO

El método Jack Knife es un método de dispersión logarítmica utilizado para, en este caso, priorizar los equipos analizados, del punto de vista de la criticidad de los componentes del equipo.

Conceptualmente corresponde a un estudio multicriterio de las distintas variables involucradas. (EasyMaint)

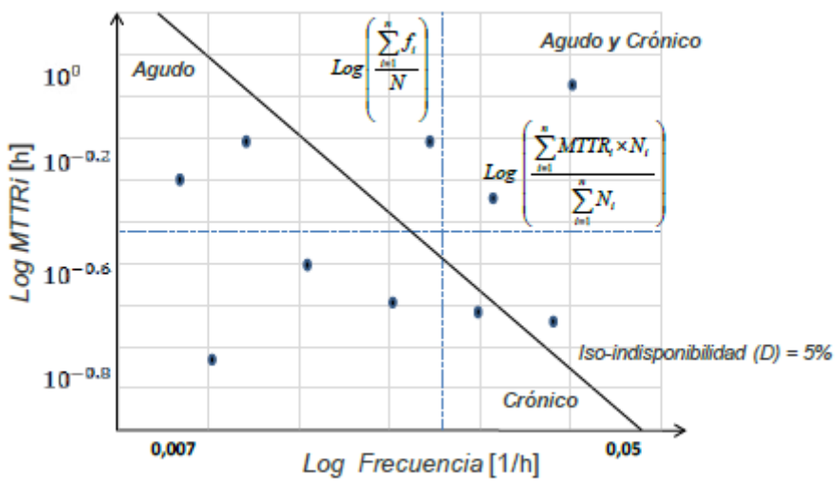
Se utilizará para realizar la comparación entre ambos radares, de acuerdo con los antecedentes entregados por la Compañía Minera Candelaria, con el objeto de asignar una criticidad, y considerarla al momento de establecer los alcances del eventual contrato de compra y servicio de mantenimiento

La representación gráfica la dividiremos en 4 cuadrantes:

I. Cuadrante inferior izquierdo: en este se representarán los equipos o componentes con fallas leves (Falla con baja frecuencia y bajo tiempo de reparación).
II. Cuadrante superior izquierdo: en este se representarán los equipos o componentes con fallas agudas (Falla con baja frecuencia y alto tiempo de reparación).
III. Cuadrante inferior derecho: en este se representarán los equipos o componentes con fallas crónicas (Falla con alta frecuencia y bajos tiempos fuera de servicio).

IV. Cuadrante superior derecho: en este se representarán los equipos o componentes con fallas críticas (Falla alta frecuencia y largo tiempo fuera de servicio).
(Ver Gráfico 1-1)

Al desarrollar este análisis, podremos tomar todas las consideraciones de ingeniería de mantenimiento aplicables o no, por parte de parte de la compañía o un prestador de servicio.



Fuente: Ingeniería de confiabilidad, Adolfo Arata.

Gráfico 1-1 Representación gráfica de dispersión Jack Knife.

1.2. COSTES DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

De acuerdo con la norma ISO 15663: define el costo de ciclo de vida como la esperanza de vida de un recurso particular, propiedad de la organización desde el punto de descubrimiento o adquisición, hasta su eliminación. (Predictiva21)

De acuerdo con la norma PAS-55: define el costo de ciclo de vida como el intervalo de tiempo que comienza con la adquisición de un activo y termina con la puesta fuera de servicio del activo o cualquier responsabilidad asociada.

De acuerdo con la ISO 55000: define el costo de ciclo de vida como etapas implicadas en la gestión de un activo. (Predictiva21)

De acuerdo con la norma UNE-EN 60300-3-3-2009: Un modelo de análisis de costo ciclo de vida es como cualquier modelo; es una representación simplificada de la realidad. "Se extraen las características y aspectos más importantes del producto y se traducen en relaciones con los costes estimados. (Norma.Española) Para que el modelo sea realista debía:

a) Representar las características del producto a analizar, incluyendo su entorno de utilización previsto, el concepto de mantenimiento, los escenarios de funcionamiento, y de logística de mantenimiento, así como cualquier restricción y limitación.
b) Ser completo para incluir y resaltar todos los factores que son relevantes para el LCC.
c) Ser lo suficientemente simple para que sea fácilmente entendible y permitir su uso oportuno en la toma de decisiones y su actualización y modificación futura.
d) Estar diseñado tal que permita la evaluación de elementos específicos del LCC, independiente de otros elementos.

Se recomienda aplicar a los activos que han sido seleccionados en la etapa de licitación, para la operación del proyecto. Los costos resultantes del este estudio deberán ser plasmados en el flujo de los costos, para posteriormente ser evaluados en la etapa correspondiente.

El análisis del costo de ciclo de vida es uno de los parámetros claves en el diseño de un producto o sistema sostenible. La aplicación de costo de ciclo de vida en las industrias manufactureras todavía es limitada debido a varios factores. La falta de comprensión de las metodologías de análisis de LCC es una de las barreras clave.

Estos costos de investigación, desarrollo asociado al producto y a los cuales incurre el fabricante, son siempre traspasados a quien adquiere el producto. En este caso el costo de esas etapas se representa como el costo inicial del activo.

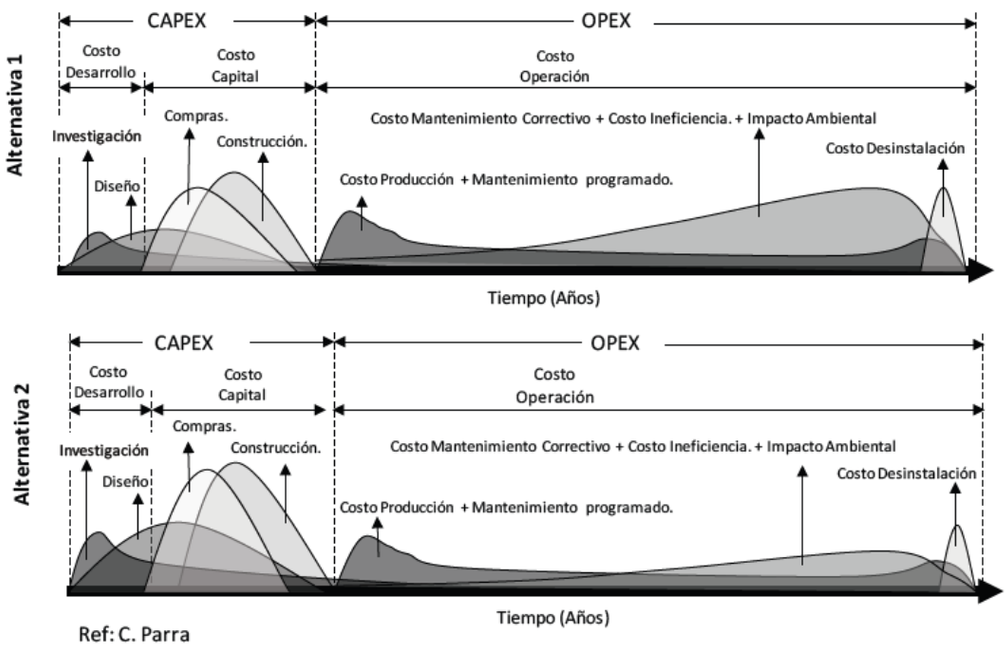
De acuerdo con una investigación publicada en el Journal Of Quality in maintenance engineering, revela que el costo de adquisición de un activo representa el 7,59% de LCC, mientras que los costos de operación, fallas y soportes dominan y contribuyen con casi el 93%. Lo cual, puede variar dependiendo del activo.

El costo de ciclo de vida acelera la adquisición de información y logra orientar al proveedor a seleccionar opciones que optimicen el valor del negocio y no solamente reduzcan el valor del equipo. Pautas de mantenimiento, procedimientos, repuestos de alta y baja rotación son analizados previamente a la adquisición del equipo, lo cual genera un mayor trabajo al inicio, pero acelera y optimiza el proceso normalmente realizado.

Actualmente en la mayoría de los mercados la responsabilidad de costos de retiro o reciclaje son adquiridos por el dueño del activo. Y deberán incluirse en el flujo de los costos estimados dentro del horizonte de proyecto. Siempre y cuando el reemplazo del activo sea calculado dentro de este horizonte. De no establecerse el reciclaje o desecho del equipo, se deberá considerar la venta, registrando los costos y beneficios que esto signifique.

La fijación de la tasa de descuento que se utilizará para realizar la evaluación del flujo de los costos puede darse por:

- Simple fijación de la administración, que en ese caso no sería necesario realizar calculo alguno.
- Coste de oportunidad del dinero en un proyecto alternativo.
- Rentabilidad que exige el inversionista.



Fuente: Ingeniería de confiabilidad, Adolfo Arata, Alessio Arata 2013 (Ref. C. Parra).

Gráfico 1-2 Relación de los costos durante todo el ciclo de vida, entre alternativas

1.3. MODELO DE ACCV DE WOODWARD

Propone incorporar los costos de fallos del activo en el desarrollo de los cálculos de costos de ciclo de vida. (Woodward, 1993)

I. Establecer las condiciones operacionales del sistema. Describir los modos de operación del sistema (carga completa, media carga, sin carga) y las capacidades de producción a satisfacer.
II. Establecer los factores de utilización. Estos factores deben indicar el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación.
III. Identificar las distintas opciones a ser evaluadas. Seleccionar las alternativas existentes que pueden cubrir con la necesidad de producción exigidas.
IV. Identificar para cada alternativa todas las categorías de costes básicos: inversión inicial, desarrollo, adquisición, mantenimiento planificado, reposición.
V. Determinar para cada alternativa los costes totales por confiabilidad. Identificar los principales tipos de fallos y la frecuencia de ocurrencia en el tiempo, la cual será un valor constante a lo largo del ciclo de vida del activo.
VI. Determinar los costos críticos. Identificar las categorías de costos de mayor impacto, y analizar los factores que propician los altos costes (proponer estrategias de control).
VII. Calcular todos los costes en valor presente (VA), para cada alternativa. Definir el factor de descuento y el periodo de ida útil esperado y estimar los costes totales en valor presente, por cada alternativa evaluada.
VIII. Seleccionar la alternativa ganadora. Realizar la comparación entre las alternativas y seleccionar la alternativa que genere los menores costos al proyecto durante todo su horizonte de vida.
Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

El modelo de Woodward propone la siguiente expresión matemática para calcular el costo del ciclo de vida que produce un activo durante su vida proyectada.

$$CTCV\ (P) = CI + CO + CMP + TCPf + CMM$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

Ecuación 1-1 Costos generados por un activo durante su ciclo de vida.

Donde, totas las categorías se convertirán a valor presente, una tasa de interese determinada para el proyecto y la vida útil esperada (Crespo.Y.Parra, 2015)

Donde:

CTCV (P)= Costos totales del ciclo de vida en valor presente. (S/A, Analisis de costos y Ciclo de vida para la reposición de). Para una tasa de interés y un periodo esperado.

CI= Costes de operación, normalmente dado por valor anualizado.

CMP= Costos de mantenimiento preventivo, normalmente dado como valor anualizado. (ReliabilityWeb)

TCP*f*= Costes totales por confiabilidad (costos por fallo), normalmente dado como valor anualizado. En el caso de que se asuma una tasa de fallo constante, el impacto será constante durante todos los años.

CMM= Coste de mantenimiento mayor, Especiales, normalmente dado como mantenimiento mayor.

A continuación, se detallan los pasos a seguir para estimar los costes por fallo según el modelo de Woodward:

a) Definir los tipos de fallos (F). Donde f=1...F tipos de fallos.
b) Definir la frecuencia de fallos esperadas por año δ_f. Se expresa en fallos por año. Esta frecuencia se asume como un valor constante por año para el ciclo de vida útil esperado y se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\delta_{f=\frac{N}{T}}$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

Ecuación 1-2 Frecuencia de fallos.

Donde:

N= número total de fallos.

T= número total esperado de años de vida útil.

c) Calcular los costes asociados a cada tipo de fallo $C_{f\,(\frac{\$}{fallo})}$. Estos costos incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional. (S/A, Análisis de costos de ciclo de vida modulo VII)

$$C_{f=\sum_{f=1}^{F} MTTR_f x\ Cpe_f}$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

Ecuación 1-3 Costos asociados a cada tipo de falla.

Donde:

MTTR= tiempo medio para reparar cada fallo= horas/fallo.

Cpe= costes de penalización por hora (producción, mano de obra, repuestos) = $/hora. (Predictiva21, Técnicas de análisis de coste de ciclo de vida)

d) Calcular los costes totales por fallos por año $PTCP_f$ ($). Que se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$TCP_{f=\sum_{f=1}^{F} C_f x\ \delta_f}$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

Ecuación 1-4 Costo total por confiabilidad.

e) Calcular los costes totales por fallo en valor presente $PTCP_f$ ($). Dado en valor anualizado TCP_f, se estima su valor monetario en función del número de años de vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión por utilizar para estimar los $PTCP_f$ en valor presente:

$$PTCP_{f=TCP_f x \frac{(1+i)^T-1}{ix(1+i)^T}}$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo.Y.Parra, 2015)

Ecuación 1-5 Costo total por fallo valor presente.

El siguiente paso, a los costes calculados por confiabilidad, se adicionarán el resto de los costes evaluados (Inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.). Se deberá calcular los costos en valor presente, aplicar tasa de descuento y aplicar a los años esperados de acuerdo con la vida útil del proyecto.

1.4. SIMULACIÓN CRISTAL BALL

Crystal Ball es un programa de previsión y análisis de riesgos orientado a gráficos, que elimina el aspecto "incertidumbre" a la hora de tomar decisiones, en este caso a la toma de decisión de invertir entre un radar y otro alternativo.

Mas importante es que se visualizarán de mejor forma las posibles variaciones que podría tener el costo final del ciclo de vida del activo.

Crystal Ball es una herramienta de análisis que ayuda a ejecutivos, analistas y otros usuarios encargados de tomar decisiones mediante la realización de simulaciones en modelos de hoja de cálculo. Las previsiones que resultan de estas simulaciones ayudan cuantificar las áreas de riesgo para que las personas encargadas de tomar decisiones dispongan de la mayor cantidad de información posible para apoyar sus decisiones.

El proceso básico para utilizar Crystal Ball es:

a) "Crear un modelo de hoja de cálculo que describa una situación incierta. (Cuantificación de riesgos con modelos de hoja de cálculo)." ("Acerca de la creación de modelos y el análisis de riesgos")
b) Ejecutar una simulación en Crystal Ball.
c) Analizar los resultados (Gráficos, informes y datos de Crystal Ball).

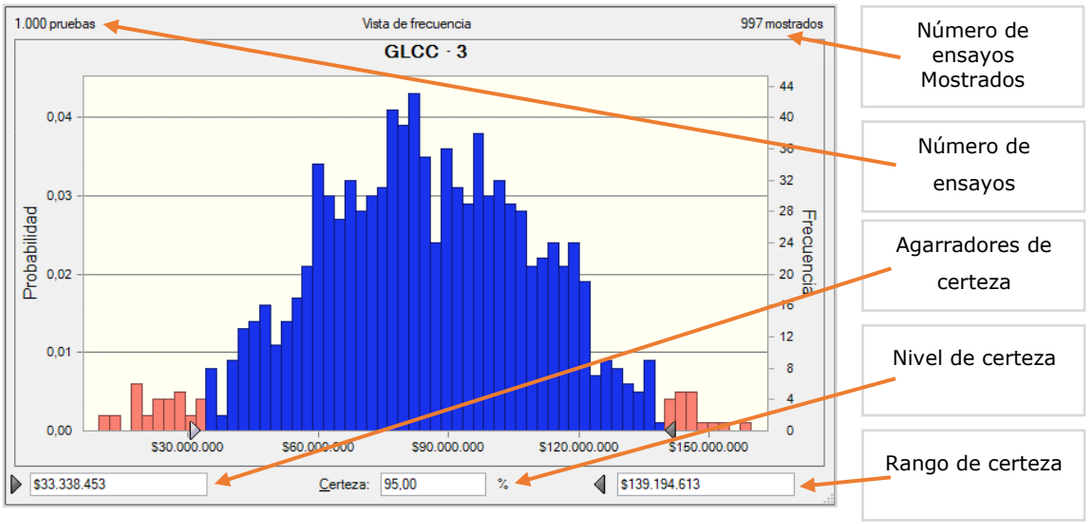
Las herramientas principales para analizar resultados de simulación son los gráficos de Crystal Ball, especialmente los gráficos de previsión. Durante una simulación, Crystal Ball crea un gráfico de previsión para cada celda de previsión. Los

gráficos de previsión condensan toda la información en un pequeño espacio. Puede mostrar esa información gráfica y numéricamente. También puede mostrar otros tipos de gráficos, generar informes y extraer datos para procesarlos más tarde mediante Microsoft Excel u otra herramienta de análisis.

Los pasos que se indican a continuación pueden ayudar con el análisis centrándose en los detalles y las tendencias generales: a

a) Vea la imagen completa.
   Mire cada gráfico de previsión como si lo hiciera desde un punto de vista elevado. Observe la forma de la distribución: (S/A, Directrices para analizar resultados de simulación)
   - ¿Se distribuye con normalidad o se sesga de forma negativa o positiva?
   - ¿Es "plano" (se extiende a ambos lados de la media) o "en pico" (con la mayoría de los valores de agrupados alrededor de la media)?
   - ¿Tiene sólo un modo (valor más probable) o es bimodal con varios picos o jorobas?
   - ¿Es continuo o hay varios grupos de valores separados del resto, o incluso valores extremos que quedan fuera del rango de visualización?
b) Observe el nivel de certeza, la probabilidad de obtener valores en un determinado rango.
c) Céntrese en el rango de visualización.
   Puede cambiar el rango de visualización para centrarse en distintas secciones de la previsión. Por ejemplo, puede establecer el rango de visualización para centrarse sólo en su cola superior o inferior (Centrarse en una parte del rango de visualización).
   (docs.oracle, s.f.)

A continuación de detallan las partes del gráfico resultante del análisis:



Fuente: Elaboración propia en base a Cristal Ball resources.

Gráfico 1-3 Gráfico de previsión (Cristal Ball Oracle).

1.5. ACTIVOS PARA ANALIZAR

Los georradares analizados en este trabajo corresponden a los utilizados en minería de superficie (Rajo abierto), los cuales son mantenidos y operados normalmente por la empresa fabricante de estos, aunque también existen contratos de mantenimiento y operación realizados por terceras empresas con personal capacitado.

Cuando hablamos de operación, en realidad nos referimos a la programación (software) del equipo, ya que equipo no requiere de un operador permanente. Esto nos lleva a la importancia del servicio de mantenimiento preventivo, a la consideración de los impactos negativos que representa la falla inesperada del equipo.

1.5.1. Geo radar IBIS

Los radares IBIS son fabricados por IDS, compañía que Rockpoint representa desde el año 2015, el acrónimo «IBIS» en ingles Image by interferometric survey significa imágenes por interferometría.

Los radares IBIS son radares terrestres que utilizan distintas técnicas para poder llegar al producto final que es la lectura del movimiento en el talud. Estas técnicas son:

- Tecnología SAR : syntethic aperture radar
- FMCW : frequency modulated continous wave

Ver Figura 1-1.

Los radares ibis tienen la capacidad de detectar movimientos tempranos en taludes, tanto hechos por el hombre como los taludes mineros como naturales como laderas, glaciares, etc.

Fuente: IBIS ROVER. Mining Magazine, Google.

Figura 1-1 Radar IBIS (Image by Interferometric Survey)

1.5.2. Geo radar Groundprobe SSR-XP

Diseñado para monitorear de forma minuciosa los movimientos conocidos que representan una amenaza posible o inmediata a la seguridad o productividad de las operaciones de minería, el SSR-XT monitorea los movimientos de taludes dentro de un área específica (Imagen 1-10).

Fuente: https://www.groundprobe.com/product/ssr-xt/?lang=es.

Figura 1-2 Radar GROUNPROBE SSR-XT

CAPÍTULO 2 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL COSTO DE CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

2. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL COSTO DE CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

En el presente capítulo se aplicarán las técnicas de análisis propuestas, como:

- El análisis de criticidad de los sistemas del activo se complementará con el modelo Jack Knife.
- El análisis del costo de ciclo de vida se calculará el flujo de los costos utilizando en Excel, considerando costos de inversión, CAE inversión, costos de operación y mantenimiento, mantenimiento mayor, costos por baja confiabilidad, CAE de operación y mantenimiento, CAE total.
- El Modelo de Woodward de análisis costo de ciclo de vida se aplicará para obtener una estimación de los costos generados por el activo, producto de su baja confiabilidad durante su vida útil. Estos costos pueden ser generados por su impacto en la producción, costos de mantenimiento, mano de obra, etc.
- El costo de ciclo de vida y análisis de reemplazo de realizarán desde el mismo flujo de costos propuesto.
- El contexto de evaluación es la adquisición y contratación de servicios de mantenimiento de un activo físico, en este caso un georradar. Del punto de vista de una compañía que requiere este activo y servicio de mantenimiento, por lo cual, licitará este requerimiento y evaluaremos dos equipos. El georradar Ibis Modelo MSR135 y del georradar Groundprobe SSR39XT.

Se analizará los resultados obtenidos y, de acuerdo con esa información, las conclusiones y recomendaciones se entregarán del punto de vista del beneficio para el demandante del activo y servicio de mantenimiento.

2.1. ANÁLISIS CRITICIDAD DE ACTIVOS Y COMPONENTES MEDIANTE MÉTODO JACK KNIFE

Los activos que se requiere adquirir y mantener para el correcto desarrollo de las operaciones son activos que serán mantenidos por el proveedor, y que participarán en las operaciones como un equipo de apoyo en temas de seguridad para las personas y equipos. Al analizar la criticidad de los componentes permitirá, en este contexto, ampliar la visión de evaluación, no considerando solamente los costos, sino que beneficiar al contratante de los servicios, entregando previsión del requerimiento de

mantenimiento y operación, posibles deficiencias en la disponibilidad esperada y demostrará la importancia de la participación de personal especialista en mantenimiento en la etapa de preparación y evaluación de un proyecto de inversión.

De acuerdo con los antecedentes entregados por Minera Candelaria en número total de detenciones anuales, según el programa del proveedor IBIS es de 14 detenciones (Tabla 2-1), y en el caso del equipo N°2 GRONUDPROBE, es de 12 detenciones (Tabla 2-2).

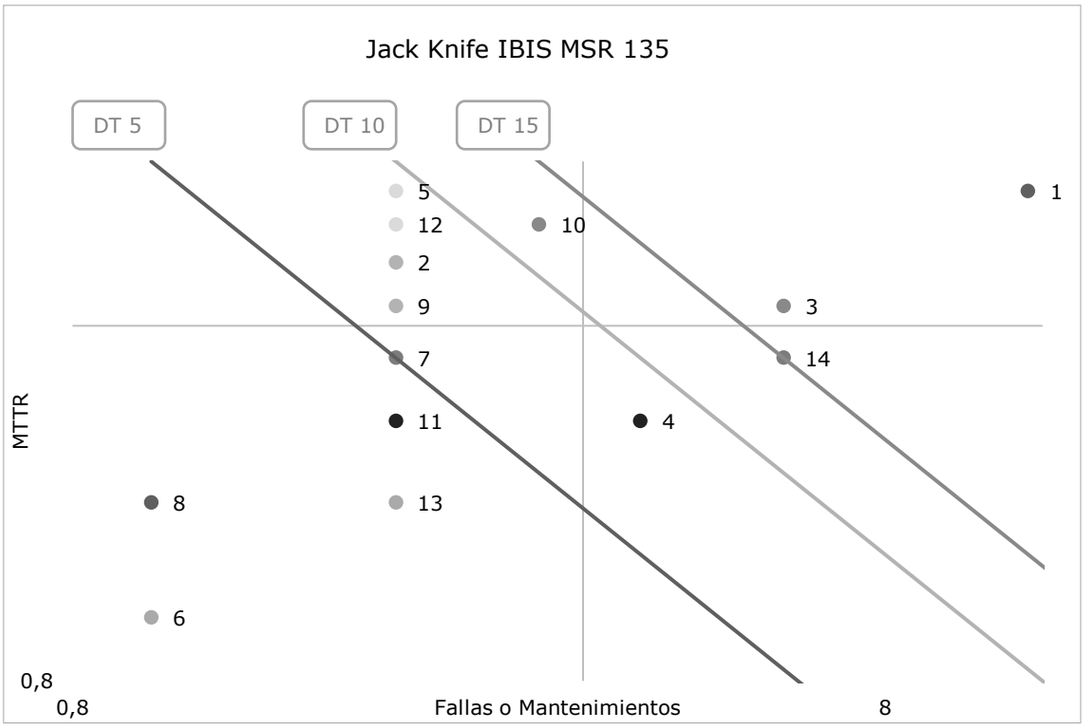
En ambos equipos se han evaluado los principales sistemas presentados por el proveedor durante la etapa de licitación de compra del activo físico, el cual eventualmente podría considerar un contrato de mantenimiento preventivo anual, y por un periodo determinado.

Los activos prestan el mismo servicio de monitoreo con características similares del punto de vista tecnológico. La diferencia se presenta en ciertos sistemas que necesitan de mayor cantidad de mantenimientos preventivos. Probablemente por materiales utilizados, ingeniería de desarrollo, reducción de costos en las etapas de investigación. Los datos que se analizarán corresponden a mantenimientos preventivos. Por lo tanto, los indicadores de mantenimiento serán preventivos, con el objetivo de realizar el análisis de toma de decisión de inversión.

Tabla 2-1 Registro consolidado TBF – TTR Radar IBIS MSR 135

Componente	N°	Falla o detención	Tiempo de detención por falla	Total, Tiempo de parada (h)	TTR	TBF
Generador	1	12	4,5	54	4,5	726
ATP	2	2	3,5	7	3,5	4377
Set To Work	3	6	3	18	3,0	1457
Inspección operativa del sistema	4	4	2	8	2,0	2188
Sistema de frenos	5	2	4,5	9	4,5	4376
Patas niveladoras	6	1	1	1	1,0	8759
Balatas ruedas	7	2	2,5	5	2,5	4378
Revisión de tráiler	8	1	1,5	1,5	1,5	8759
Rotación radar	9	2	3	6	3,0	4377
Banco de baterías	10	3	4	12	4,0	2916
Sensor de temperatura	11	2	2	4	2,0	4378
Presión de aceite compresor	12	2	4	8	4,0	4376
Limpieza sensor estación meteorológica	13	2	1,5	3	1,5	4379
Obtención de datos y medición	14	6	2,5	15	2,5	1458

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por el proveedor.



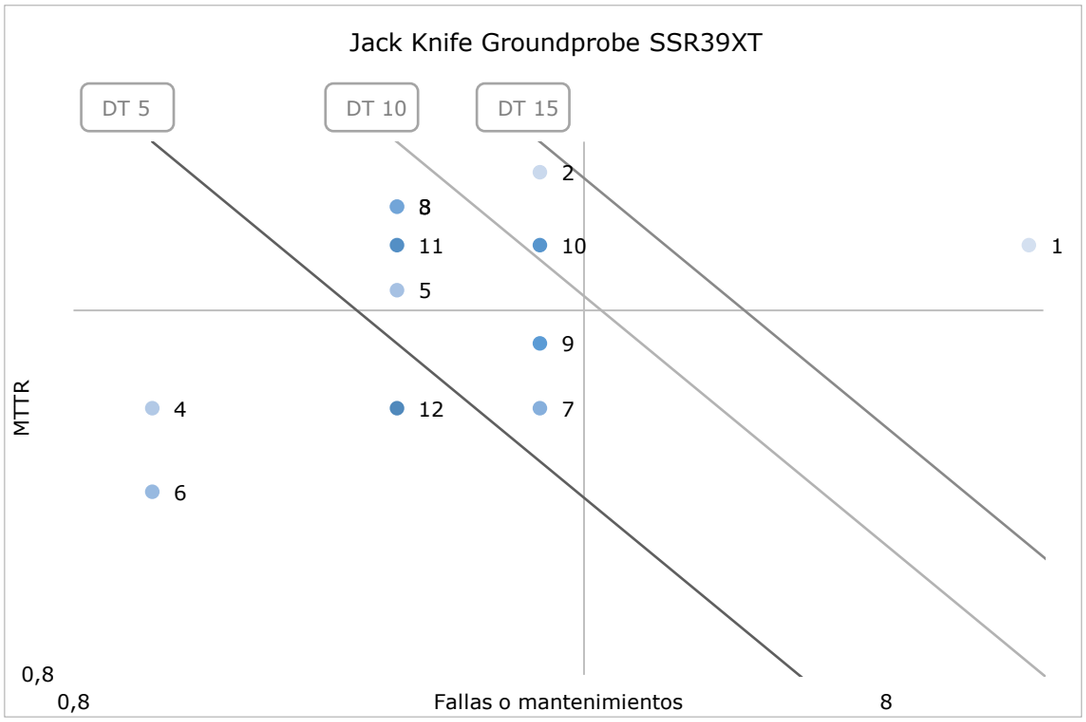
Fuente: Elaboración propia a partir de la comparación de activos.

Gráfico 2-1 Jack Knife sistemas radar IBIS MSR 135

Tabla 2-2 Registro consolidado TBF – TTR Radar Groundprobe SSR39XT

Componente	N°	Falla o detención	Tiempo de detención por Mtto.	Total, Tiempo de parada (h)	TTR	TBF
Generador	1	12	3,5	42	3,5	727
Inspección operativa del sistema	2	3	4,5	13,5	4,5	2916
Frenos	3	2	4	8	4,0	4376
Engrase de patas niveladoras	4	1	2	2	2,0	8758
Balatas ruedas	5	2	3	6	3,0	4377
Revisión de tráiler	6	1	1,5	1,5	1,5	8759
Rotación radar	7	3	2	6	2,0	2918
Banco de baterías	8	2	4	8	4,0	4376
Sensor de temperatura	9	3	2,5	7,5	2,5	2918
Presión de aceite compresor	10	3	3,5	10,5	3,5	2917
Limpieza sensor estación meteorológica	11	2	3,5	7	3,5	4377
Obtención de datos y medición	12	4	2	8	2,0	2188

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por el proveedor del activo.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por Minera Candelaria.

Gráfico 2-2 Jack Knife sistemas radar Groundprobe SSR39XT

2.1.1. IBIS MSR 135

El gráfico 2-1 representa a los sistemas, que de acuerdo con el proveedor deberán ser incorporados a un programa de mantenimiento. El sistema de generación eléctrica es el que requiere de mayores detenciones por concepto de mantenimiento preventivo. Esto por tratarse de un componente que no puede ser reemplazado inmediatamente y su falla funcional generaría un importante impacto en la disponibilidad.

El equipo IBIS MSR 135, presenta una mayor cantidad de sistemas en el cuadrante de crónicos agudos, con el sistema de generación eléctrica y Set to Work que significa la configuración necesaria para iniciar el trabajo.

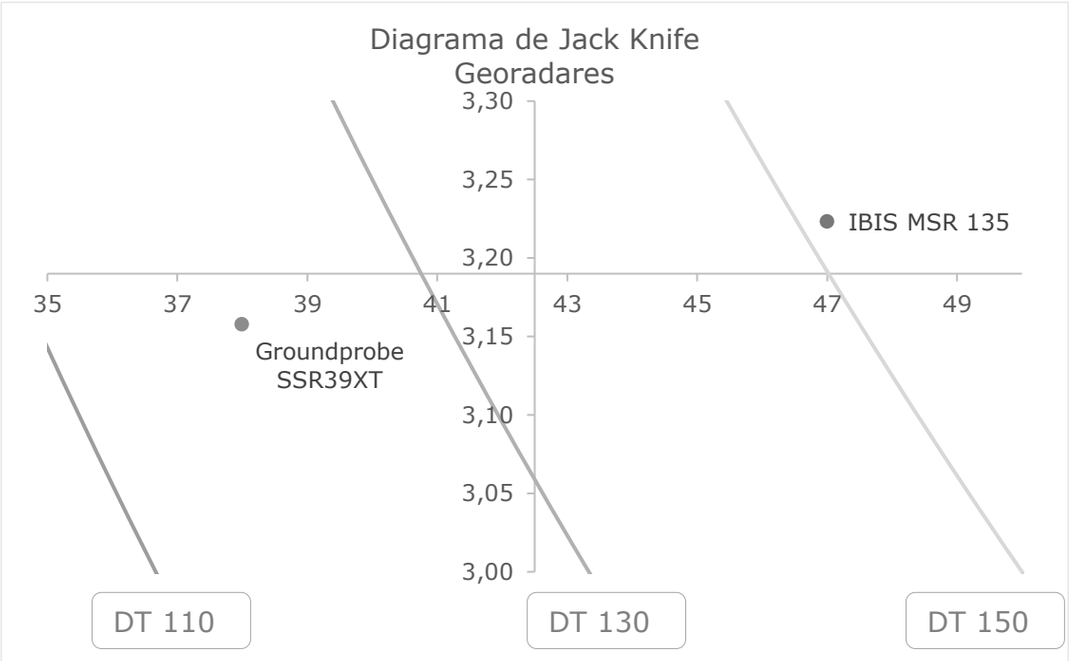
2.1.2. Groundprobe SSR39XT

El gráfico 2-2 nos muestra solo un sistema en el cuadrante IV y con una (01) hora menos de tiempo de intervención por mantenimiento preventivo.

Con relación a los sistemas 8, 11, 5, 10 y 2, se solicitará presentar programa y procedimientos de mantenimiento que permita bajar los tiempos de reparación o asegurar los tiempos presentados en la propuesta.

2.1.3. Recomendaciones

- El programa preventivo presentado por los proveedores nos indica que no podemos bajar la cantidad de intervenciones. Por lo cual, se deberá considerar aplicar la ingeniería de mantenimiento, con el objetivo de bajar la carga horaria asignada a aplicar el programa de mantenimiento.
- El oferente deberá presentar un programa especial para asegurar que las tareas de mantenimiento no superen los tiempos propuestos.
- Se podrán generar sanciones económicas contractuales especiales cuando la disponibilidad operativa baje debido a la deficiente administración de uno de estos sistemas considerados como críticos.
- Se podrá considerar la negociación con el oferente, con relación a la posible asignación de recursos adicionales por parte de la compañía contratante del servicio, con el objeto de mejorar la disponibilidad operativa del equipo. Estos recursos monetarios con el objeto de ampliar los alcances de contratos.
- Se solicitará programa de mantenimiento y procedimientos especiales, correspondiente a los sistemas 2, 8, 11, 10 y 5, con el objeto de disminuir los tiempos de reparación.
- Analizar la posibilidad de asignar recursos adicionales para integrarlos a los alcances del contrato, con el objeto de mantener personal disponible para realizar modificación de las fechas mantenimientos programados, cuando se presenten lapsos de tiempo disponibles en la operación, y optimizar los tiempos de detención.
- Se deberá considerar recursos adicionales para mantener stock de repuestos para mantenimiento del sistema N°1, el cual genera una tasa de mantenimientos mayor a los otros sistemas del equipo.
- Los sistemas podrán ser mantenido durante eventuales lapsos de tiempo que se generan en la operación, optimizando las detenciones programadas.



Fuente: Elaboración propia, comparando datos de ambos activos.

Gráfico 2-3 Jack Knife comparación de criticidad Equipos

El equipo IBIS MSR 135 representa un mayor riesgo a la operación al encontrase en el cuadrante agudo y crónico, el cual representa mantenimientos con mayor tiempo de reparación y con mayor cantidad de detenciones por concepto de mantenimiento preventivo.

Por otro lado, el equipo Groundprobe SSR39XT se encuentra en el cuadrante leve que representa una menor cantidad de mantenimientos y menor tiempo para su ejecución.

Importante: Tomar en cuenta que ambos equipos se encuentran sobre la ISO DT 110 que representa más de 100 horas de indisponibilidad al año.

Tabla 2-3 Resumen Tasa de falla-T parada-MTTR

Equipo	Fallas o mantenimiento preventivo	Tiempo de parada	MTTR preventivo	Tasa de falla	Indisponibilidad
IBIS MSR 135	47	151,5	3,22	0,0054	1,73%
Groundprobe SSR39XT	38	120	3,16	0,0043	1,37%

Fuente: Propia, resumen de MTTR, Indisponibilidad.

Esta tabla el resumen utilizado para confeccionar el gráfico Jack Knife de comparación de criticidad de equipo de acuerdo con el plan de mantenimiento presentado por los oferentes.

Tabla 2-4 Curva ISO Indisponibilidad utilizada en ambos gráficos

ISO	Indisponibilidad		
N° Fallas	DT 5	DT 10	DT 15
1	5,0	10,0	15,0
2	2,5	5,0	7,5
3	1,7	3,3	5,0
4	1,3	2,5	3,8
5	1,0	2,0	3,0
6	0,8	1,7	2,5
7	0,7	1,4	2,1
8	0,6	1,3	1,9
9	0,6	1,1	1,7
10	0,5	1,0	1,5
11	0,5	0,9	1,4
12	0,4	0,8	1,3
13	0,4	0,8	1,2

Fuente: Elaboración propia a partir de resumen de fallas y parámetros de indisponibilidad.

El equipo Groundprobe SSR39XT representa un menor riesgo a la operación, al presentar una mayor disponibilidad, ya que la disponibilidad operativa es la que genera variación importante en los resultados de la operación (Frente de carguío).

2.1.4. Recomendaciones:

Se podrá requerir al oferente presentar propuestas de programas de mantenimiento y analizar especialmente los componentes más críticos del diagrama Jack Knife (Gráfico 2-2, 2-3).

La supervisión que efectuará la empresa principal se verá facilitada al haber identificado los sistemas críticos del equipo, poniendo énfasis en el cumplimiento de los programas de mantenimiento contratados al oferente.

Se podrá desarrollar de mejor forma el alcance del proyecto en el momento de realizar la licitación del equipo.

Se enfocará la sanción a la baja de disponibilidad, debido a que ya se han identificado los sistemas que generan mayor necesidad de mantenimiento.

Se establecerán KPI's cualitativos y cuantitativos, de acuerdo con las características técnicas del equipo y a su vez la disponibilidad ofrecida por el oferente.

Se dará importancia a la gestión de inventarios, debiendo considerar a cargo de quien será esta responsabilidad. Se evaluará la capacidad de adquisición de inventario que asegure la correcta gestión del mantenimiento preventivo. Estos costos podrán ser controlados, incorporando una cláusula en el alcance, que obligue a la empresa a cargo del mantenimiento a presentar inventarios actualizados de repuestos, de acuerdo con el programa de mantenimiento preventivo entregado.

2.2. ANÁLISIS DE LCC FLUJO DE COSTOS

La compañía minera Candelaria, en el momento de realizar la licitación de compra y, operación y mantenimiento, se enfoca en adquirir de acuerdo con costos, prestaciones del equipo, especialización de la empresa oferente, etc.

A. Las tablas presentan los valores correspondientes a ambos equipos; Ibis MSR 135 (Tabla 2-5) y Groundprobe SSR39XT (Tabla 2-6).
B. La moneda utilizada es en USD.
C. Se realizó el cálculo de CAE correspondiente a la inversión

I. Se realiza la evaluación de costo de ciclo de vida utilizando la metodología normal de contabilidad de costos, mediante una estimación y análisis de flujo de los costos.
II. Se analiza el CAE de la inversión, y el CAE de mantenimiento y operaciones.
III. Los resultados son los siguientes:
   a) Groundprobe SSR39XT:
      - CAE Proyecto: $156.320.008.- (tabla 3-8 indicador amarillo)
      - VAC Proyecto: $883.242.909.- (tabla 3-8 indicador rojo)
   b) Ibis MSR125:
      - CAE Proyecto: $197.074.000.- (tabla 3-9 indicador amarillo)
      - VAC Proyecto: $1.113.512.053.- (tabla 3-9 indicador rojo)

De los costos de operación y mantenimiento, costos de mantenimiento mayor, costos por baja confiabilidad, se representan estables durante todo el horizonte de proyecto, con el objeto de realizar la comparación de resultados con otros métodos de análisis de costo de ciclo de vida. En el tercer capítulo de realizará la sensibilización de los costos.

El horizonte de evaluación es a 10 años, establecido como plazo máximo a mantener el activo en operación. La compañía ha establecido este periodo máximo para el reemplazo por motivos de actualización de la tecnología de radares.

En el caso de realizar la evaluación en moneda nacional, se recomienda calcular la devaluación de la moneda ante una moneda extranjera dominante como el dólar americano. Si se evalúa en UF de deberá considerar que una unidad auto reajustable a la variación de la inflación

En relación con la tasa de interés utilizada para este proceso de licitación, minera Candelaria a fijado una tasa de 12% con objeto de transparentar, ante los oferentes, el proceso de adjudicación del contrato.

Utilizando este análisis de costos, nos acercamos a costos más realistas, debido a que podemos realizar los ajustes que estén a nuestro alcance, como ejemplo el IPC estimado, de acuerdo con el cálculo interanual de este indicador.

Se podrá utilizar esta tabla para el análisis de los costos presentados por el oferente y realizar las modificaciones que se estimen conveniente por el área de contabilidad, en relación con las variables que podrían afectar los costos en el futuro.

En este caso, el CAE de la inversión no genera impacto, ya que los costos de operación y mantenimiento son extremadamente altos, debido a la criticidad del activo. El CAE total presenta un alza constante a través del desarrollo del proyecto. Por lo cual se deberá evaluar los KPI's de disponibilidad operativa. Sin embargo, en activo que generen un menor costo por baja confiabilidad es que se podrá ver reflejado de mejor forma en el flujo de los costos.

La mejor opción para invertir, de acuerdo con los resultados obtenidos, es el radar Groundprobe SSR39XT. Con un costo anual equivalente CAE menor y con un menor valor actual de los costos VAC. Esto como resultado de presentar un programa con una menor cantidad de intervenciones por mantenimiento preventivo. Componentes diseñados para una duración mayor, motor más eficiente y limpio, que requiere menor intervención.

Tabla 2-5 Costo del ciclo de vida de radar Groundprobe.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	$ -350.000										
Valor residual		$ 322.000	$ 294.000	$ 266.000	$ 238.000	$ 210.000	$ 182.000	$ 154.000	$ 126.000	$ 98.000	$ 70.000
VA VR		$ 287.500	$ 234.375	$ 189.334	$ 151.253	$ 119.160	$ 92.207	$ 69.662	$ 50.889	$ 35.340	$ 22.538
VA Inversión		$ -62.500	$ -115.625	$ -160.666	$ -198.747	$ -230.840	$ -257.793	$ -280.338	$ -299.111	$ -314.660	$ -327.462
CAE Inversión		**$70.000,00**	**$68.415,09**	**$66.893,31**	**$65.434,26**	**$64.037,36**	**$62.701,92**	**$61.427,08**	**$60.211,84**	**$59.055,08**	**$57.955,57**
Costo operación		**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**
Servicio de mantenimiento		$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008	$ 265.008
Costo mantenimiento		**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**	**$ 265.008**
Costo confiabilidad		$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000	$ 156.000.000
Costo mantenimiento Mayor		$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000	$ 55.000
Costo O&M		**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**	**$ 156.320.008**
Actualización de O&M		**$139.571.436**	**$264.188.789**	**$375.454.283**	**$474.798.474**	**$563.498.645**	**$642.695.226**	**$713.406.459**	**$776.541.488**	**$832.912.050**	**$883.242.909**
CAE O&M		**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**	**$156.320.008**
Costo Total		**$156.390.008**	**$156.388.423**	**$156.386.901**	**$156.385.442**	**$156.384.045**	**$156.382.710**	**$156.381.435**	**$156.380.220**	**$156.379.063**	**$156.377.964**

Fuente: propia a partir de datos entregados por proveedores y Minera Candelaria.

Tabla 2-6 Costo del ciclo de vida de radar IBIS MSR135

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	$ -300.000										
Valor residual		$ 276.000	$ 252.000	$ 228.000	$ 204.000	$ 180.000	$ 156.000	$ 132.000	$ 108.000	$ 84.000	$ 60.000
VA VR		$ 246.429	$ 200.893	$ 162.286	$ 129.646	$ 102.137	$ 79.034	$ 59.710	$ 43.619	$ 30.291	$ 19.318
VA Inversión		$ -53.571	$ -99.107	$ -137.714	$ -170.354	$ -197.863	$ -220.966	$ -240.290	$ -256.381	$ -269.709	$ -280.682
CAE Inversión		**$60.000,00**	**$58.641,51**	**$57.337,13**	**$56.086,51**	**$54.889,17**	**$53.744,50**	**$52.651,78**	**$51.610,15**	**$50.618,64**	**$49.676,20**
Costo operación		**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**
Servicio de mantenimiento		$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000	$ 84.000
Costo mantenimiento		**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**	**$ 84.000**
Costo confiabilidad		$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000	$ 196.950.000
Costo mantenimiento Mayor		$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000	$ 40.000
Costo O&M		**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**	**$ 197.074.000**
Actualización de O&M		**$175.958.929**	**$333.065.115**	**$473.338.495**	**$598.582.585**	**$710.407.665**	**$810.251.487**	**$899.397.756**	**$978.992.639**	**$1.050.059.499**	**$1.113.512.053**
CAE O&M		**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**	**$197.074.000**
Costo Total		**$197.134.000**	**$197.132.642**	**$197.131.337**	**$197.130.087**	**$197.128.889**	**$197.127.745**	**$197.126.652**	**$197.125.610**	**$197.124.619**	**$197.123.676**

Fuente: propia a partir de datos entregados por proveedores y Minera Candelaria.

2.3. ANÁLISIS DE LCC MODELO WOODWARD

Los resultados presentados en la presente (tabla 2-7) fueron desarrollados de acuerdo con el procedimiento presentado en el capítulo 2 de este trabajo de titulación, desarrollo Modelo de ACCV de Woodward.

El modelo de Woodward busca considerar los costos asociados a baja confiabilidad propia del activo. Bajo el supuesto de que se cumplirá con los estándares de mantenimiento requerido para el equipo.

Tabla 2-7 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor Groundprobe SSR39XT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Radar Groundprobe SSR39XT			Tiempo de operación anual			8760		
4									
5	Componente	N°	Fallas	Tiempo de detención por falla o mantención (h)	Total Tiempo de parada (h/año)	MTTR	Desv. Est.	MTBF	Desv. Est.
6	Generador	1	12	3,5	42	3,5	31%	727	56%
7	Inspección operativa del sistema	2	3	4,5	13,5	4,5		2916	
8	Frenos	3	2	4	8	4,0		4376	
9	Engrase de patas niveladoras	4	1	2	2	2,0		8758	
10	Balatas Ruerdas	5	2	3	6	3,0		4377	
11	Revisión de trailer	6	1	1,5	1,5	1,5		8759	
12	Rotación radar	7	3	2	6	2,0		2918	
13	Banco de baterias	8	2	4	8	4,0		4376	
14	Sensor de temperatura	9	3	2,5	7,5	2,5		2918	
15	Presión de aceite compresor	10	3	3,5	10,5	3,5		2917	
16	Limpieza sensor estación meteorologica	11	2	3,5	7	3,5		4377	
17	Obtención de datos y medición	12	4	2	8	2,0		2188	
18	**Promedio**		**3,2**	**3,0**	**10,0**	**3,0**		4134	
19	**Total**		38	36	120	3,16		**227,4**	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada, se considera encabezados para mejor referencia.

En la tabla 2-7:

- Columna A corresponde al resumen del programa de mantenimiento anual de los sistemas que el proveedor del equipo indíca se debe realizar para que el activo preste servicios con una disponibilidad superior al 95%, dejando un 5% de error por factores externos que afecten el funcionamiento normal del equipo.
- Columna B corresponde al numero de item, con el cual se realizará la evaluaciónde cada uno de ellos, siendo utilizado este numero para ser identificado en los gráficos Jack Knife de evaluación de sistemas.

- Columna C corresponde a la cantidad de mantenimientos preventivos al año, propuestos por el proveedor del equipo para una disponibilidad del 95%.
- Columna D corresponde al tiempo de detención en horas para cada sistema, por mantenimiento preventivo, indicado por el proveedor para una disponibilidad del 95%.
- Columna E corresponde al tiempo total de detención (h/año) para cada sistema por concepto de mantenimiento preventivo para una disponibilidad del 95%.
- Columna F corresponde al teimpo medio para reparación (MTTR preventivo), calculado de acuerdo con la tabla 3-10.
- Columna G corresponde a la s desviación estandar de MTTR preventivo, el cual se ha calculado con la función =DESVEST.P() de excel dividido por el promedio de los MTTR.
- Columna H corresponde al teimpo medio para reparación (MTBF preventivo), calculado de acuerdo con la tabla 3-10. Tiempo total de servicio anual menos el tiempo total de detención anual por mantenimeinto preventivo, y su resultado dividido por el total de detenciónes o fallas anuales.
- Columna I corresponde a la s desviación estandar de MTBF preventivo, el cual se ha calculado con la función =DESVEST.P() de excel dividido por el promedio de los MTBF.

Tabla 2-8 Auditoria de cálculos Excel radar Groundprobe SSR39XT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Radar Groundprobe SSR39XT			Tiempo de operación anual			=24*365		
4									
5	Componente	N°	Fallas	Tiempo de detención por falla o mantención	Total Tiempo de parada (h/año)	MTTR	Desv. Est.	MTBF	Desv. Est.
6	Generador	1	12	3,5	=D6*C6	=E6/C6	=DESVEST.P(F6:F17)/F18	=(G3-E6)/C6	=DESVEST.P(H6:H17)/H18
7	Inspección operativa del sistema	2	3	4,5	=D7*C7	=E7/C7		=(G3-E7)/C7	
8	Frenos	3	2	4	=D8*C8	=E8/C8		=(G3-E8)/C8	
9	Engrase de patas niveladoras	4	1	2	=D9*C9	=E9/C9		=(G3-E9)/C9	
10	Balatas Ruerdas	5	2	3	=D10*C10	=E10/C10		=(G3-E10)/C10	
11	Revisión de trailer	6	1	1,5	=D11*C11	=E11/C11		=(G3-E11)/C11	
12	Rotación radar	7	3	2	=D12*C12	=E12/C12		=(G3-E12)/C12	
13	Banco de baterias	8	2	4	=D13*C13	=E13/C13		=(G3-E13)/C13	
14	Sensor de temperatura	9	3	2,5	=D14*C14	=E14/C14		=(G3-E14)/C14	
15	Presión de aceite compresor	10	3	3,5	=D15*C15	=E15/C15		=(G3-E15)/C15	
16	Limpieza sensor estación meteorologica	11	2	3,5	=D16*C16	=E16/C16		=(G3-E16)/C16	
17	Obtención de datos y medición	12	4	2	=D17*C17	=E17/C17		=(G3-E17)/C17	
18	Promedio		=PROMEDIO(C6:C17)	=PROMEDIO(D6:D17)	=PROMEDIO(E6:E17)	=PROMEDIO(F6:F17)		=PROMEDIO(H6:H17)	
19	Total		=SUMA(C6:C17)	=SUMA(D6:D17)	=SUMA(E6:E17)	=E19/C19		=(G3-E19)/C19	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada, se considera encabezados para mejor referencia.

Para facilitar el entendimiento del desarrollo de los cálculos realizados, es que en la tabla 2-8 se presenta la auditoría de formulas de excel, con sus respectivos indicadores de filas y columnas. Utilizando esta herramienta, es posible realizar el seguimiento del desarrollo en una nueva tabla.

Tabla 2-9 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor radar IBIS MSR135

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Radar IBIS MSR 135			Tiempo de operación anual			8760		
4									
5	Componente	N°	Fallas	Tiempo de detención por falla o mantención (h)	Total Tiempo de parada (h/año)	MTTR	Desv. Est.	MTBF	Desv. Est.
6	Generador	1	12	4,5	54	4,5	39%	726	57%
7	ATP	2	2	3,5	7	3,5		4377	
8	Set to work	3	6	3	18	3,0		1457	
9	Inspección operativa del sistema	4	4	2	8	2,0		2188	
10	Sistema de frenos	5	2	4,5	9	4,5		4376	
11	Patas niveladoras	6	1	1	1	1,0		8759	
12	Balatas Ruerdas	7	2	2,5	5	2,5		4378	
13	Revisión de trailer	8	1	1,5	1,5	1,5		8759	
14	Rotación radar	9	2	3	6	3,0		4377	
15	Banco de baterías	10	3	4	12	4,0		2916	
16	Sensor de temperatura	11	2	2	4	2,0		4378	
17	Presión de aceite compresor	12	2	4	8	4,0		4376	
18	Limpieza sensor estación meteorológica	13	2	1,5	3	1,5		4379	
19	Obtención de datos y medición	14	6	2,5	15	2,5		1458	
20	**Promedio**		**3,4**	**2,8**	**10,8**	**2,8**		**4064**	
21	**Total**		47	39,5	151,5	3,2		**183,2**	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

Tabla 2-10 Auditoria de cálculos Excel radar IBIS MSR135

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Radar IBIS MSR 135			Tiempo de operación anual			=24*365		
4									
5	Componente	N°	Fallas	Tiempo de detención por falla o mantención (h)	Total Tiempo de parada (h/año)	MTTR	Desv. Est.	MTBF	Desv. Est.
6	Generador	1	12	4,5	=D6*C6	=E6/C6	=DESVEST.P(F6:F19)/F20	=(G3-E6)/C6	=DESVEST.P(H6:H19)/H20
7	ATP	2	2	3,5	=D7*C7	=E7/C7		=(G3-E7)/C7	
8	Set to work	3	6	3	=D8*C8	=E8/C8		=(G3-E8)/C8	
9	Inspección operativa del sistema	4	4	2	=D9*C9	=E9/C9		=(G3-E9)/C9	
10	Sistema de frenos	5	2	4,5	=D10*C10	=E10/C10		=(G3-E10)/C10	
11	Patas niveladoras	6	1	1	=D11*C11	=E11/C11		=(G3-E11)/C11	
12	Balatas Ruerdas	7	2	2,5	=D12*C12	=E12/C12		=(G3-E12)/C12	
13	Revisión de trailer	8	1	1,5	=D13*C13	=E13/C13		=(G3-E13)/C13	
14	Rotación radar	9	2	3	=D14*C14	=E14/C14		=(G3-E14)/C14	
15	Banco de baterías	10	3	4	=D15*C15	=E15/C15		=(G3-E15)/C15	
16	Sensor de temperatura	11	2	2	=D16*C16	=E16/C16		=(G3-E16)/C16	
17	Presión de aceite compresor	12	2	4	=D17*C17	=E17/C17		=(G3-E17)/C17	
18	Limpieza sensor estación meteorológica	13	2	1,5	=D18*C18	=E18/C18		=(G3-E18)/C18	
19	Obtención de datos y medición	14	6	2,5	=D19*C19	=E19/C19		=(G3-E19)/C19	
20	**Promedio**		**=PROMEDIO(C6:C19)**	**=PROMEDIO(D6:D19)**	**=PROMEDIO(E6:E19)**	**=PROMEDIO(F6:F19)**		**=PROMEDIO(H6:H19)**	
21	**Total**		=SUMA(C6:C19)	=SUMA(D6:D19)	=SUMA(E6:E19)	=E21/C21		**=(G3-E21)/C21**	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

Tabla 2-11 resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward Radar Ibis MSR 135 – Radar Groundprobe SSR35XT.

Ítem	Ibis MSR 135	Groundprobe SSR35XT	
Costo de inversión	300.000	350.000	USD
Costo de operación	-	-	USD/anual
Costos de mantenimiento preventivo	84.000	265.008	USD/anual
Costo Mantenimiento Mayor	40.000	55.000	USD/anual
Horas de operación	8.760	8.760	h/anual
Costo penalización	1.300.000	1.300.000	$/falla
MTTR	3,22	3,16	
MTTR Desv. Est. Cristal Ball	0,39	0,31	
MTBF	183	227	
MTBF Desv. Est. Cristal Ball	0,57	0,56	
Disponibilidad Ai	98,3	98,6	%
Indisponibilidad (1-Ai)	1,7	1,4	%
Tasa de descuento	12	12	%
Horizonte de evaluación	10	10	Años
Frecuencia de fallas o intervención	47	38	fallas/año
Costo falla	4.190.426	4.105.263	$/falla
Costos totales por falla anual	197.074.000	156.320.008	$/año
Costos totales proyecto (LCC)	1.113.812.053	883.592.909	$

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

El modelo de Woodward considera variables como MTTR, costo total por falla, tasa de descuento, etc. Se obtiene un valor que deberá ser considerado como complemento a los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, mantenimiento mayor y otros costos que se consideren al momento de evaluar este proyecto.

La disponibilidad requerida por Minera Candelaria es de un mínimo de 95%. Se evidencia que ambos equipos cumplen con ese requisito.

El costo de radar Ibis MSR 135, representa un aumento considerable de los costos totales del proyecto, esto debido a su disponibilidad inferior que su competidor Groundprobe SSR135XT.

La variación del MTTR, al comparar ambos equipos, es mínima, sin embargo, la frecuencia de intervención por mantenimiento anual de cada equipo es la que genera alto impacto en el costo total del proyecto.

Al evaluar los costos mediante este modelo se puede evidenciar el real impacto de un equipo a la organización, y de esta forma aplicar condiciones especiales de administración y operación del contrato.

Para el cálculo de los costos totales por falla anual, adicional a la multiplicación de (costos por falla * frecuencia de falla anual) se deberá adicionar los costos de mantenimiento mayor y costos por operación y mantenimiento preventivo)

El modelo de Woodward ayuda a estimar costos asociados a la confiabilidad del equipo durante su vida útil, por lo cual, se deberá considerar los otros costos propios del proyecto que no resultan de la baja confiabilidad del equipo (Ej.: Costos de inversión, mantenimiento mayor, mantenimiento preventivo).

2.3.1. Recomendaciones

El modelo de Woodward es un buen estimador de costos para realizar un análisis apresurado y no recomendable para grandes inversiones o equipos que presentan alta criticidad para la operación del proyecto. Esto debido a los valores que se utilizan en este método son constante durante todo el horizonte del proyecto. Esto entrega valores errados e imprecisos. Se recomienda utilizar solo como evaluación preliminar.

A los costos totales obtenidos del estudio del proyecto se deberá adicionar el costo de inversión, operación, retiro del activo, etc.

Carlos Parra en su artículo de investigación de análisis del costo de ciclo de vida, indica que se deberá considerar los costos de mantenimiento correctivo como resultado deficiencia en mantenimiento preventivo. Estos costos pueden ser mano de obra, materiales y repuestos. En el caso presentado en este trabajo de titulación, no se considera este costo, ya que no se cuenta con estadísticas que den cuenta de fallas funcionales.

Realizar estimación de costos con otra herramienta de apoyo (Ej.: Software Cristal Ball), con el objetivo de realizar simulaciones y contar con previsiones, para la toma de mejores decisiones.

Se recomienda realizar un análisis de flujo de costos, presentado en este documento (Tabla 2-6).

Requerir dentro del contrato de servicios de mantenimiento, aplicar actividades de mantenimiento preventivo (RCM).

Considerar tareas programadas en base a condición, tareas de reacondicionamiento, tareas de sustitución-reemplazo programado, tareas de búsqueda de fallos ocultos. (Crespo.Y.Parra, 2015)

Los datos obtenidos del desempeño y mantenimiento, y oportunidades de mejoras del activo, se recomienda sean realizadas por la compañía Minera Candelaria como como un servicio a cargo de especialistas internos. Ya que estas tareas se consideran de carácter estratégicos.

Esto se encuadra en el proceso de mejora continua de la ingeniería de confiabilidad. Incluyendo el foco en la eficiencia y el foco en la eficacia. Iniciando con el proceso de planificación (generando ordenes de trabajo), proceso de programación, proceso de asignación de trabajos, ejecución de los trabajos, proceso de análisis (identificando componentes críticos), proceso de mejora.

CAPÍTULO 3: SENSIBILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

3. SENSIBILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

Con el objeto de realizar una evaluación de los distintos escenarios posibles durante el desarrollo del proceso de obtención de información para la toma de decisión final de inversión. En este capítulo realizaremos la sensibilización de las variables que afectan el flujo de los costos. Para esto realizaremos la modificación de variables claves como: MTTR, MTBF, IPC.

Las simulaciones realizadas en Cristal Ball ayudarán a complementar los datos obtenidos, y mediante la simulación obtener resultados probables (graficados), utilizando distribución normal. Aportando a la toma de decisiones, conociendo distintos escenarios probables.

3.1. SENSIBILIZACIÓN FLUJO DE LOS COSTOS

Para la sensibilización de los flujos de costos se utilizará la tabla Excel, realizando modificaciones en los costos asociados al mantenimiento preventivo, mantenimiento mayor, costos por confiabilidad, aplicando la variación del IPC.

El cálculo de la variación del IPC anual se realizó con datos obtenidos de los registros del banco central de chile. Lo cual arrojó una variación interanual promedio del 2%. desde enero de 2011 a diciembre de 2021.

Los costos asociados al mantenimiento correctivo no se han incluido, debido a que no se cuenta con los registros estadísticos de fallas. Esto producto del tipo de activo, los cuales cuentan con constante perfeccionamiento de modelos. Por lo cual, se ha de considerar dentro de las recomendaciones el mantener el control estadístico y mediante el modelo de Weibull proyectar la confiabilidad del equipo.

Tabla 3-1 Flujo de los costos Groundprobe SSR35XT del proyecto con sensibilización de IPC.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tasa	12%
Inversión inicial	$ -350.000											VAC	$ 1.247.763.516
Valor residual		$ 322.000	$ 294.000	$ 266.000	$ 238.000	$ 210.000	$ 182.000	$ 154.000	$ 126.000	$ 98.000	$ 70.000	CAE	$220.772.439
VA VR		$ 287.500	$ 234.375	$ 189.334	$ 151.253	$ 119.160	$ 92.207	$ 69.662	$ 50.889	$ 35.340	$ 22.538		
VA Inversión		$ -62.500	$ -115.625	$ -160.666	$ -198.747	$ -230.840	$ -257.793	$ -280.338	$ -299.111	$ -314.660	$ -327.462		
CAE Inversión		**$70.000,00**	**$68.415,09**	**$66.893,31**	**$65.434,26**	**$64.037,36**	**$62.701,92**	**$61.427,08**	**$60.211,84**	**$59.055,08**	**$57.955,57**		
Costo operación		**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**		
Servicio de mantenimiento		$ 265.008	$ 270.308	$ 275.714	$ 281.229	$ 286.853	$ 292.590	$ 298.442	$ 304.411	$ 310.499	$ 316.709		
Costo mantenimiento		**$ 265.008**	**$ 270.308**	**$ 275.714**	**$ 281.229**	**$ 286.853**	**$ 292.590**	**$ 298.442**	**$ 304.411**	**$ 310.499**	**$ 316.709**		
Costo confiabilidad		$ 205.010.000	$ 209.110.200	$ 213.292.404	$ 217.558.252	$ 221.909.417	$ 226.347.605	$ 230.874.558	$ 235.492.049	$ 240.201.890	$ 245.005.927		
Costo mantenimiento Mayor		$ 55.000	$ 56.100	$ 57.222	$ 58.366	$ 59.534	$ 60.724	$ 61.939	$ 63.178	$ 64.441	$ 65.730		
Costo O&M		**$ 205.330.008**	**$ 209.436.608**	**$ 213.625.340**	**$ 217.897.847**	**$ 222.255.804**	**$ 226.700.920**	**$ 231.234.939**	**$ 235.859.637**	**$ 240.576.830**	**$ 245.388.367**		
Actualización de O&M		**$183.330.364**	**$350.291.946**	**$502.346.244**	**$640.824.265**	**$766.938.177**	**$881.791.918**	**$986.390.861**	**$1.081.650.613**	**$1.168.405.030**	**$1.247.413.516**		
CAE O&M		**$205.330.008**	**$207.267.084**	**$209.151.346**	**$210.981.416**	**$212.756.114**	**$214.474.473**	**$216.135.732**	**$217.739.342**	**$219.284.958**	**$220.772.439**		
Costo Total		**$205.400.008**	**$207.335.499**	**$209.218.240**	**$211.046.850**	**$212.820.151**	**$214.537.175**	**$216.197.159**	**$217.799.554**	**$219.344.013**	**$220.830.394**		

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

Tabla 3-2 Flujo de los costos Ibis MSR 135 del proyecto con sensibilización de IPC.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tasa	12%
Inversión inicial	$ -300.000											VAC	$ 1.568.749.445
Valor residual		$ 276.000	$ 252.000	$ 228.000	$ 204.000	$ 180.000	$ 156.000	$ 132.000	$ 108.000	$ 84.000	$ 60.000	CAE	$277.590.714
VA VR		$ 246.429	$ 200.893	$ 162.286	$ 129.646	$ 102.137	$ 79.034	$ 59.710	$ 43.619	$ 30.291	$ 19.318		
VA Inversión		$ -53.571	$ -99.107	$ -137.714	$ -170.354	$ -197.863	$ -220.966	$ -240.290	$ -256.381	$ -269.709	$ -280.682		
CAE Inversión		**$60.000,00**	**$58.641,51**	**$57.337,13**	**$56.086,51**	**$54.889,17**	**$53.744,50**	**$52.651,78**	**$51.610,15**	**$50.618,64**	**$49.676,20**		
Costo operación		**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**	**$ -**		
Servicio de mantenimiento		$ 84.000	$ 85.680	$ 87.394	$ 89.141	$ 90.924	$ 92.743	$ 94.598	$ 96.490	$ 98.419	$ 100.388		
Costo mantenimiento		**$ 84.000**	**$ 85.680**	**$ 87.394**	**$ 89.141**	**$ 90.924**	**$ 92.743**	**$ 94.598**	**$ 96.490**	**$ 98.419**	**$ 100.388**		
Costo confiabilidad		$ 258.050.000	$ 263.211.000	$ 268.475.220	$ 273.844.724	$ 279.321.619	$ 284.908.051	$ 290.606.212	$ 296.418.337	$ 302.346.703	$ 308.393.637		
Costo mantenimiento Mayor		$ 40.000	$ 40.800	$ 41.616	$ 42.448	$ 43.297	$ 44.163	$ 45.046	$ 45.947	$ 46.866	$ 47.804		
Costo O&M		**$ 258.174.000**	**$ 263.337.480**	**$ 268.604.230**	**$ 273.976.314**	**$ 279.455.840**	**$ 285.044.957**	**$ 290.745.856**	**$ 296.560.774**	**$ 302.491.989**	**$ 308.541.829**		
Actualización de O&M		**$230.512.500**	**$440.443.527**	**$631.630.712**	**$805.747.613**	**$964.318.361**	**$1.108.731.008**	**$1.240.249.668**	**$1.360.025.590**	**$1.469.107.234**	**$1.568.449.445**		
CAE O&M		**$258.174.000**	**$260.609.604**	**$262.978.803**	**$265.279.861**	**$267.511.298**	**$269.671.896**	**$271.760.699**	**$273.777.016**	**$275.720.413**	**$277.590.714**		
Costo Total		**$258.234.000**	**$260.668.245**	**$263.036.140**	**$265.335.948**	**$267.566.187**	**$269.725.640**	**$271.813.351**	**$273.828.626**	**$275.771.032**	**$277.640.390**		

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

3.2. SENSIBILIZACIÓN MÉTODO WOODWARD

Modificando el programa original entregado por proveedor, adicionando solo 1 hora de retraso por cada intervención realizada por mantenimiento programado, el MTTR y MTBF se ven afectados y modifican a su vez el cálculo de costo total de ciclo de vida. La sensibilización de este método busca conocer los impactos que genera una deficiencia en el cumplimiento del programa de mantenimiento.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el capítulo dos para realizar los cálculos. Obtendremos resultados producto de haber modificado solo una hora de retraso por intervención.

Lo veremos en el siguiente ejercicio:

Tabla 3-3 Valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor radar IBIS MSR135, con sensibilización en tiempo de detención

Componente	N°	Fallas o mantenimientos	Tiempo de detención por falla o mantención (h)	Total Tiempo de parada (h/año)	TTR	Desv. Est.	TBF Preventivo	Desv. Est.
Generador	1	12	5,5	66	5,5	29%	725	57%
ATP	2	2	4,5	9	4,5		4376	
Set to work	3	6	4	24	4,0		1456	
Inspección operativa del sistema	4	4	3	12	3,0		2187	
Sistema de frenos	5	2	5,5	11	5,5		4375	
Patas niveladoras	6	1	2	2	2,0		8758	
Balatas Ruerdas	7	2	3,5	7	3,5		4377	
Revisión de trailer	8	1	2,5	2,5	2,5		8758	
Rotación radar	9	2	4	8	4,0		4376	
Banco de baterías	10	3	5	15	5,0		2915	
Sensor de temperatura	11	2	3	6	3,0		4377	
Presión de aceite compresor	12	2	5	10	5,0		4375	
Limpieza sensor estación meteorológica	13	2	2,5	5	2,5		4378	
Obtención de datos y medición	14	6	3,5	21	3,5		1457	
Promedio		**3,4**	**3,8**	**14,2**	**3,8**		**4063**	
Total		47	53,5	198,5	4,22		**182,2**	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

El total de horas de detención por fallas o mantención para el radar IBIS aumentó de 151 horas a 198 horas. Lo cual generó un aumento del MTTR a 4,22 horas.

Tabla 3-4 valores y cálculos realizados con datos aportados por proveedor Groundprobe SSR39XT, con sensibilización de tiempo de detención

Componente	N°	Fallas o mantenimientos	Tiempo de detención por falla o mantención (h)	Total Tiempo de parada (h/año)	MTTR	Desv. Est.	MTBF Preventivo	Desv. Est.
Generador	1	12	4,5	54	4,5	23%	726	56%
Inspección operativa del sistema	2	3	5,4	16,2	5,4		2915	
Frenos	3	2	5	10	5,0		4375	
Engrase de patas niveladoras	4	1	3	3	3,0		8757	
Balatas Ruerdas	5	2	4	8	4,0		4376	
Revisión de trailer	6	1	2,5	2,5	2,5		8758	
Rotación radar	7	3	3	9	3,0		2917	
Banco de baterias	8	2	5	10	5,0		4375	
Sensor de temperatura	9	3	3,5	10,5	3,5		2917	
Presión de aceite compresor	10	3	4,5	13,5	4,5		2916	
Limpieza sensor estación meteorologica	11	2	4,5	9	4,5		4376	
Obtención de datos y medición	12	4	3	12	3,0		2187	
Promedio		**3,2**	**4,0**	**13,1**	**4,0**		4133	
Total		38	47,9	157,7	4,15		**226,4**	

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

El total de horas de detención por fallas o mantención aumentó de 120 horas a 157 horas. Lo cual generó una variación del MTTR de 3,16 horas a 4,15 horas y el MTBF de 227,4 a 226,4 horas.

Tabla 3-5 Resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward Radar Ibis MSR 135– Radar Groundprobe SSR35XT, sensibilización.

Ítem	Ibis MSR 135	Groundprobe SSR35XT	
Costo de inversión	300.000	350.000	USD
Costo de operación	-	-	USD/anual
Costos de mantenimiento preventivo	84.000	265.008	USD/anual
Costo Mantenimiento Mayor	40.000	55.000	USD/anual
Horas de operación	8.760	8.760	h/anual
Costo penalización	1.300.000	1.300.000	$/falla
MTTR	4,22	4,15	
MTTR Desv. Est. Cristal Ball	0,29	0,23	
MTBF	182,2	226,4	
MTBF Desv. Est. Cristal Ball	0,57	0,56	
Disponibilidad Ai	97,73	98,2	%
Indisponibilidad (1-Ai)	2,27	1,8	%
Tasa de descuento	12	12	%
Horizonte de evaluación	10	10	Años
Frecuencia de fallas	47	38	fallas/año
Costo falla	5.490.426	5.395.000	$/falla
Costos totales por falla anual	258.174.000	205.330.008	$/año
Costos totales proyecto (LCC)	1.459.040.680	1.160.510.340	$

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

La tabla 3-6 corresponde a la fila de los resultados obtenidos en la primera evaluación de costos totales de proyecto (Tabla 3-6 resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward Radar Ibis MSR 135– Radar Groundprobe SSR35XT), y permite comparar los resultados obtenidos en la segunda evaluación con sensibilidad generada con el aumento de una hora en mantenimiento preventivo (Tabla 3-7 Resumen de resultados costo ciclo de vida, Modelo Woodward Radar Ibis MSR 135– Radar Groundprobe SSR35XT, sensibilización).

Tabla 3-8 Total costos sin sensibilización.

Costos totales proyecto (LCC)	1.113.812.053	883.592.909	$

Fuente: Elaboración propia en base a investigación realizada

Existe un aumento de $345.228.627.- USD en el caso de IBIS MSR135 y de $276.917.431.- USD para Groundprobe SSR35XT.

3.3. SENSIBILIZACIÓN UTILIZANDO CRISTAL BALL

Las simulaciones fueron realizadas utilizando las tablas de datos contenidos en la tabla (Tabla 2-5 y 2-6). De las cuales, se realizaron 4 en total. Las iteraciones fueron de 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 por cada equipo, con esto identificaremos la variación en los resultados de acuerdo con la cantidad de iteraciones realizadas.

Notaremos que se genera diferencia entre la primera (10.000) simulación y las siguientes, estabilizándose en las 100.000 iteraciones (Gráfico 3-1).

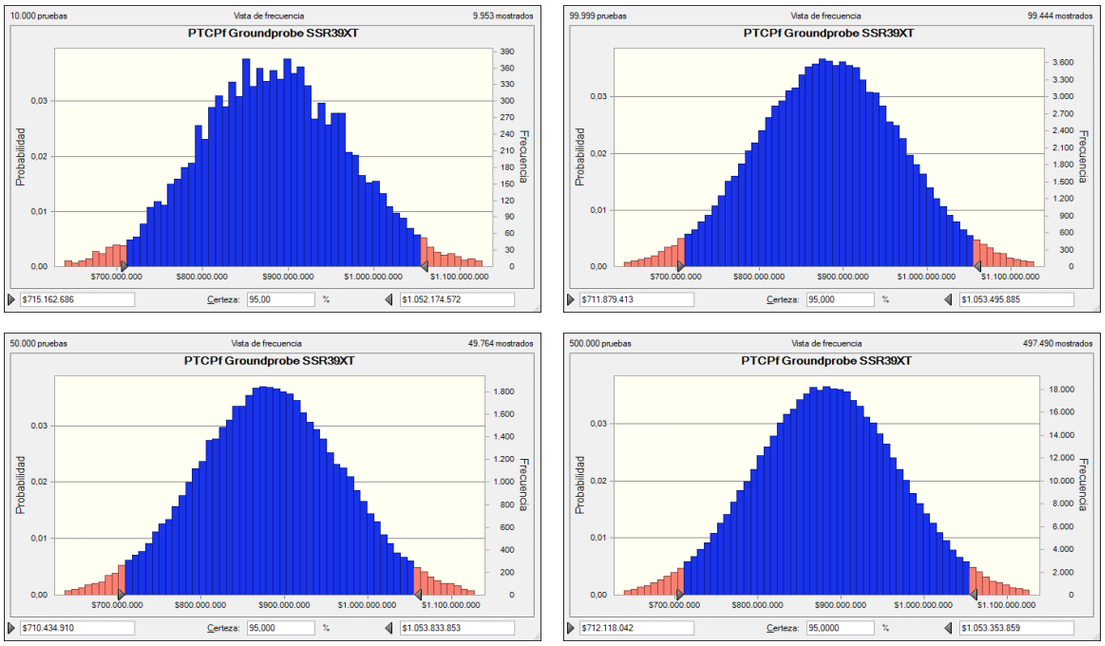
Las superposiciones utilizadas son el MTTR y MTBF, considerando que de estas variables dependerá el aumento o disminución de los costos por baja confiabilidad.

Al igual que en el modelo de Woodward es utilizado el MTTR para determinar los costos por fallo.

$$C_f = \sum_{f=1}^{F} MTTR_f \times Cpe_f$$

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos (Crespo y Parra 2015)

Ecuación 3-1 Costo total por fallo al año.



Fuente: Radar Groundprobe SSR30XT

Gráfico 3-1 Simulaciones Cristal Ball 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 pruebas

Las simulaciones se realizaron con cuatro cantidades distintas de pruebas, con el objetivo de identificar las variaciones en los resultados en la medida que se solicita mayor cantidad de iteraciones. Demostrándose que en las 100.000 pruebas la variación en los resultados finales se mantiene estables. Esto indica que, al realizar 100.000 iteraciones, podemos lograr resultados con un margen de error menor dentro de las mismas probabilidades que entrega Cristal Ball. (Gráfico 3-1). Esta tabla se utiliza para evidenciar la distribución durante la simulación, esto sucede igualmente con los datos de simulación radar IBIS. La distribución normal se genera básicamente por los

Los gráficos de simulaciones (Gráfico 3-3) (Gráfico 3-4), se demuestra con mayor claridad los rangos que nos entrega Cristal Ball. Sin embargo, con una certeza del 50%, nos encontramos con probabilidades superiores al 0,03, que independiente a lo bajo de las probabilidades, nos ayudará a realizar estimaciones y tomar una decisión más acertada a la hora de invertir. Estas previsiones se realizaron tomando como referencia los lineamientos entregados por el modelo de Woodward, el cual realiza su estimación de costos de acuerdo con la tasa de interés y periodo de proyección.

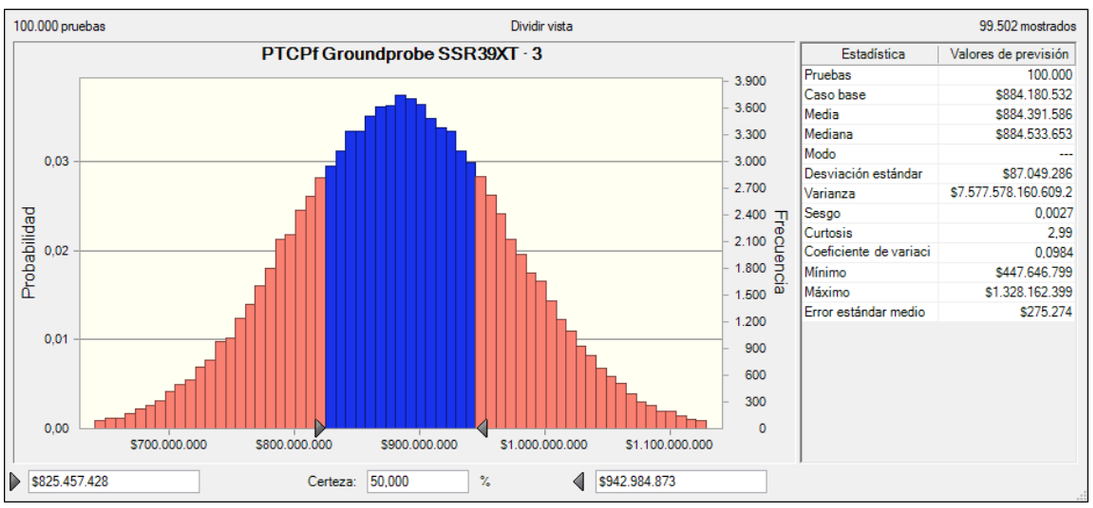
La distribución normal obtenida en los gráficos se debe a como se distribuyeron los costos en el flujo de los costos. Los costos en el segundo periodo son los mismos que los costos del último periodo.

Utilizamos variables de superposición el MTTR y MTBF que modifican aleatoriamente la disponibilidad, que a su vez modifica la destrucción del negocio. En la tabla flujo de los costos se ha fijado este resultado como el costo del primer año de operación, reflejado en el segundo periodo.

3.3.1. Simulaciones Radar Groundprobe SSR39XT

El flujo de los costos desarrollado en el segundo capítulo 2.2., sensibilización flujo de los costos, es utilizada para realizar este ejercicio de previsiones. Donde los costos son constantes durante el periodo de evaluación de proyecto. Es necesario considerar esto como una debilidad al momento de estimar los costos de mantenimiento, ya que los costos de confiabilidad son calculados como valores constantes en el flujo, y esto es incorrecto, ya que la tasa de falla podrá variar durante el desarrollo del proyecto.

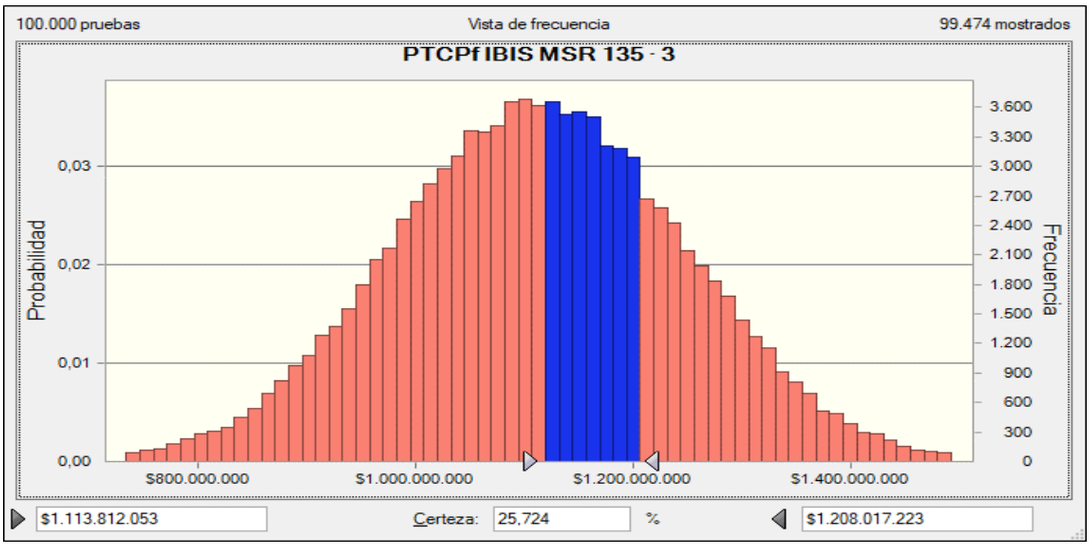
La distribución normal del grafico corresponde a la constante sin variación de los costos considerados



Estadística	Valores de previsión
Pruebas	100.000
Caso base	$884.180.532
Media	$884.391.586
Mediana	$884.533.653
Modo	---
Desviación estándar	$87.049.286
Varianza	$7.577.578.160.609.2
Sesgo	0,0027
Curtosis	2,99
Coeficiente de variaci	0,0984
Mínimo	$447.646.799
Máximo	$1.328.162.399
Error estándar medio	$275.274

Fuente: Propia, desarrollo software Cristal Ball - Radar Groundprobe SSR30XT

Gráfico 3-2 Simulación Cristal Ball, radar Groundprobe SSR39XT.



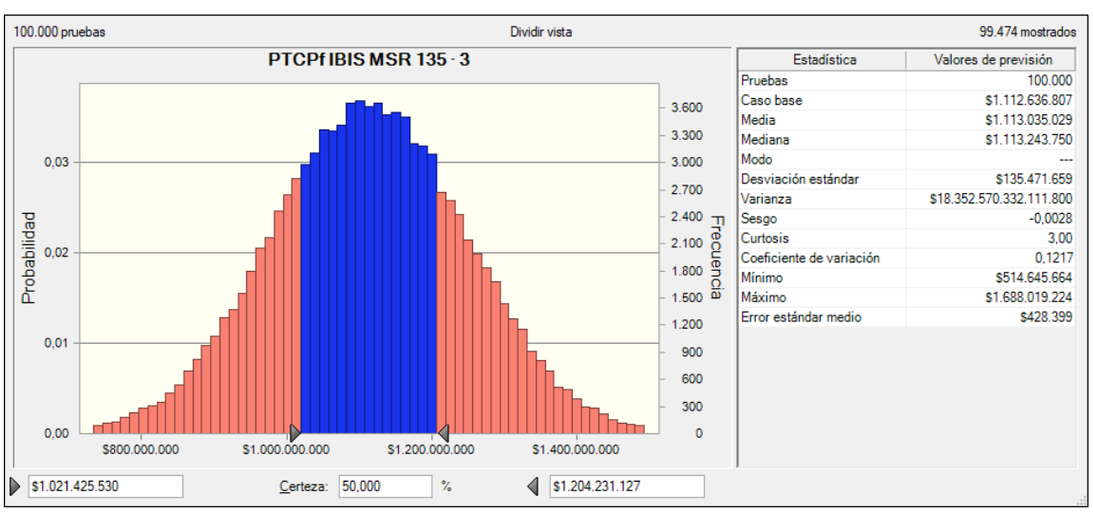
Fuente: Radar Groundprobe SSR30XT

Gráfico 3-3 Simulación Cristal Ball radar Groundprobe SSR30XT.

Fijamos el costo mínimo obtenido en el flujo de los costos (Tabla 2-5, 2-6) $1.113.812.053.-, y como máximo podemos fijar el un porcentaje de probabilidad que se encuentre dentro de nuestro requerimiento 0,02, lo cual nos arroja un 25,72 % de certeza de que el costo del de proyecto será superior a lo que nos indican los modelos estudiados y con un máximo estimado a criterio del evaluador.

3.3.2. Simulaciones Radar IBIS MSR 135

Mismo caso para la simulación de los costos del radar Groundprobe.

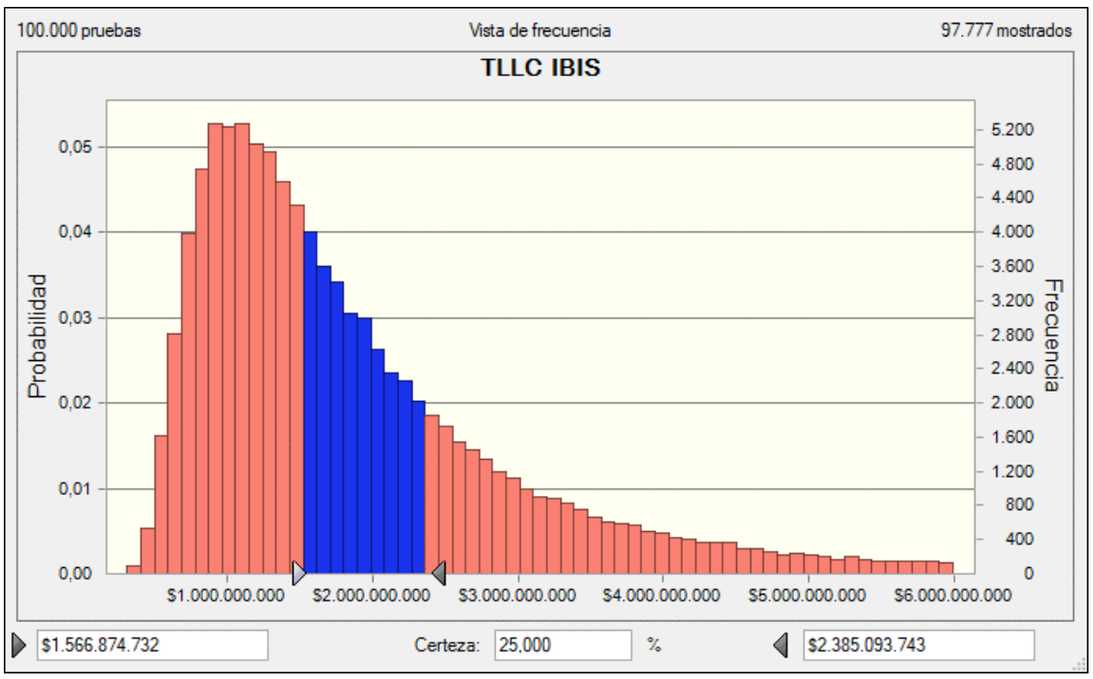


Fuente: Resultado de simulación de costos Radar IBIS MSR 135.

Gráfico 3-4 Simulación Cristal Ball costos IBIS MSR 135.

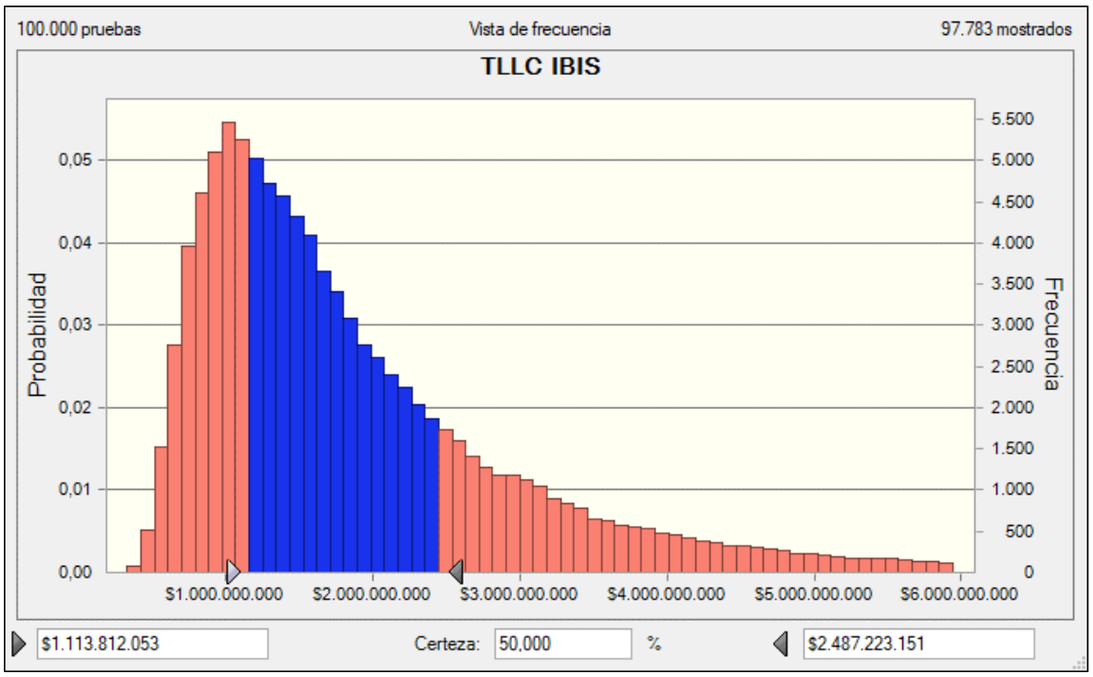
3.3.2.1. Variable IPC

Se realizó las simulaciones utilizando las tablas de flujo de costos tabla 3.1. y tabla 3.2., las cuales se encuentran con los costos sensibilizados utilizando el IPC como variable modificadora de los costos durante el proyecto. En los siguientes gráficos se genera un sesgo a la derecha, como resultado de esta variación.



Fuente: Resultado de simulación de costos Radar Groundprobe SSR30XT

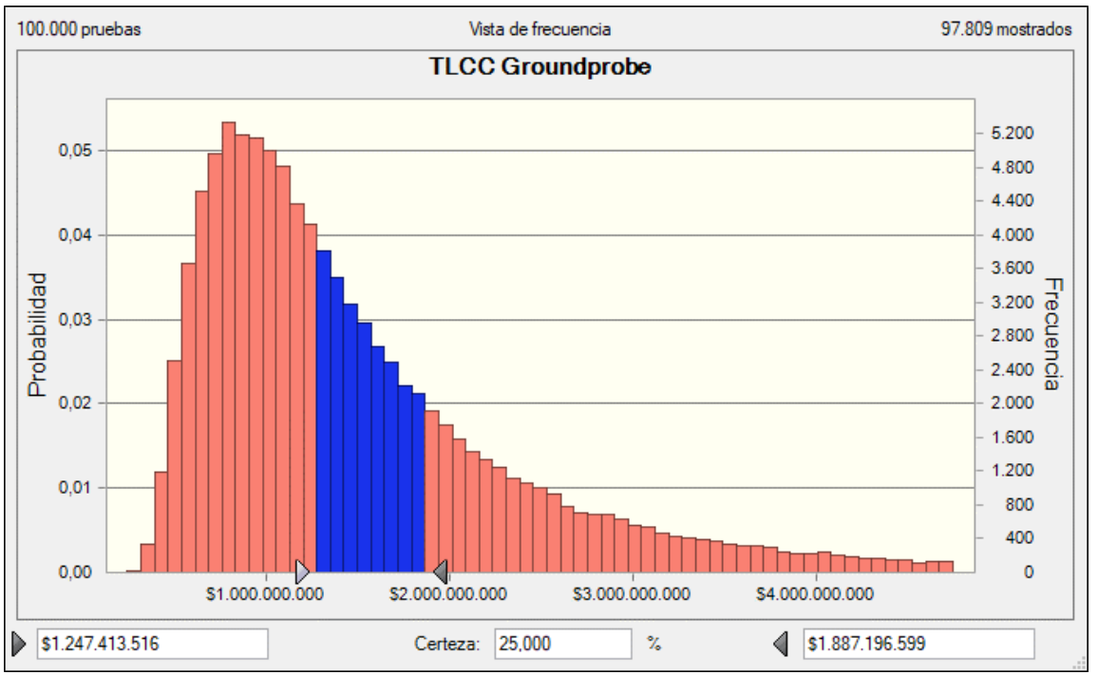
Gráfico 3-5 Simulación Cristal Ball, con simulación de variables MTTR, MTBF, IPC



Fuente: Resultado de simulación de costos Radar Groundprobe SSR30XT

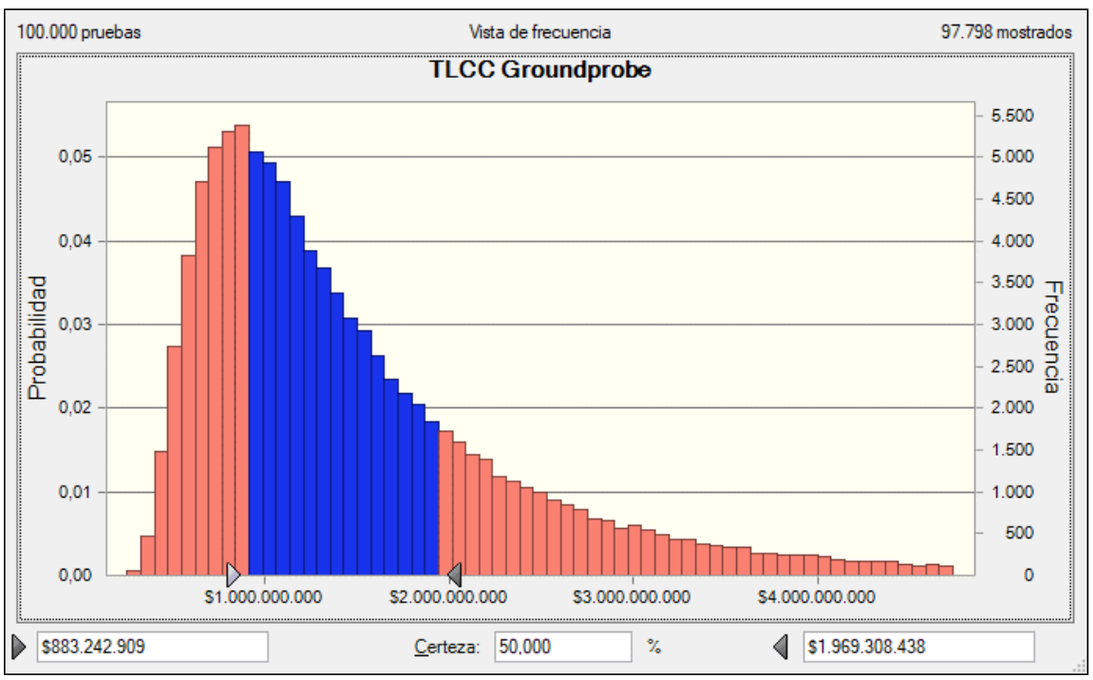
Gráfico 3-6 Simulación Cristal Ball, con simulación de variable IPC

Los gráficos obtenidos luego de sensibilizar los costos, nos podemos dar cuenta de su sesgo a la derecha, como resultado de aplicar variaciones de los costos, en crecimiento propio de la aplicación promedio interanual del IPC. En el caso de los gráficos 3-6, 3-8 se consideró sensibilizar los costos realizando la variación de IPC solamente, a diferencia de los gráficos obtenidos de sensibilizar utilizando las variables de MTTR y MTBF, gráficos 3-5, 3-7.



Fuente: Resultado de simulación de costos Radar Groundprobe SSR30XT

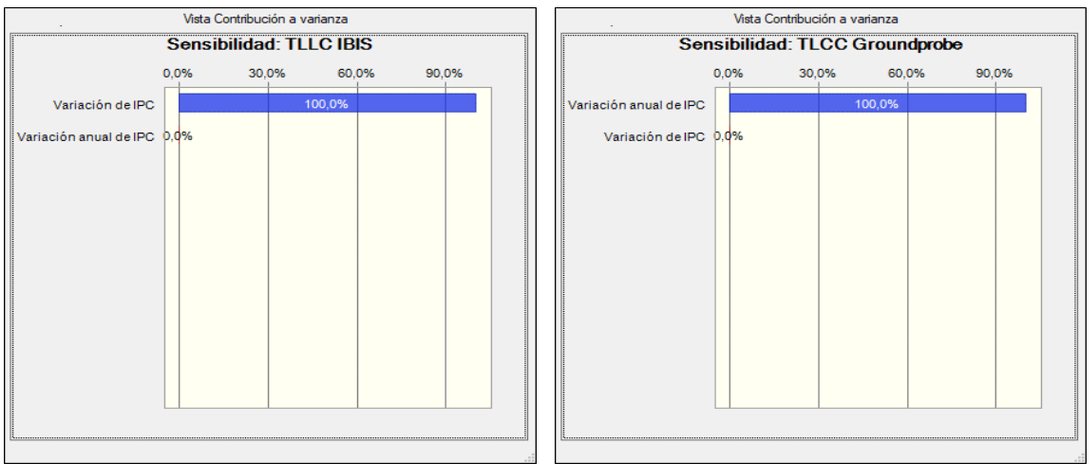
Gráfico 3-7 Simulación Cristal Ball, con simulación con crecimiento de costos.



Fuente: Resultado de simulación de costos Radar Groundprobe SSR30XT

Gráfico 3-8 Simulación Cristal Ball, con variación de costos considerando solo el IPC

Al realizar las simulaciones con Cristal Ball, hemos fijado el costo mínimo calculado sin sensibilización. Lo cual nos permite acotar el rango de certeza. En este caso lo hemos ajustado en un 50%. Podemos notar que en la medida que aumentan los costos la probabilidad de que esta se concrete es menor. Por lo cual, nos permitirá considerar los costos más altos alcanzado según la simulación. Todo esto a ser considerado por quien evalúe el ciclo de vida.



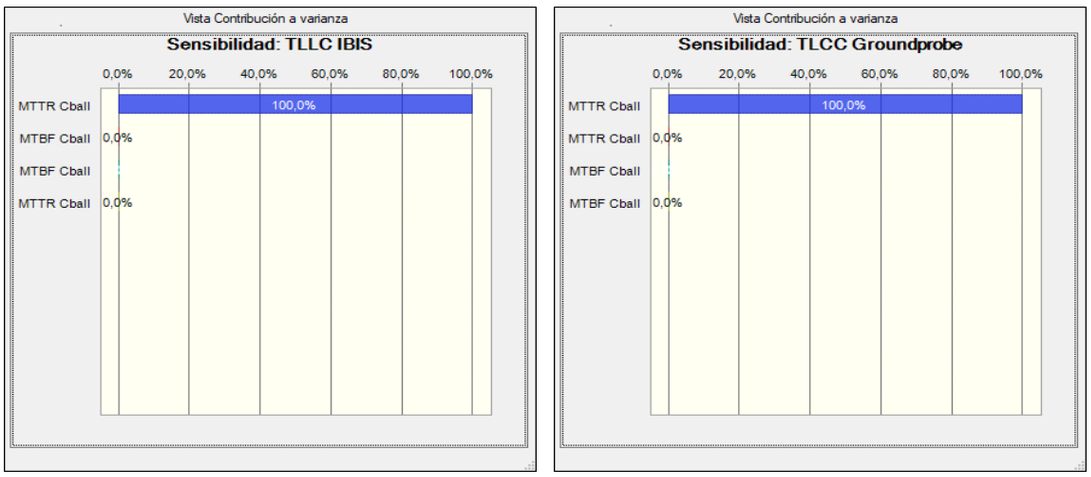
Fuente: Propia, resultado de simulación de costos, sensibilidad.

Gráfico 3-9 Sensibilidad IBIS y Groundprobe. IPC

Los gráficos de sensibilidad de Cristal Ball, nos muestra las variables que actúan directamente y con su porcentaje de participación en las simulaciones. En el gráfico 3-9, nos indica claramente que principal variable participante de la simulación es el IPC. El cual actúa en un 100%.

Al realizar simulaciones con la participación de más de una variable, como el caso de IPC, MTTR, MTBF.

Cristal Ball nos indica que el MTTR es la principal variable participante de la variación de los costos. Siempre predomina el MTTR.



Fuente: Propia, resultado de simulación de costos, sensibilidad

Gráfico 3-10 Sensibilidad IBIS y Groundprobe. MTTR – MTBF.

Las simulaciones realizadas nos acercan a los resultados obtenidos en el flujo de los costos (tabla 3-8, tabla 3-9). Por lo cual, esta herramienta (Cristal Ball) podría apoyar a la toma de decisión o evidenciar falta de información en caso de realizar otro tipo de evaluación de costos.

Se recomienda definir superposiciones, adicionales en Cristal Ball, como: IPC, variación del dólar. Todo dependiendo de la metodología utilizada al evaluar el proyecto.

El gráfico 3-10 de sensibilidad en el cual se utilizó como superposición a el MTBF y MTTR, nos entrega como resultado que la variable que genera las variaciones en las previsiones es el MTTR.

El informe completo de la simulación Cristal Ball entrega el resultado de ambas simulaciones en conjunto.

Con un 50% de certeza, nos encontramos con rangos cercanos al costo global de ciclo de vida calculado en el flujo de los costos, esto indica que incluso con los datos obtenidos utilizando el método de Woodward, con la incerteza que resulta de su desarrollo. (Tabla 3-5).

Al utilizar los rangos mínimo-calculados en el flujo de los costos, y utilizando modelo WoodWard, en el gráfico obtenido de las simulaciones, podemos lograr una estimación de los sobre costos, con una certeza que aportará a la toma de decisión final (Gráfico 3-3). En las tablas 2.5 y tabla 2.6 se fijaron los costos mínimos con los que se evaluará la mejor opción, considerando la totalidad de los costos bases sin sensibilización, y todas las simulaciones realizadas en Cristal Ball fueron fijadas en ese mismo valor, considerando para la evaluación, las previsiones desde ese punto en adelante.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo de los temas propuestos en este trabajo de titulación, puedo entregar las siguientes conclusiones:

La preparación de un proyecto y posterior evaluación desde el punto de vista económico y financiero es una actividad imprescindible, que permitirá a los inversionistas tomar la mejor decisión. Es de gran importancia que esa información sea lo más precisa posible. Sucede que la información existe, el know how genera el cambio, por eso la importancia de contar con personal especialista en el área de mantenimiento y preparación y evaluación de proyectos para que, en conjunto a los especialistas de cada área, desarrollen el correcto y completo flujo de los costos.

La incorrecta elección del activo podrá significar la necesidad de reemplazarlo anticipadamente por no cumplir con los requerimientos técnicos, y que en el futuro afectarán la disponibilidad que la organización exige, con todos los costos que eso implica. Por lo cual, analizar los costos de inversión y costos asociados a la operación y mantenimiento, incluyendo por baja confiabilidad y mantenimiento mayor, minimizará el riesgo e incertidumbre.

El análisis de criticidad de los activos que intervienen directamente en la producción permitirá tomar medidas adicionales necesarias para asegurar que el activo físico es el que cumple con las necesidades operativas de la organización, ya que ese grado de criticidad obtenido lo posicionará en una escala previamente establecida por la organización, accediendo a recursos que permitan administrar eficientemente el ingreso, participación en el proceso productivo y finalmente su retiro.

El modelo de Woodward nos entrega una opción rápida para realizar una estimación de los costos del ciclo de vida de un activo, incorporando los costos de baja confiabilidad de equipo. Sin embargo, de necesitar una estimación con menor margen de error, no se recomienda este método ya que sus cálculos se realizan con costos constantes como resultado de una tasa de falla constante, lo cual en la realidad no ocurre. Si bien los costos se llevan a valor presente, no se pueden estimar posibles variaciones producto de baja confiabilidad propia de la vida útil de todo activo mantenible, en un periodo dado.

Realizando un flujo de los costos durante todo el horizonte del proyecto permitirá conocer el desarrollo de los costos en cualquier punto del proyecto, pudiendo evaluar estimando variables operacionales y mantenimiento, costo del posible activo de reemplazo, variación de monedas duras como el dólar, IPC, etc.

Las simulaciones utilizando Cristal Ball nos permite tener previsiones de costos mantenimiento por baja confiabilidad del activo, variación de IPC, MTTR, y cualquier otra variable que afecte los costos. Los gráficos de sensibilidad entrega certeza de la

superposición que participa directamente en los resultados, pudiendo enfocar los esfuerzos de control.

Un modelo de mantenimiento de alta disponibilidad, si bien es un modelo al exigente, en el contexto de este contrato, se justifica mantener una alta disponibilidad del activo. Aplicando mantenimiento predictivo y desestimar el mantenimiento correctivo. La evaluación de los costos de este activo, pueden parecer exagerados, sin embargo, sitúan al evaluador en un escenario real. Esta realidad exige a la organización de hacer todos los esfuerzos en incorporar el mantenimiento de los activos con este nivel de criticidad, a la operación, y trabajar en perfecta coordinación y sincronía para que los costos asicados a la confiabilidad puedan disminuir a cero. Pudiendo programar de las tareas de mantenimiento en conjunto con el departamento de planificación a corto plazo, de manera que el mantenimiento no interfiera en las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

4to. Congreso Peruano-Ingeniería de Mantenimiento El Sistema PMO: Optimización Real del Mantenimiento Preventivo Nursing standard: official newspaper of the Royal College of Nursing.

Aproximación al reemplazo de equipo industrial, Publisher: Universidad Tecnológica de Pereira, Section: Scientia et Technica, https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4842791

BANCOMUNDIAL. [en línea] https://datos.bancomundial.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG?locations=CL [Consulta: marzo 2022]

CHARLES T. HORNGREN Contabilidad de costos. Un enfoque gerencial, Decimocuarta edición, PEARSON EDUCACIÓN, México, 2012

Contabilidad-de - costos - RALPH - POLIMENI - FABOZZI - ADELBERG - Y - KOLE, tercera edición, 1997.

DATOSMACRO. [en línea] https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/chile. [Consulta: marzo 2022]

DATOSMACRO. Ipc países – Chile. [en línea] https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/chile [Consulta: marzo 2022]

DOCS.ORACLE. [en línea] https://docs.oracle.com/cd/E52437_01/es/crystal_ball_users_guide/frameset.htm? [Consulta: marzo 2022]

ESTADISTICAMENTE. Moda – Estadística. [en línea] https://estadisticamente.com/moda-estadistica/ [Consulta: marzo 2022]

file:///C:/Users/felip/Zotero/storage/RDS7SSER/confiabilidad-operacional.html

Fundamentos del radar y principios de funcionamiento, capacitación básica radares ibis. Anglo American, Geotecnia. (PPT)

HRUDNICK. Mantenimiento. [en línea] https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno06/OED/mantenimiento.htm

[Consulta: marzo 2022]

"Influencia de los costos de Mantenimiento en la toma de decisiones", MSc. Reinaldo Ihosvanny BENÍTEZ MONTALVO, Centro de Inmunología Molecular, Cuba.

INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO. El presupuesto del mantenimiento. [en línea] http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/10-el-presupuesto-de-mantenimiento. [Consulta: marzo 2022]

INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO. Estrategias de mantenimiento [en línea] http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/9-estrategias-de-mantenimiento/6-estrategias-de-mantenimiento [Consulta: marzo 2022]

La vida útil de un activo y política de reemplazo de activos, https://jefas.esan.edu.pe/index.php/jefas/article/view/114

Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento, Adolfo ARATA ANDREANI Luciano FURLANETTO, RIL Editores, Santiago, 2005.

Norma española UNE-EN 60300-3-3, gestión de confiabilidad, parte 3-3, Costo ciclo de vida, mayo 2009.

OBSBUSINESS. Costos directos e indirectos [en línea] https://www.obsbusiness.school/blog/costos-directos-e-indirectos-de-un-proyecto

[Consulta: marzo 2022]

Organización y gestión integral de mantenimiento, Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial, Ediciones Díaz de Santos, S. A. Doña Juana I DE CASTILLA, 22. 28027 Madrid, Santiago GARCÍA GARRIDO, 2003.

PATIL, R.B., KOTHAVALE, B.S., WAGHMODE, L.Y. AND PECHT, M. (2021), "Life cycle cost analysis of a computerized numerical control machine tool: a case study from Indian manufacturing industry", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 27 No. 1, pp. 107-128. https://doi.org/10.1108/JQME-07-2019-0069

PREDICTIVA 21. Ciclo de vida remanente activo. [en línea] https://predictiva21.com/ciclo-vida-remanente-activo/ [Consulta: marzo 2022]

Preparación y Evaluación de Proyectos, sexta edición, Nassir SAPAG CHAIN, Reinaldo SAPAG CHAIN, José Manuel SAPAG P. (2014).

SCIELO. [en línea] https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022017000100037 [Consulta: marzo 2022]