

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES
MAYORES Y ESTUDIO DE LA ESTRATEGIA
POOLING EN LA GESTION DE REPUESTOS DE
EQUIPOS MINEROS DE ACARREO EN EL PERÚ”**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECATRÓNICO
ROY WILLIAM ZANABRIA CAMPOS**

PROMOCIÓN 2010-I

LIMA - PERÚ

2014

Dedicado a mis padres:

Roy Zanabria y Angélica Campos por su guía y el apoyo incondicional que me han convertido en el profesional y persona que soy.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	3
1.1. Situación problemática	4
1.2. Definición del problema	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Justificación.....	9
1.5. Limitaciones	9
1.6. Resumen	12
CAPITULO II	
FUNDAMENTO TEORICO	14
2.1. Proceso productivo de minería a cielo abierto.....	15
2.2. Los equipos mineros de acarreo	17
2.2.1. Camión minero Komatsu modelo 930E-X.....	18
2.2.2. Componentes mayores	19
2.2.2.1. Módulo de potencia.....	20
2.2.2.2. Motor diésel	21
2.2.2.3. Alternador principal	22
2.2.2.4. Motores de tracción.....	22
2.2.2.5. Cilindros de levante	23
2.3. Distribución de Poisson.....	24
2.4. Teorema de Palm- Khintchine.....	25
2.5. Política de inventarios (S-1, S).....	26
2.6. Criterios de dimensionamiento	26
2.6.1. Objetivos basados en el costo:.....	27
2.6.2. Objetivos basados en el sistema:.....	27

2.6.3.	Objetivos basados en la satisfacción del cliente.....	28
2.6.4.	Metodología.....	28
2.7.	Modelos empíricos de dimensionamiento de componentes	30
2.7.1.	Regla empírica 1.....	30
2.7.2.	Regla empírica 2.....	30
2.7.3.	Regla empírica 3.....	31
2.7.4.	Modelo polinómico	31
2.8.	Modelo de dimensionamiento de inventario basado en el nivel de servicio	33
2.8.1.	Disponibilidad física.....	33
2.8.2.	Utilización	34
2.8.3.	Time Between Overhaul (TBO).....	35
2.8.4.	Componentes en operación (m).....	36
2.8.5.	Tasa de demanda media (λ).....	37
2.8.6.	Turn Around Time (TAT).....	37
2.8.7.	Promedio de ocurrencias en un evento.....	37
2.8.8.	Probabilidad de demanda de reparación de “k” componentes	38
2.8.9.	Nivel de servicio.....	38
2.9.	Estrategia Pooling.....	40
2.9.1.	Criterios de repartición entre almacenes	41

CAPITULO III

DIMENSIONAMIENTO DEL INVENTARIO DE COMPONENTES

MAYORES	42
3.1. Dimensionamiento de componentes mayores para un centro minero	43
3.1.1. Caso de estudio 1.....	43
3.1.2. Entradas al modelo	45
3.1.3. Resultados: Componentes vs nivel de servicio	45
3.1.4. Análisis de sensibilidad.....	46
3.1.4.1. Cantidad de componentes en función del uso por mes	47
3.1.4.2. Cantidad de componentes en función del TBO	48
3.1.4.3. Cantidad de componentes en función del TAT.....	49
3.2. Dimensionamiento para múltiples centros mineros, stock individual	51

3.2.1.	Caso de estudio 2.....	51
3.2.2.	Entradas al modelo	52
3.2.3.	Resultados: Componentes de soporte para cada centro minero	53
3.3.	Desempeño de los modelos empíricos.....	54
3.3.1.	Comparación entre reglas empíricas	54
3.3.2.	Análisis de sensibilidad del modelo polinómico	56
3.3.3.	Caso de estudio 3.....	58
3.3.3.1.	Resultados aplicando los modelos empíricos.....	58
3.3.3.2.	Resultados aplicando el modelo basado en nivel de servicio	59
3.3.3.3.	Comparativo para el caso 3	60

CAPITULO IV

ESTUDIO DE LA ESTRATEGIA POOLING DE INVENTARIOS	62
4.1. Dimensionamiento del inventario basado en una estrategia Pooling	63
4.1.1. Caso de estudio 4.....	63
4.1.2. Entradas al modelo	64
4.1.3. Resultados: Cantidad de componentes vs nivel de servicio	64
4.1.4. Comparativo del dimensionamiento con Pooling vs sin Pooling.....	66

CAPITULO V

ANALISIS ECONÓMICO	68
5.1. Escenarios de venta del inventario	69
5.1.1. Caso de estudio 5.....	69
5.1.2. Venta en dos partes.....	70
5.1.3. Venta completa con descuento	73
5.1.4. Venta en dos partes con congelamiento de precios	73
5.1.5. Venta por financiamiento en cuotas	74
5.1.6. Comparativo de las opciones de venta	75
5.2. Costo de carencia de inventario	76
5.3. Ahorros económicos en la estrategia Pooling.....	78
5.3.1. Caso de estudio 5.....	78

5.3.2.	Inversión económica sin Pooling	79
5.3.3.	Inversión económica considerando Pooling.....	80
5.3.3.1.	Reparto en función del número de componentes.....	80
5.3.3.2.	Reparto en función del número de equipos.....	81
5.3.3.3.	Reparto en función de un ahorro porcentual establecido.....	81
5.3.4.	Ahorros económicos producidos por la estrategia Pooling	82
CONCLUSIONES		85
BIBLIOGRAFÍA.....		90
APÉNDICE		92

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Ranking de producción minera del Perú – Marzo 2014.....	14
Tabla 2.2:	Listado simplificado de componentes mayores	20
Tabla 2.3	Expresiones matemáticas para el nivel de servicio asociado a probabilidades.	39
Tabla 3.1	Entradas al modelo (caso 1)	45
Tabla 3.2	Número de componentes vs. nivel de servicio (caso 1).....	45
Tabla 3.3:	Adaptación de la población de equipos mineros de acarreo 930E-X	51
Tabla 3.4:	Componentes mayores en común, equipos Komatsu 930E-3/-4/4SE.....	51
Tabla 3.5:	Adaptación de la disponibilidad física y utilización por centro minero ...	52
Tabla 3.6:	Entradas al modelo, dimensionamiento para centro minero (caso 2)	52
Tabla 3.7:	Resultados del dimensionamiento para cada centro minero (caso 2)	53
Tabla 3.8:	Entradas al modelo basado en nivel de servicio (caso 3).....	58
Tabla 3.9:	Resultados por modelos empíricos (caso 3).....	59
Tabla 3.10	Resultados según modelo basado en el nivel de servicio (caso 3).....	59
Tabla 4.1:	Entradas al modelo considerando Pooling	64
Tabla 4.1:	Resultados del dimensionamiento (caso 4).....	65
Tabla 4.2:	Repartición virtual del inventario en Pooling (caso 4)	65
Tabla 4.3:	Comparativo del dimensionamiento Sin Pooling/Con Pooling	66
Tabla 5.1.	Parámetros del modelo para año 1 (caso 5)	71

Tabla 5.2 VAN para la venta en 2 partes (caso 5).....	73
Tabla 5.3 VAN para la venta con descuento (caso 5).....	73
Tabla 5.4 VAN para la venta con precios congelados (caso 5).....	74
Tabla 5.5 VAN con financiamiento hasta 5 años (caso 5).....	74
Tabla 5.6 Inversión sin Pooling (caso 5).....	79
Tabla 5.7 Inversión con Pooling (caso 5).....	80
Tabla 5.8 Reparto del costo en función del número de equipos	81
Tabla 5.9 Repartición de costos a un ahorro del 25%	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Equipos mineros móviles involucrados en la explotación.....	17
Figura 2.2: Komatsu 930E-4SE de 290 toneladas métricas.	18
Figura 2.3: Partes del módulo de potencia.	21
Figura 2.4: Alternador principal y motores de tracción	23
Figura 2.5: Cilindros de levante	24
Figura 2.6 Metas de diseño de inventarios para partes de baja rotación	29
Figura 2.7: Ejemplo de curva de confiabilidad	32
Figura 3.1 Número de componentes vs. nivel de servicio (caso 1).....	46
Figura 3.2 Cobertura del nivel de servicio a variaciones de las horas mensuales.....	48
Figura 3.3 Cobertura del nivel de servicio a variaciones del tiempo entre reemplazos	49
Figura 3.4 Cobertura del nivel de servicio a variaciones del tiempo logístico TAT..	50
Figura 3.5: Comparación entre reglas empíricas 1,2 y 3.....	55
Figura 3.6: Método polinómico para diversos %C	57
Figura 3.7 Comparativo de inventario sugerido “S” por modelos (caso 3)	60
Figura 5.1 Comparativo del tamaño de inventario con Pooling/sin Pooling (caso 2 y caso 4)	67
Figura 5.1 Ingreso de equipos por mes, caso 5	69
Figura 5.2 Entrega de componentes en 2 partes.....	71
Figura 5.3 Resultados del dimensionamiento para el año 1 (caso 5).....	72
Figura 5.4. Opciones de venta para 9 motores de tracción	76
Figura 5.5 Ahorros potenciales por la estrategia Pooling	83

PRÓLOGO

Las grandes industrias de la minería en Perú, dedicadas a la explotación de cobre, oro, plata, entre otros, tienen como medio de transporte de material a los equipos de acarreo de gran tonelaje.

El proceso de adquisición de equipos de acarreo para minería responde directamente a la necesidad de las compañías mineras de lograr los niveles de producción deseados. A fin de asegurar que estos equipos estén disponibles para cumplir con su propósito, es necesario mantener un inventario (stock) saludable de partes que garantice un reemplazo rápido cuando el equipo falle, de manera que se minimicen los tiempos de parada.

Las partes críticas (componentes mayores) que se requieren para respaldar la disponibilidad de estos equipos, están valoradas en millones de dólares para tamaños de flotas de dos dígitos o más. El proveedor de equipos (fabricante, distribuidor de equipos), es el primer llamado a sugerir los niveles de inventario saludables, así como es el encargado de contar con un inventario adicional para soportar la operación de sus clientes.

El tema central de este trabajo es el dimensionamiento del stock de componentes mayores puntualizando los aspectos del modelo matemático para ayudar a la gestión de partes de equipos de acarreo, así como estudiar una estrategia de consolidación que podría reducir los niveles de partes en beneficio mutuo cliente-proveedor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el Perú, el mercado de equipos de acarreo para minería superficial está dominado por 2 marcas: **Komatsu**, representada por Komatsu – Mitsui Maquinarias Perú (KMMP) y **Caterpillar** representada por Ferreyros S.A (FESA).

Una oferta integral de venta de equipos, incluye una propuesta por venta de componentes de soporte, la misma que sugiere un inventario determinado.

En algunas compañías mineras del Perú, el mantenimiento de sus equipos (de acarreo y otros tipos) es realizado por empresas terceras en lo que se denomina “Contrato de servicio de mantenimiento”. Existen diversos tipos de contratos de servicio, entre ellos los de tipo MARC, LPP, soportes por garantía, entre otros. Los contratos de servicio de mantenimiento más completos le ofrecen a la compañía minera una disponibilidad asegurada de sus equipos, de este modo la compañía minera centra sus recursos en la gestión de la producción. Como requisito para mantener la

disponibilidad de los equipos, se debe contar con un inventario de componentes de respaldo, según lo indicado por el proveedor del servicio.

Ya sea que la compañía minera opte por realizar el mantenimiento de sus equipos o que opte por la tercerización del mantenimiento con un proveedor de servicios, es necesario mantener un inventario saludable de partes críticas como un seguro contra los costos implicados por su indisponibilidad en el caso eventual de que estas partes sean requeridas.

1.1. Situación Problemática

La atención que se le ha puesto al estudio de partes críticas es casi nula en Perú; a diferencia de otros países como Australia, Chile, Canadá y otros países de Europa. Es así que no es común encontrar textos o artículos nacionales referidos específicamente al dimensionamiento de inventarios de componentes críticos.

Los modelos empíricos, también conocidos como “reglas del pulgar”, aún siguen siendo utilizados a la fecha por algunas áreas de mantenimiento y gestión de repuestos como método para estimar las cantidades necesarias de componentes mayores de respaldo.

En el país vecino de Chile, el distribuidor de equipos Komatsu (KCC) administra más de 10 contratos de servicio de mantenimiento; además KCC

posee y administra un gran inventario de componentes de respaldo para estos contratos, ofreciendo a las compañías mineras chilenas la posibilidad de acceder a un servicio de “alquiler de componentes”; es decir, la compañía minera no necesita comprar estos componentes, logrando ahorros de inversión importantes.

El mercado minero peruano podría madurar en esa dirección (tercerización), por lo que los proveedores de servicio de mantenimiento tendrían la oportunidad de ofrecer el servicio de “alquiler de componentes”, al igual que en Chile, afianzando aún más la relación de largo de plazo con sus clientes. Aún si una compañía minera no opta por tercerizar el mantenimiento y solo opta por la adquisición de la flota de equipos, esta adquisición también está ligada a la compra de un inventario de componentes de soporte.

Desde el punto de vista del proveedor de equipos, sugerir un inventario excesivo, termina elevando el costo de su propuesta de venta haciéndolo menos competitivo ante sus rivales en el mercado. De otro lado, sugerir un inventario reducido impactará en la disponibilidad de los equipos de su cliente y en la imagen de la marca.

Desde el punto de vista de la compañía minera, adquirir una flota de equipos y un exceso de componentes de respaldo no es recomendable. Esas piezas “extra” que no serían requeridas por largos periodos están expuestas a la pérdida de valor por obsolescencia y a su vez atadas a los respectivos costos

de posesión, almacenamiento, seguros, entre otros. Por otro lado, un déficit en el inventario de partes consideradas críticas, tendrán un impacto marcado en los costos de operación afectando directamente la disponibilidad de los equipos, comprometiendo la producción y la razón ser del activo.

Entonces es necesidad del distribuidor de los equipos y de las compañías mineras contar con un modelo de dimensionamiento de componentes, comprendiendo las consideraciones vinculadas.

1.2. Definición del problema

Dentro de la evaluación de las consideraciones que un proveedor de equipos debe tener en cuenta para brindar servicios de mantenimiento, está la determinación del número de componentes de respaldo que serán necesarios para soportar la operación de una flota de equipos y lograr las disponibilidades ofrecidas; independientemente de si estos componentes son comprados por la compañía minera, o provistos por el distribuidor en alguna modalidad de renta o intercambio.

Aún si la compañía minera no opta por un servicio de mantenimiento, es tarea del proveedor de equipos sugerir el inventario de soporte y contar con un inventario adicional para soportar la operación de sus clientes.

Bajo la suposición de contar con más contratos de mantenimiento, existe, para la compañía prestadora de servicios de mantenimiento, la posibilidad a futuro de administrar los componentes de respaldo para varias compañías mineras bajo una modalidad de renta o intercambio, la estrategia *Pooling* se presenta como opción interesante.

En ese marco, el presente trabajo aborda la problemática bajo los siguientes planteamientos generales:

- ¿Cuántos componentes mayores en inventario serán necesarios para soportar la operación de una flota de equipos mineros de acarreo?
- ¿Qué beneficios traería consigo la estrategia *Pooling* para las compañías mineras y para el distribuidor?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Dimensionar el inventario de componentes mayores de respaldo necesarios para soportar una flota de acarreo, bajo un modelo centrado en el nivel de servicio; y estudiar la estrategia *Pooling* y los beneficios que pueden traer a las compañías mineras y al distribuidor de equipos, como apoyo a la gestión de partes mediante la reducción de inventario.

1.3.2. Objetivos específicos

- Presentar un modelo de dimensionamiento de inventario de partes críticas basado en el nivel de servicio.
- Discutir la influencia de los diferentes parámetros del modelo en la cantidad de componentes de respaldo.
- Comparar los resultados del dimensionamiento de componentes mayores basado en el nivel de servicio con algunos modelos empíricos conocidos en la industria minera.
- Ejemplificar el dimensionamiento del inventario de componentes mayores para soportar a flotas de equipos de acarreo de gran tonelaje en los principales centros mineros del Perú y analizar económicamente las opciones de venta de componentes mayores.
- Presentar la estrategia Pooling, considerando la población equipos Komatsu 930E en las compañías mineras del Perú.
- Realizar un comparativo entre el costo de parada del equipo y la inversión en componentes mayores.
- Mostrar una posible distribución de costos dada la reducción de inventario debido a la estrategia Pooling.

1.4. Justificación

Las altas inversiones implicadas en la compra de componentes mayores de respaldo, así como los elevados costos que podrían producirse debido a la falta de inventario de componentes en caso alguno de ellos sean requeridos, justifican estudios como el presente.

Desde el punto de vista del distribuidor, una mejor comprensión del modelo matemático, lo dotará de herramientas para brindar un mejor servicio, potenciar las ventas y gestionar el inventario de partes de baja rotación.

Por otro lado, el estudio de la estrategia Pooling para componentes de baja rotación puede derivar en un modelo de negocio a futuro entre el distribuidor de equipos y sus clientes, en un escenario de incremento de contratos de servicio de mantenimiento.

1.5. Limitaciones

El modelo empleado es un modelo estocástico que tiene como meta alcanzar un determinado nivel de servicio. Si bien el nivel de inventario depende de que meta se desea alcanzar; por ejemplo, maximizar la disponibilidad del activo, o minimizar el costo global, el modelo por nivel de servicio es vigente y estudiado en mucha de la literatura encontrada, además de haber encontrado amplia aceptación en muchas industrias (incluida la

minera) por lo cual, se da por sentado que un modelo por nivel de servicio es un modelo cuya eficacia ya ha sido probada en la realidad.

El dimensionamiento presentado es particularmente útil en la etapa de diseño, cuando la compra de los equipos o del inventario están en la etapa de negociación (en otras palabras, para sugerir el inventario inicial); el modelo aplica perfectamente si la flota ya existe o se quiere evaluar un inventario existente (matemáticamente da igual). Debe tenerse en cuenta que el modelo debe ser complementado con la gestión que asegure que los parámetros a evaluar sean realísticos y/o factibles en el tiempo y sobre todo sostenibles (tiempos de reparación en taller, tiempo de cambio, etc.); estas estrategias de gestión no son discutidas en el presente trabajo.

El modelo es aplicado a la industria minera, específicamente a los equipos de acarreo en minería modelo Komatsu 930E en el país. El modelo es aplicable a otras industrias, así como a otros tipos y modelos de equipos mineros, teniendo en cuenta que el tamaño de flota (cantidad de componentes en operación) debe ser considerable, como es el caso en los equipos de acarreo mineros de tajo abierto. Tamaños pequeños de flotas (por ejemplo, motoniveladoras, tractores, etc.) pueden requerir otro tratamiento que no es abordado en el presente trabajo; sin embargo, consideramos que la consolidación a través del Pooling amplía la posibilidad de estudiar estas pequeñas flotas y restaura la aplicabilidad del modelo.

El modelo aplica a partes de baja rotación, reparables, de alto precio unitario y con un tiempo de vida útil particularmente largo en comparación con otras piezas o repuestos del equipo. Este trabajo parte de la definición de “componentes mayores” como los elementos del camión minero que cumplen estos requisitos, es decir no se discutirán los métodos de clasificación de partes ni su aplicación a la minería ya que: se requiere de información confidencial para hacer esta clasificación y considerando que los componentes mayores del camión de acarreo son ampliamente conocidos y aceptados como tales en el rubro.

No forman parte de este trabajo la simulación ni puesta a prueba experimental de la cantidad sugerida de inventario para una operación minera.

Para este trabajo, se dimensionará el inventario de Pooling considerando un solo almacén central (cuya ubicación no será calculada), utilizando el dimensionamiento basado en el nivel de servicio. Asimismo no se definirá la estrategia de precios que maximicen el retorno de inversión del distribuidor si administrara el Pooling.

1.6. Resumen

En el Capítulo I se precisa la situación problemática, la definición del problema, los objetivos, las limitaciones y la justificación del trabajo.

En el Capítulo II se presenta a los equipos mineros de acarreo y se introduce al camión eléctrico de gran tonelaje Komatsu 930E y los componentes sobre los cuales se abordarán los análisis en este trabajo; además se presenta un modelo matemático de dimensionamiento de componentes basado en el nivel de servicio con las consideraciones que se toman en cuenta para aplicarlo.

En el Capítulo III se ejemplifica el dimensionamiento de componentes mayores de respaldo para una operación minera, se revisa la influencia de los parámetros del modelo en la cantidad de componentes sugerida, se presenta la flota disponible por centro minero en el Perú y se termina dimensionando el inventario para cada una de las operaciones. En base a las herramientas desarrolladas, se realiza un comparativo del modelo de dimensionamiento basado en el nivel de servicio con las técnicas de dimensionamiento basadas en reglas empíricas.

En el Capítulo IV se estudia la estrategia Pooling como alternativa para la reducción de inventarios. Se realiza un comparativo entre el tamaño del inventario “sin Pooling” y los ahorros porcentuales en la cantidad de

componentes si se aplica una estrategia Pooling, de un solo escalón, entre compañías.

En el Capítulo V se calcula el precio de adquisición de un componente bajo diversas premisas de venta. Se revisa un cálculo para determinar los costos implicados por la parada de un equipo de acarreo y se muestran los ahorros económicos producidos por la estrategia Pooling para un componente específico. Se aborda una opción de repartición del costo del pool entre compañías.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones correspondientes a cada tema.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEORICO

La minería en el Perú se remonta a la época preincaica. La presencia de la Cordillera de los Andes constituye la principal fuente de recursos minerales. Según el MINEM la participación en las exportaciones de productos metálicos, no metálicos, joyería y metalmecánica, representa el 62% de las ventas del país. La Tabla 2.1 muestra la posición del Perú en el ranking de producción por tipo de mineral:

Tabla 2.1 Ranking de producción minera del Perú – Marzo 2014

MINERAL	RANKING PERU	
	LATINOAMERICA	MUNDIAL
Cobre	2 ^{do}	3 ^{er}
Oro	1 ^{er}	6 ^{to}
Zinc	1 ^{er}	3 ^{er}
Plata	2 ^{do}	3 ^{er}
Plomo	1 ^{er}	4 ^{to}
Estaño	1 ^{er}	1 ^{er}

Si se evalúan los últimos años, se puede notar que la inversión en minería en el Perú ha visto un incremento drástico. La inversión en minería se clasifica, según el MINEM en los rubros de: preparación, infraestructura, explotación, exploración, equipamiento de la planta y equipamiento minero; en este último rubro se han invertido más de tres mil millones de dólares en los últimos 5 años, (2009-2013).

2.1. Proceso productivo de minería a cielo abierto

Resumen de (PROESMIN, 2009)

La minería a cielo abierto se practica principalmente en yacimientos de mineral diseminado de gran volumen, y se basa en la extracción de todas las capas de material donde se ubica el mineral. Ello supone mover grandes volúmenes de tierra, utilizando equipos de gran capacidad.

Las actividades o procesos que comprende la explotación de la mina se pueden clasificar en: Exploración y Desarrollo; Perforación y Disparos; Carguío y Acarreo.

- **Exploración y desarrollo:** Se realizan actividades orientadas a encontrar nuevas reservas y mantener o alargar de esta forma la vida útil de la mina, se realiza simultáneamente a la extracción, a través de perforaciones, ensayos, etc.

- **Perforación y voladura:** Perforadoras de gran tamaño utilizan barrenos para perforar las zonas mineralizadas; los orificios son rellenos con explosivos como el ANFO (nitrato de amonio + petróleo) que al detonar remueven grandes volúmenes de material. El material debe estar apropiadamente fragmentado para facilitar su carguío y las operaciones de chancado y molienda si fuera el caso.
- **Carguío:** Equipos de gran capacidad generalmente palas y cargadores frontales, cargan el material a la tolva de los equipos mineros de acarreo.
- **Acarreo o transporte:** Los equipos de acarreo transportan la carga a un destino dependiendo de la naturaleza del material. El mineral, con contenido metálico económicamente explotable, se trasladara a la chancadora del tajo abierto o a sus cercanías (stock-pile). El leach o material de baja ley se almacena en pilas de lixiviación para más tarde, aplicando otras tecnologías, ser procesado a fin de recuperar su contenido metálico. El desmonte o material estéril no tiene valor económico y se envía a los botaderos. Las vías que utiliza el camión para transitar son mantenidas por equipos auxiliares.

La Figura 2.1 muestra el traslado de material desde los bancos hasta la chancadora, el equipo utilizado para el carguío es un cargador frontal.

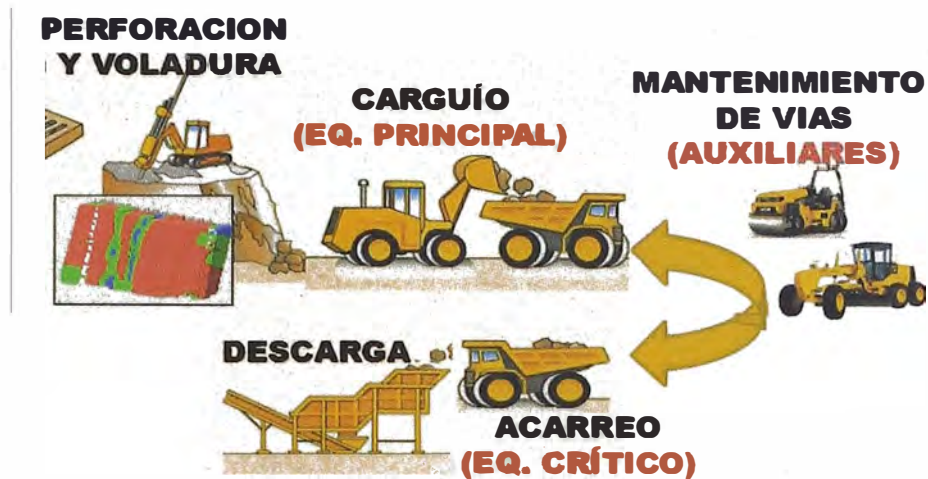


Figura 2.1 Equipos mineros móviles involucrados en la explotación.

2.2. Los equipos mineros de acarreo

El éxito de una operación minera no solo reside en la riqueza de un yacimiento, sino también en la gestión de los equipos que utiliza para su explotación. Los equipos de acarreo en minería, también llamados camiones mineros o camiones “off-road”, son vehículos usados para transportar el material, ya sea desmonte o mineral, de un lugar a otro.

Entre las principales características de los camiones mineros destacan su gran tamaño, potencia, robustez y tecnología a bordo; todos estos factores están pensados para optimizar su productividad y minimizar los costos de producción.

Las condiciones de diseño de las vías de la mina e instalaciones de mantenimiento son planteadas teniendo en cuenta el tipo y modelo de camión que se utilizará para explotarla.

2.2.1. Camión minero Komatsu modelo 930E-X

El camión minero Komatsu modelo 930E-X es un equipo muy usado en la industria minera peruana debido a sus grandes prestaciones de desempeño y confiabilidad mecánica; a la fecha los modelos disponibles en el Perú son el 930E-3, 930E-4 y 930E-4SE (Figura 2.2). Estos equipos están diseñados para transportar más de 290 toneladas métricas de material en un solo viaje.

La característica particular de estos equipos es su tracción eléctrica, es decir el motor diésel no impulsa las ruedas, sino que mueve un alternador eléctrico que genera corriente para mover dos motores tipo AC. Esto simplifica la mecánica de funcionamiento y reduce la cantidad de piezas en movimiento (por ejemplo, cardanes, transmisión mecánica, embragues, etc.) con los respectivos beneficios que ello implica.



Figura 2.2: Komatsu 930E-4SE de 290 toneladas métricas.

2.2.2. Componentes mayores

Son componentes de gran tamaño, reparables, de alto precio unitario y con un tiempo de vida útil particularmente largo en comparación con otras piezas o repuestos del equipo. Cuando fallan, provocan una parada del equipo por un tiempo prologado.

Usualmente, el tiempo de entrega o pedido de estos componentes a fábrica es largo, por lo que se ordenan con bastante anticipación y se mantienen en almacén como seguro contra fallas.

La Tabla 2.2 muestra los principales componentes mayores del camión eléctrico 930E-X. Los componentes están agrupados para los ítems KM01 y KM06 debido a que es común removerlos en conjunto para disminuir el tiempo de parada del equipo; es decir, es más rápido sacarlos en grupo que sacarlos individualmente. De este modo, para el dimensionamiento del inventario de respaldo, se “considera” como un solo componente al conjunto.

Tabla 2.2: Listado simplificado de componentes mayores

ID	Componente	Cantidad/Equipo
<u>Módulo de potencia:</u>		
KM01	Radiador + motor diésel + alternador principal + soporte	1
KM02	Motor de tracción	2
KM03	Soplador de parrillas	2
KM04	Cilindro de levante	2
KM05	Suspensión posterior	2
KM06	Suspensión frontal + frenos delanteros + bocanasa Frontal	2

A continuación se describe brevemente algunos componentes del equipo:

2.2.2.1. Módulo de potencia

Este módulo está conformado por el motor diésel, el alternador principal, el radiador y subframe o soporte. La Figura 2.3 muestra las partes del módulo de potencia de un camión 930E-X.

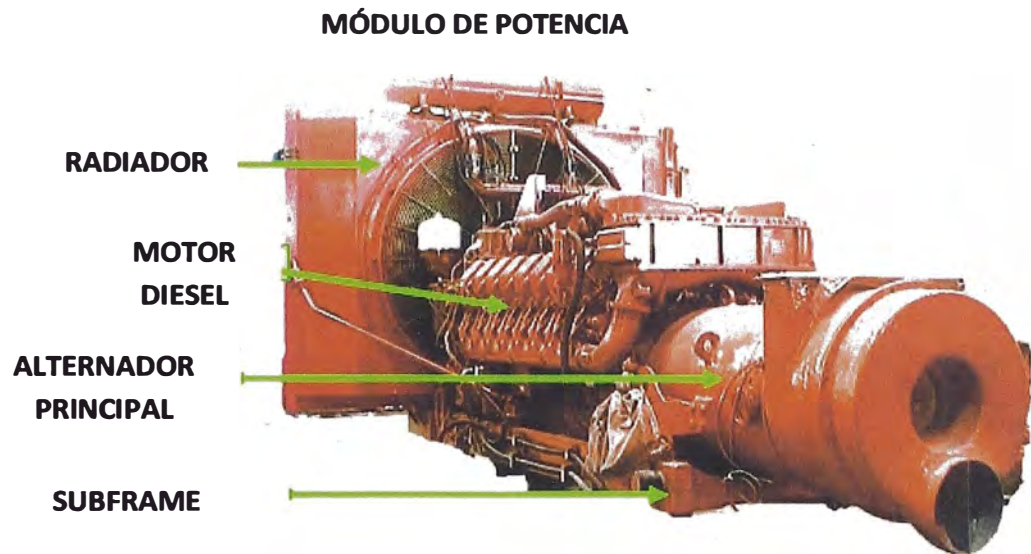


Figura 2.3: Partes del módulo de potencia.

2.2.2.2. Motor diésel

El camión 930E-X dispone para elección de 2 versiones de motor. Una versión con motor de 2700HP (930E-4) y otra versión con un motor de 3500HP (930E-4SE), el primero es un motor de 16 cilindros en V de 60 litros de cilindrada y el segundo es un motor de 18 cilindros en V de 78 litros de cilindrada. La función del motor diésel en el camión 930E-X es impulsar el alternador eléctrico principal.

2.2.2.3. Alternador principal

El alternador principal es el encargado de convertir la energía mecánica transmitida por el motor diésel a energía eléctrica en forma de corriente AC.

Para su enfriamiento (y el enfriamiento de otros sistemas) el alternador tiene acoplado ventiladores duales.

2.2.2.4. Motores de tracción

La corriente generada por el alternador principal llega a los motores de tracción (luego de una etapa de rectificación y control), los cuales finalmente convierten la energía eléctrica en energía mecánica para mover al camión minero. Hay dos (2) motores de tracción, uno para cada lado. El control implementado en tarjetas electrónicas hace que los ambos motores trabajen de manera sincronizada para avanzar, retroceder y girar.

La Figura 2.4 muestra la ubicación de los motores de tracción con respecto a la ubicación del alternador principal en el camión 930E-X.

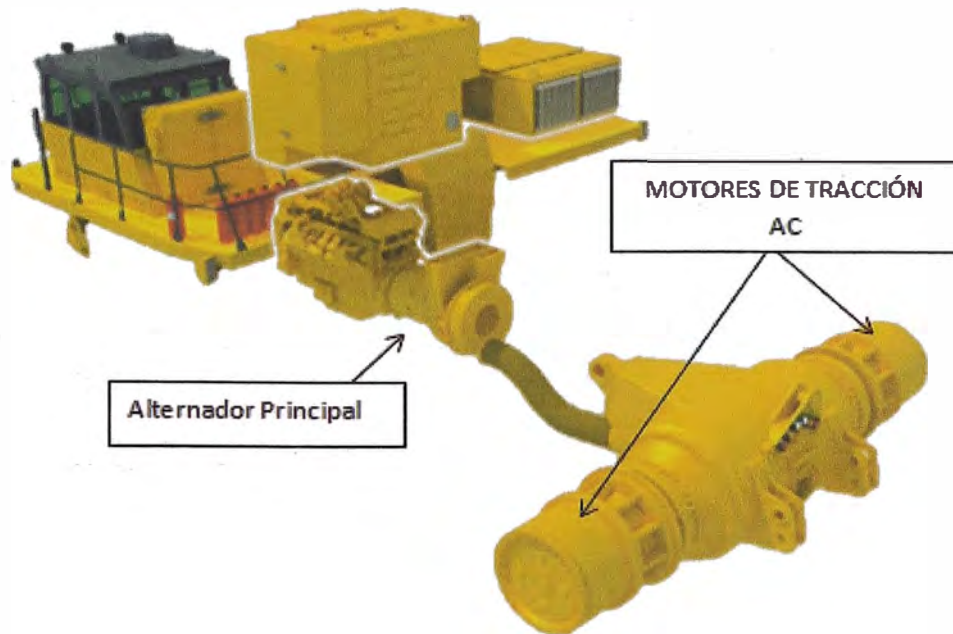


Figura 2.4: Alternador principal y motores de tracción

2.2.2.5. Cilindros de levante

El sistema hidráulico del camión está conformado por tanques, válvulas, mangueras, bombas y acumuladores, todos orientados a controlar la actuación de los frenos hidráulicos y desplazamiento de los cilindros hidráulicos. El cilindro de levante es un cilindro de tres etapas que tiene la función de subir y bajar la tolva para la descarga del material.

La Figura 2.5 muestra la ubicación de los cilindros de levante, sin mostrar la tolva del equipo.



Figura 2.5: Cilindros de levante

2.3. Distribución de Poisson

La distribución de Poisson es una distribución discreta que expresa la probabilidad que un determinado número de eventos ocurran en un determinado periodo de tiempo, dada una frecuencia media conocida e independientemente del tiempo transcurrido desde el último evento.

Según la distribución de Poisson, la probabilidad de que ocurran “k” eventos es:

$$p(x = k) = \frac{a^k e^{-a}}{k!}.$$

donde:

“k”: número de ocurrencias del evento o fenómeno (la función da la probabilidad de que el evento suceda precisamente “k” veces).

“λ”: frecuencia media de ocurrencia del evento.

“T”: intervalo de tiempo que se está analizando.

“a”: es el número medio de ocurrencias por evento, es decir: $a = \lambda T$.

A su vez para esta distribución se cumple que la media o valor esperado es igual a la varianza:

$$E(x) = \sigma^2(x) = a.$$

La probabilidad acumulada para esta distribución es:

$$p(x \leq k) = \sum_{i=0}^k \frac{a^i e^{-a}}{i!}.$$

Los usos de la distribución de Poisson son variados, encontrándose una amplia gama de aplicaciones en mediciones de inventarios de repuestos.

2.4. Teorema de Palm- Khintchine

El número de eventos en un intervalo de tiempo corto, ocasionados por procesos de reemplazo independientes, los cuales no obedecen necesariamente una distribución de Poisson, pueden aproximarse como una distribución de Poisson si estos eventos son numerosos y se superponen.

El uso del teorema de Palm-Khintchine como argumento para aceptar que la demanda de partes obedece una distribución de Poisson, es un estándar en la literatura de inventario de partes del tipo (S-1, S).

2.5. Política de inventarios (S-1, S)

Es una política de reposición muy aceptada para partes críticas, es decir de alto costo y baja rotación. (Alfonso-Romero C, 2012) Cuando el nivel deseado de inventario S , desciende en una unidad, se coloca inmediatamente una orden de pedido o reparación. Esto quiere decir que el inventario es continuamente revisado.

Este no es el caso de los repuestos, que por ejemplo, se reabastecen en pedidos tipo batch, por ejemplo de 10 en 10, 30 en 30, etc.

2.6. Criterios de dimensionamiento

El problema de determinar el tamaño adecuado del inventario ha sido planteado por muchos investigadores a lo largo del tiempo y ha originado una extensa variedad de modelos; desde modelos empíricos (reglas de pulgar) hasta la inclusión de algoritmos genéticos y lógica difusa; cada modelo plantea el logro de una meta(s) (objetivo) sujeta a ciertas restricciones y consideraciones. En base a la literatura leída (Rego & Mesquita, 2011), se plantea la siguiente agrupación de las metas u objetivos como aporte de este trabajo:

- Objetivos basados en el costo.
- Objetivos basados en el sistema.
- Objetivos basados en la satisfacción del cliente.

2.6.1. Objetivos basados en el costo:

- **Inventario:** Busca minimizar los costos de inventario, ya sean de costos de propiedad, costos de fabricación, costos de posesión, costo de las ordenes, etc.
- **Costos totales:** Busca minimizar una combinación de los costos asociados al inventario, y de los costos vinculados al déficit de inventario (pérdidas de producción, gastos de mantenimiento, gastos de emergencia, entre otros), la literatura es amplia y de gran aplicación en la industria.

2.6.2. Objetivos basados en el sistema:

- **Disponibilidad:** Busca minimizar el tiempo de parada del sistema debido únicamente a la falta de inventario, es decir los tiempos de parada por mantenimientos rutinarios u otras causas no son considerados.
- **Cumplimiento de programa:** Busca minimizar la probabilidad de retrasar un determinado cronograma de reemplazo.

2.6.3. Objetivos basados en la satisfacción del cliente.

- **Tiempo de respuesta al cliente:** Busca minimizar el tiempo o los tiempos involucrados en el proceso entre la orden o pedido y la entrega al cliente.
- **Niveles de servicio:** Busca cumplir una meta, usualmente porcentual, relativa a la fracción de solicitudes del cliente satisfechas con el inventario disponible. Se pueden medir de manera instantánea, en un periodo de tiempo, a través de la cantidad de pedidos en cola, entre otras formas. En esencia, el nivel de servicio es una medida de la respuesta del inventario ante una demanda. La literatura en este caso es muy amplia y ha encontrado una gran variedad de aplicaciones en la industria.

2.6.4. Metodología.

La metodología y el criterio de diseño dependerán de las técnicas del usuario y de las necesidades del negocio; como primera aproximación puede ayudar plantearse las siguientes preguntas:

- ¿Qué industria se está estudiando?
- ¿Son partes de rotación rápida o de poca rotación?
- ¿Qué políticas de inventario se pueden adoptar?

- ¿Cómo afecta el exceso o la falta de inventario a mi sistema y a mi compañía?
- ¿Cuánta información se posee, con qué frecuencia se puede actualizar y cuál es su nivel de precisión?
- ¿Cómo se modelará la demanda?
- ¿Desde qué perspectiva se está atacando el problema?

La Figura 2.6 esquematiza las metas y/o restricciones que pretenden alcanzar los diferentes modelos de dimensionamiento, se muestran en un diagrama de relación pues es posible aplicar un modelo teniendo en consideración 2 o más metas.

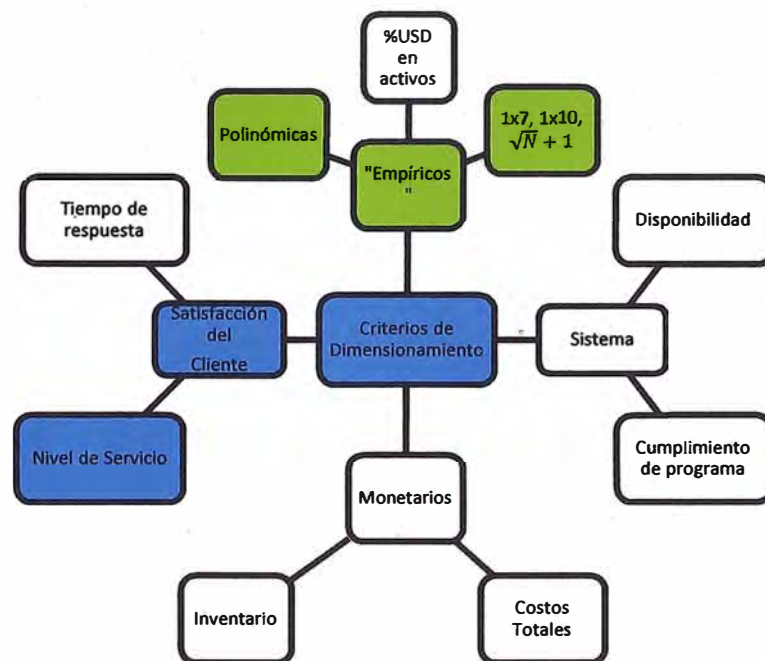


Figura 2.6 Metas de diseño de inventarios para partes de baja rotación

En este trabajo se realizará el dimensionamiento con el modelo centrado en el nivel de servicio, y se comparará los resultados obtenidos mediante las reglas empíricas para uno de los resultados.

2.7. Modelos Empíricos de dimensionamiento de componentes

2.7.1. Regla empírica 1

Es la regla más simple encontrada, se trata de dividir la cantidad de equipos “n” entre 7 y redondear al entero más próximo. Por ejemplo, para una flota de 70 equipos, se debería tener una cantidad de componentes “S” igual 10. Si los componentes son pares (como en el caso de los motores de tracción, que son 2 por equipo), la regla sugiere 10 pares, es decir 20 componentes.

Para evaluar el desempeño de esta regla, se redondeará el resultado de la división entre 7 al entero más próximo.

$$S = \frac{n}{7}$$

2.7.2. Regla empírica 2

Es una variante de la regla 1, en lugar de dividir la cantidad de equipos entre 7, se divide entre 10 y se redondea al entero más próximo. Por ejemplo, para una flota de 70 equipos, se debería tener 7 componentes. Si los componentes son pares (como en el caso de los motores de tracción, que son 2 por equipo), la regla sugiere 7 pares, es decir 14 componentes.

Para evaluar el desempeño de esta regla, se redondeará el resultado de la división entre 10 al entero más próximo.

$$S = \frac{n}{10}$$

2.7.3. Regla empírica 3

Esta regla sugiere que la cantidad de componentes se puede estimar bajo la siguiente fórmula

$$S = \sqrt{n} + 1.$$

Por ejemplo, para 70 equipos, se tendrá que $S = 9$ componentes de respaldo.

2.7.4. Modelo polinómico

Consiste en una fórmula polinómica que merece una mención aparte, pues toma en consideración los parámetros asociados al componente. En teoría aplica tanto para componentes menores como mayores. Su fórmula es:

$$S = \frac{SMR_{mes} \ m \ TAT}{2. \ TBO \ \%C \ 30.41} + m \ 1.5\%$$

donde:

S : Inventario sugerido,

SMR_{mes} : Horómetro promedio mensual,

m : Cantidad de componentes,

TAT : Tiempo de logístico en días,

TBO : Tiempo entre overhaul,

$\%C$: Confiabilidad asociada al TBO, que representa el porcentaje de componentes que han sobrevivido hasta el TBO indicado.

El TBO y el $\%C$ de esta fórmula están relacionados mediante la curva de confiabilidad, similar a la mostrada en la Figura 2.7, la misma que es obtenida a partir de data histórica de los tiempos de falla de los componentes.

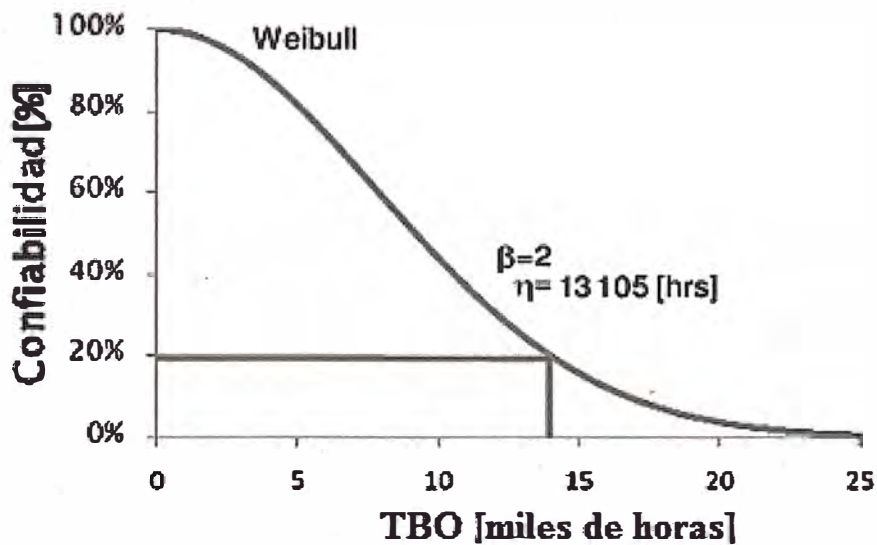


Figura 2.7: Ejemplo de curva de confiabilidad

2.8. Modelo de dimensionamiento de inventario basado en el nivel de servicio

Es un modelo estocástico que tiene como meta alcanzar un determinado nivel de servicio. Si bien el nivel de inventario depende de que meta se desea alcanzar (por ejemplo, maximizar la disponibilidad del activo, o minimizar el costo global); el modelo por nivel de servicio es vigente y estudiado en mucha de la literatura encontrada, además de haber encontrado amplia aceptación en muchas industrias (incluida la minera) por lo cual, se da por sentado que es un modelo cuya eficacia ya ha sido probada en la realidad.

El modelo interrelaciona las variables de disponibilidad, utilización, demanda, vida útil del componente, tiempo de reparación, nivel de servicio y tamaño de flota con el número de componentes necesarios.

2.8.1. Disponibilidad física

La disponibilidad física es el porcentaje del tiempo nominal (por ejemplo, 24 horas) donde el equipo está listo para cumplir la función para la que fue concebida y las condiciones lo permiten. Se calcula según:

$$DF = \frac{HN - HM - OI}{HN},$$

donde:

DF: Disponibilidad física,

HN: Horas nominales, por ejemplo 24 horas,

HM: Horas usadas para mantenimiento programado y no programado,

OI: Tiempos no disponibles debido a factores ajenos al mantenimiento, como por ejemplo paradas por clima adverso, fallas de energía eléctrica, feriados programados, etc.

Para calcular la disponibilidad media de la flota se hace un promedio simple entre las disponibilidades físicas de cada equipo. Es decir:

$$\overline{DF} = \frac{DF_1 + DF_2 + \dots + DF_n}{n},$$

donde:

n: número de equipos,

DF_i : Disponibilidad física del equipo "i",

\overline{DF} : Disponibilidad física media de la flota de equipos,

2.8.2. Utilización

Es la fracción del tiempo disponible en que el equipo es utilizado para las actividades de producción.

$$UT = \frac{DF \cdot HN - OD}{DF \cdot HN}$$

donde:

DF: Disponibilidad física,

OD: Demoras operativas, por ejemplo, cambio de turno, falta de operador, falta de material, entre otras,

HN: Horas nominales.

Para calcular la utilización media de la flota compuesta por “n” equipos:

$$\overline{UT} = \frac{UT_1 + UT_2 + \dots + UT_n}{n}$$

donde:

n: número de equipos,

UT_i : Utilización del equipo "i",

\overline{UT} : Utilización media de la flota de equipos,

2.8.3. Tiempo entre Overhaul (TBO)

El concepto de TBO tiene muchas denotaciones y formas de calcularse en las bibliografías consultadas, en este trabajo se usará la siguiente definición: es el tiempo, expresado en horas de operación, a las cuales un componente debería ser retirado y enviado a reparación.

Para los propósitos de diseño del inventario, es decir, en $t_{(0)}$ cuando la información para calcular el tiempo medio entre reemplazos aún no existe, se tomará el TBO, producto de estudios en operaciones

similares (o de la recomendación de fábrica) para calcular la tasa de demandas.

Para ser consistentes con las unidades de tiempo que se usan en formulas posteriores, se define la variable auxiliar $TBO_{\text{días}}$ que expresa el tiempo entre overhaul en días calendarios.

$$TBO_{\text{días}} = \frac{TBO}{SMR_{\text{días}}}$$

donde:

$SMR_{\text{días}}$ (Service Meter Reader al día) es la cantidad de horas promedio operadas en un día por cada equipo de la flota. Es decir:

$$SMR_{\text{días}} = 24 \times \overline{DF} \overline{UT}$$

2.8.4. Componentes en operación (m)

El número total de unidades en operación " m " corresponde al total de componentes instalados operando en los equipos. Por tanto:

$$m = \left(\# \frac{\text{componentes}}{\text{equipo}} \right) (\# \text{ total de equipos}).$$

Por ejemplo, si se quiere analizar un conjunto de equipos A+B donde A consta de 100 camiones y B consta de 50 camiones, todos del mismo modelo; y cada camión tiene 2 suspensiones instaladas, se tendrá que: $m = 2(150) = 300$ suspensiones.

2.8.5. Tasa de demanda media (λ)

La demanda media de componentes al almacén, corresponde a la tasa de fallas de los componentes en operación, por tanto:

$$\lambda = \frac{m}{TBO_{dias}}$$

2.8.6. Turn Around Time (TAT)

Cuando un componente es extraído del equipo, es enviado a un taller, por lo general externo, a ser reparado. Se define el parámetro TAT como el periodo transcurrido desde que el componente es desinstalado del equipo, hasta que regresa al almacén luego de su reparación (overhaul) en los talleres. El TAT será la suma del tiempo que toma retirar y enviar el componente desde la operación minera al taller, más el tiempo que toma repararlo y más el tiempo que toma regresar el componente a los almacenes de la operación minera.

2.8.7. Promedio de ocurrencias en un evento

El promedio de demanda de reparación “ a ” que generarán “ m ” componentes operando en un periodo de tiempo TAT, será igual a la frecuencia de la demanda multiplicada por el periodo de tiempo. Así:

$$a = \lambda TAT,$$

$$a = \frac{m}{TBO_{dias}} TAT,$$

2.8.8. Probabilidad de demanda de reparación de “k” componentes

Para este modelo se asume que la demanda de componentes responde a la distribución de Poisson con una media de ocurrencias “a”, por lo que la probabilidad de que exactamente “k” componentes “demanden ser reparados” en un periodo igual a TAT será:

$$p(x = k) = \frac{(\lambda TAT)^k e^{-\lambda TAT}}{k!},$$

2.8.9. Nivel de servicio

El estudio del nivel de servicio es tan antiguo como la teoría de inventarios y ha generado muchas definiciones e interpretaciones en las fuentes revisadas; en términos generales se puede decir que es una medida de la respuesta del inventario ante una demanda (cliente).

Para este estudio, el nivel de servicio representa la probabilidad de tener un componente o repuesto a mano cuando es necesitado. Dos expresiones son encontradas para esta definición, se resumen sus características en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Expresiones matemáticas para el nivel de servicio asociado a probabilidades.

Expresión matemática Nivel de Servicio (estado estacionario, proceso de Poisson)	$F(k) = \sum_{i=0}^{k-1} p(i)$	$R(k) = \sum_{i=0}^k p(i)$
¿Qué sucede cuando el inventario es S=0?	El nivel de servicio es cero.	El nivel de servicio tiene un valor positivo.
Otras denominaciones en los textos	Expected fill rate (Sherbrooke, 2004), expected confidence of no-shortage (Kilpi, P.J, & Vepsalainen, 2004), Fill rate, Service level type 2	Ready rate (Muckstadt, 2005) (Sherbrooke, 2004) Instantaneous reliability of stock (Louit M., 2007)

Esta aclaración es importante ya que durante el desarrollo del presente trabajo se encontró diferencias en las bibliografías consultadas, tomar una u otra expresión podría resultar en un componente adicional.

Para el desarrollo del presente trabajo se usará la expresión para representar el nivel de servicio:

$$R(k) = \sum_{i=0}^k p(i).$$

La probabilidad acumulada de tener hasta “k” componentes que requieran ser reparados en un periodo TAT, es igual a la probabilidad de tener “k” componentes en el proceso de reparación. De este modo, el nivel de servicio que pueda satisfacer hasta “k” pedidos es:

$$R(x \leq k) = \sum_{i=0}^k p(i).$$

$$R(x \leq k) = \sum_{i=0}^k \frac{(a)^i e^{-a}}{i!}.$$

Si se establece a “S” como el nivel de inventario necesario para satisfacer un nivel de servicio mínimo de “ α ”, entonces se debe cumplir que:

$$R(S) = \sum_{i=0}^S \frac{(\lambda TAT)^i e^{-\lambda TAT}}{i!} \geq \alpha.$$

2.9. Estrategia Pooling

La estrategia Pooling se basa en las economías de escala producidas al incrementarse la cantidad de equipos. Si se consolida flotas de distintas operaciones que operan el mismo modelo de equipos, es posible alcanzar los mismos niveles de servicio con una cantidad inferior de componentes.

Adicionalmente, si existe una estrategia de Pooling la cantidad de equipos aumenta, de este modo, los eventos de demanda se pueden aproximar mejor a la distribución de Poisson.

Existen diversos métodos para abordar la estrategia Pooling. Por ejemplo, si se tuviera un almacén central y varios almacenes locales, un método apropiado para determinar el inventario es el método METRIC (Sherbrooke, 2004) o sus variantes por ejemplo, MOD-METRIC (Muckstadt, 2005).

Para este trabajo, se dimensionará el inventario de Pooling considerando un solo almacén utilizando el dimensionamiento basado en el nivel de servicio descrito en la Sección 2.8.

2.9.1. Criterios de repartición entre almacenes

Para la repartición del costo entre las compañías participantes, se utilizará este criterio para distribuir, de manera virtual, el total del inventario de Pooling. Distribución virtual, quiere decir que los componentes no se han movido de su ubicación física, solo se ha asignado una cantidad a cada participante.

Sea S_{pool_i} la cantidad de componentes que le correspondería a la operación "i", debido a la estrategia Pooling, sea R_{pool} el nivel de servicio con pooling.

Se desea minimizar la variación del nivel de servicio sin Pooling:

$$Z_{\min_{R_{pool_i}}} = \sum_{i=0}^n (R_i - R_{pool}),$$

sujeto a:

$$\sum_{i=0}^n S_{pool_i} = \#Comp. Pool,$$

$$S_{pool_i} \leq S_i,$$

$$S_{pool_i} \geq 0,$$

donde

R_i : Nivel de servicio que le corresponde a S_{pool_i} ,

$\#Comp. Pool$.: Total de componentes con la estrategia Pooling.

CAPÍTULO III

DIMENSIONAMIENTO DEL INVENTARIO DE

COMPONENTES MAYORES

El proceso de adquisición de camiones de acarreo para minería responde directamente a la necesidad de las compañías de lograr los niveles de producción deseados. Para garantizar que los equipos estén disponibles para cumplir con su propósito, es necesario mantener un stock saludable de componentes que garantice un reemplazo rápido cuando el equipo falle, de manera que se minimicen los tiempos de parada. De este modo, la venta de camiones (y equipos en general) está asociada a la venta de un stock de componentes mayores, además de un stock de repuestos, que generalmente estarán resguardados en los almacenes de las compañías mineras.

Se explica a continuación el dimensionamiento de un inventario de componentes mayores, tomando como ejemplo al motor de tracción, para una flota de 70 equipos que operarán en una compañía minera.

3.1. Dimensionamiento de componentes mayores para un centro minero

3.1.1. Caso de estudio 1

Se considera una entrega de camiones a la compañía CM1, denominada de esta forma por confidencialidad. La entrega está constituida por 70 camiones Komatsu modelo 930E-4SE. Se sabe que, independientemente de su fecha de arribo al Perú, estos equipos serán ensamblados a una frecuencia de 3 o 4 camiones por mes, lo que les da un espaciamiento razonable.

Se toma como ejemplo al motor de tracción descrito en la Sección 2.4 con un tiempo de overhaul estimado en $TBO = 19,000$ horas. Cabe recordar que el TBO es una aproximación obtenida de otras operaciones similares, el mismo que combina reemplazo por falla o reemplazo preventivo.

Cada camión tiene 02 motores de tracción, uno en el lado izquierdo y otro en el lado derecho. Para este cálculo se consideró que no necesariamente se cambian los 02 motores si uno de ellos falla. Algunos mantenedores prefieren realizar el cambio de las dos piezas aprovechando el tiempo de parada y con el objetivo de mantener a ambos motores de tracción en las mismas condiciones operativas. Sin embargo considerar que el cambio unitario es posible, ya que cada motor de

tracción opera de manera independiente del otro y la estrategia de reemplazo depende de las políticas de mantenimiento que se aplicarán.

Se considera que el overhaul del componente lo restaura a su estado original.

De los datos otorgados por el área de planeamiento de la compañía minera y de las experiencias en otras operaciones, se estima una disponibilidad física de 89% y una utilización de 85% para la flota de 70 equipos a lo largo del tiempo.

Si el motor de tracción es extraído (por falla o reemplazo preventivo) será enviado a un taller calificado para su reparación. El TAT será la suma del tiempo que toma retirar el componente del equipo y enviarlo al taller, más el tiempo que involucré evaluarlo, repararlo y regresarlo a los almacenes de la compañía minera. Para este caso el TAT para el motor de tracción se estima en 40 días.

Usando el modelo descrito en la Sección 2.8 se calculará el stock recomendado de motores de tracción para un nivel de servicio meta de $\alpha=95\%$.

3.1.2. Entradas al modelo

La Tabla 3.1 resume los datos descritos en la Sección 3.1.1 que serán utilizados en el modelo descrito en la Sección 2.8.

Tabla 3.1 Entradas al modelo (caso 1)

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
Componente	Motor de tracción
# de equipos en operación	70
# componentes/equipo	2
TBO	19,000 h
Disponibilidad media (flota)	89%
Utilización media (flota)	85%
TAT	40 días

3.1.3. Resultados: Componentes vs nivel de servicio

La Tabla 3.2 muestra el nivel de servicio en función de la cantidad de componentes. De esta manera, si se quiere brindar un nivel de servicio superior al 95% se deberá tener un stock mínimo de 9 motores de tracción, en este caso el nivel de servicio es de $R(S) = 95.36\%$.

Tabla 3.2 Número de componentes vs. nivel de servicio (caso 1)

k	p(k)	R(k)
5	0.173	55.457%
6	0.155	70.923%
7	0.118	82.747%
8	0.079	90.655%
9	0.047	95.358%
10	0.025	97.874%
11	0.012	99.098%

La Figura 3.1 ilustra de manera gráfica la dependencia sigmoide del nivel de servicio con el número de componentes.

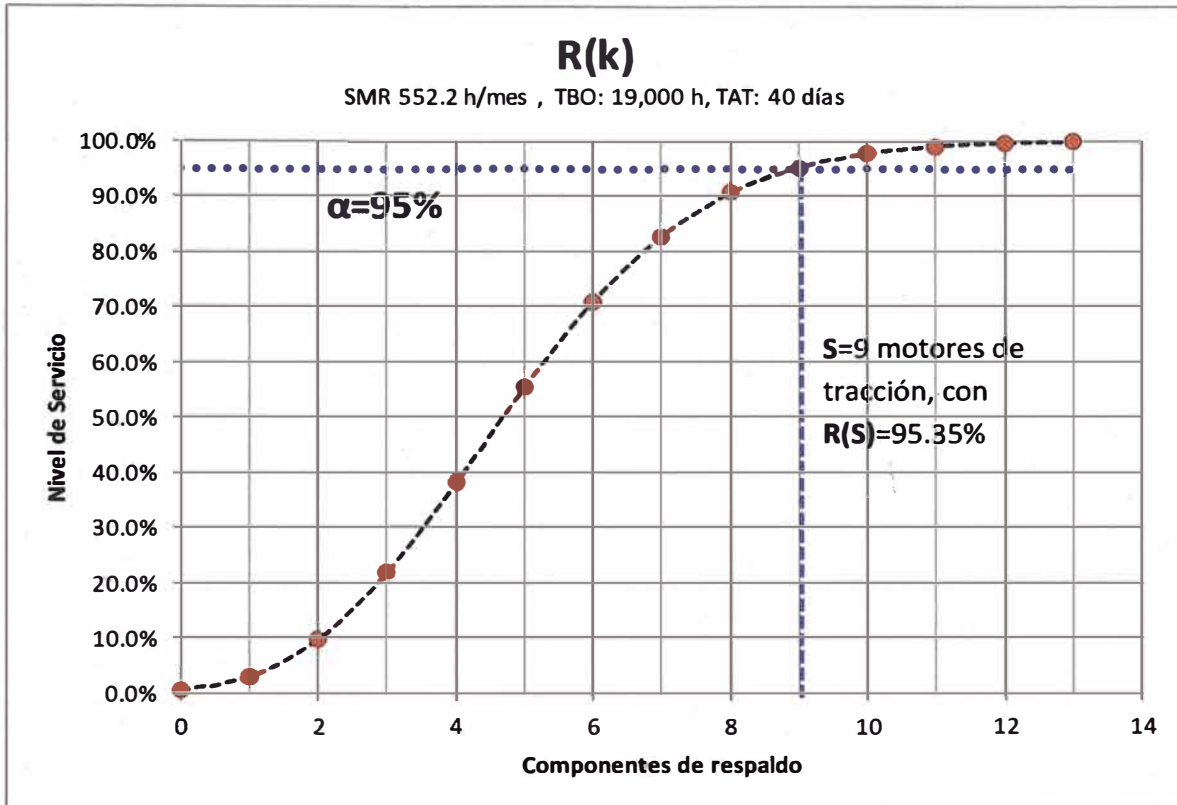


Figura 3.1 Número de componentes vs. nivel de servicio (caso 1)

3.1.4. Análisis de sensibilidad

Los parámetros asociados a cada componente están sujetos a variaciones propias de cada operación minera. Por ejemplo, la duración de los componentes (relacionada con el TBO) depende de la carga de trabajo a la que es sometido, a las políticas de mantenimiento que se estén aplicando, a la calidad de los trabajos de mantenimiento realizado; el

nivel de monitoreo aplicado para establecer el momento de reemplazo, entre otras variables. Del mismo modo, el tiempo de retorno del componente, denotado por TAT, puede ser modificado por demoras logísticas en el transporte, por daños críticos encontrados durante la reparación, entre otros. Es por ello, que se revisará la influencia de los parámetros TBO, TAT y SMR en el tamaño “S” de inventario sugerido. El análisis de sensibilidad se realiza para cada parámetro, manteniendo los otros parámetros constantes.

Como aporte de este trabajo, se presenta un diagrama que relaciona los diversos parámetros del modelo con el tamaño del inventario sugerido “S” para un rango de niveles de servicio.

3.1.4.1. Cantidad de componentes en función del uso por mes

Las horas de operación al mes están sujetas a las variaciones de disponibilidad física y utilización. La Figura 3.2 muestra que con un inventario de 9 motores de tracción se puede cubrir un amplio rango de horas de operación entre [480, 610] h/mes. También se observa que a menor número de horas de operación, para un mismo nivel de servicio se requerirían menos componentes de respaldo.

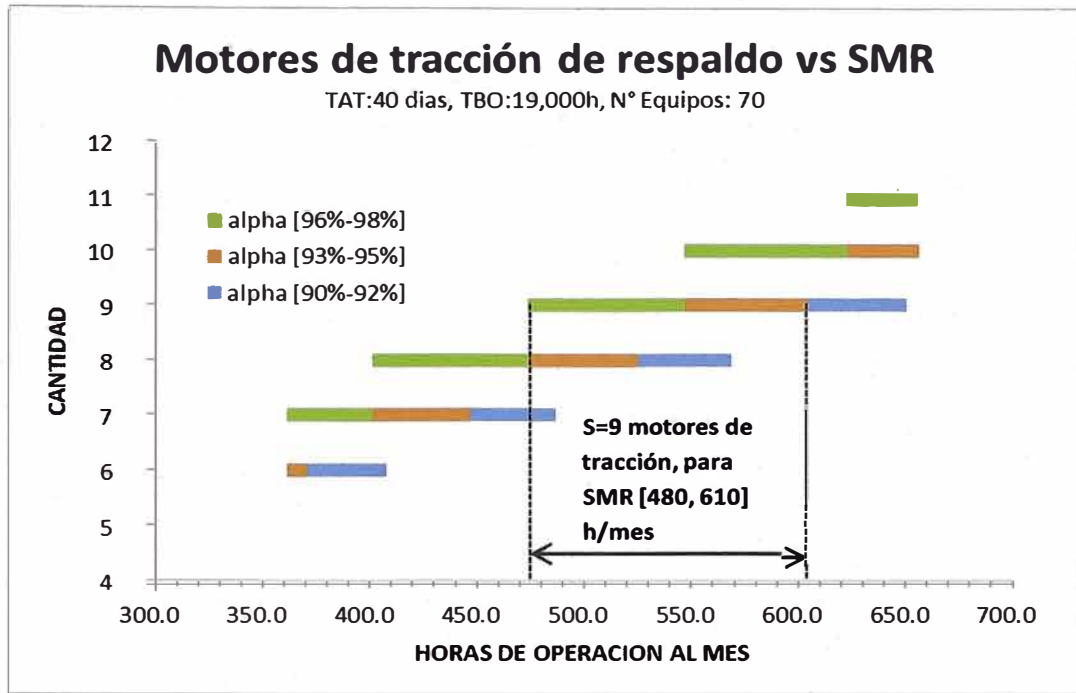


Figura 3.2 Cobertura del nivel de servicio a variaciones de las horas mensuales

3.1.4.2. Cantidad de componentes en función del TBO

Ya que el TBO es producto de análisis de otras operaciones similares, es propicio analizar la variación del tamaño de inventario en función del TBO. La Figura 3.3 muestra que una variación del TBO en +/- 10%, no afectará el resultado del dimensionamiento de inventario. Para este caso, una variación del TBO de +/- 10% esto equivale a una ventana de 8 meses de operación.

Por otro lado, se observa que la dependencia entre la cantidad de componentes es inversa al TBO, es decir a mayor

TBO, menor es la cantidad de componentes de respaldo requeridos.

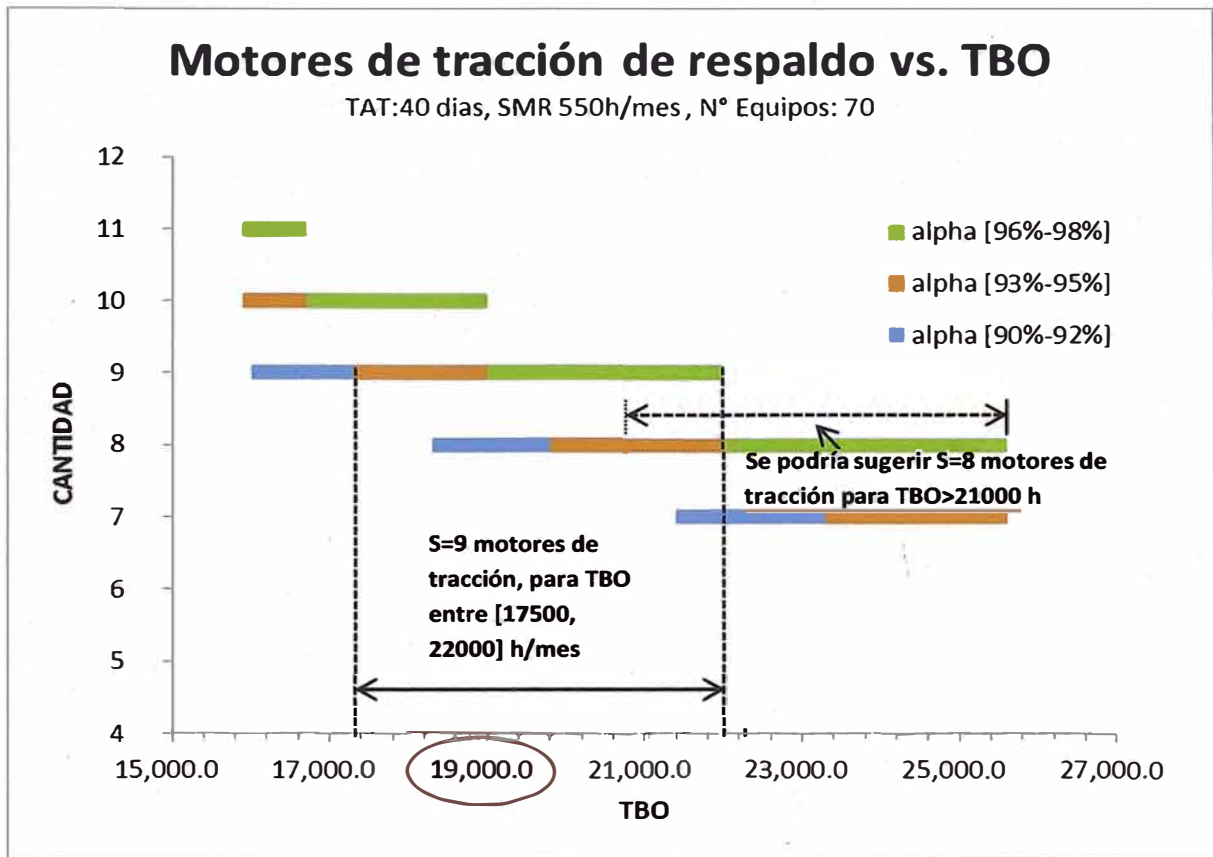


Figura 3.3 Cobertura del nivel de servicio a variaciones del tiempo entre reemplazos

3.1.4.3. Cantidad de componentes en función del TAT

El tiempo de retorno del componente TAT puede variar producto de las demoras logísticas en el transporte, por daños críticos encontrados durante la reparación, por demoras en los pedidos de repuestos para reparar el componente, por demoras en la aprobación del presupuesto de reparación, entre otros.

Los resultados mostrados en la Figura 3.4 revelan que el TAT es el parámetro que tiene mayor impacto en la cantidad de componentes, al punto que un retraso unas semanas, podría incrementar la cantidad de componentes en 01 unidad.

De la Figura 3.4 se desprende una conclusión importante: Para gestionar adecuadamente el inventario de componentes, hay que realizar un análisis a los tiempos de reparación del componente así como a los tiempos de transporte, ya que afectan de manera pronunciada al inventario.

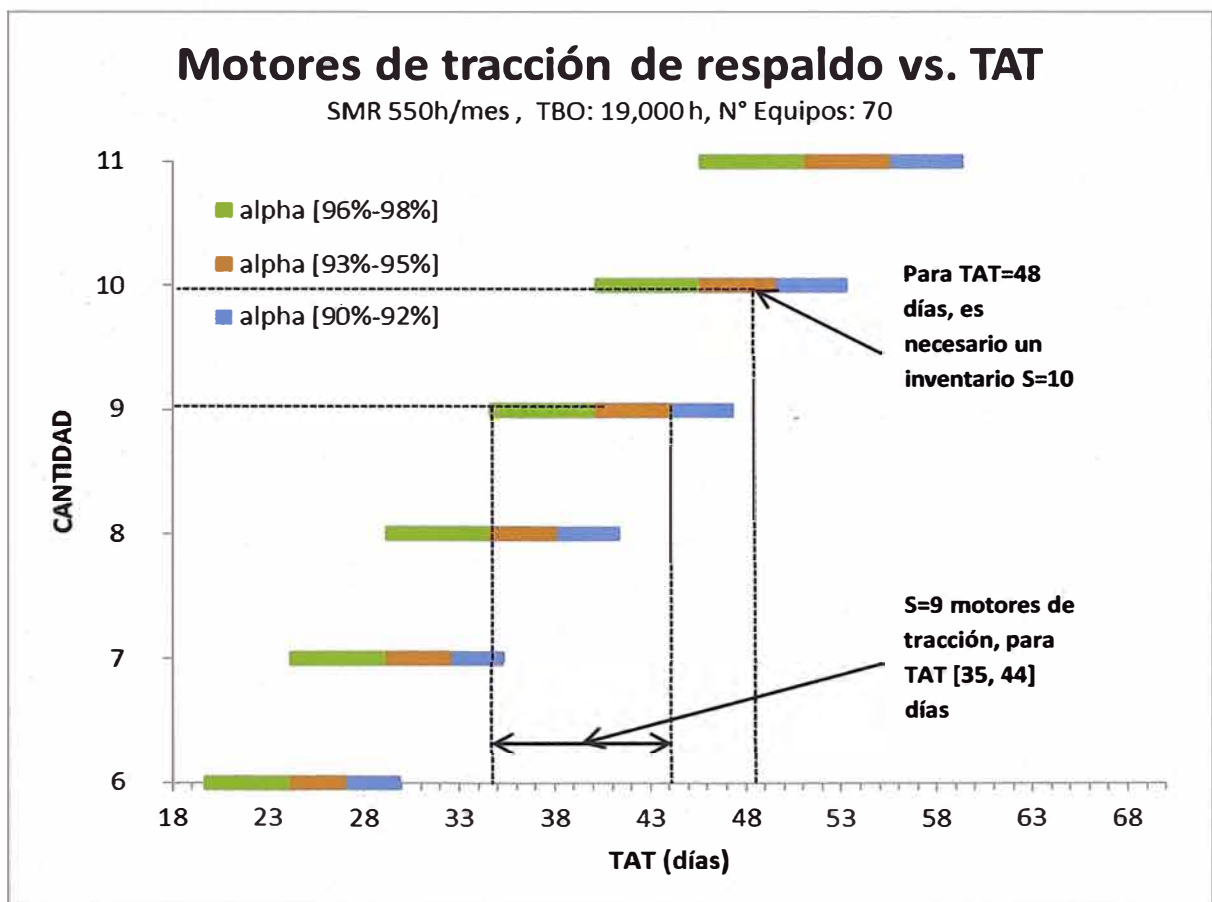


Figura 3.4 Cobertura del nivel de servicio a variaciones del tiempo logístico TAT

3.2. Dimensionamiento para múltiples centros mineros, stock individual

3.2.1. Caso de estudio 2

La Tabla 3.3 muestra una adaptación de la población de equipos Komatsu 930E-X en el Perú hasta la fecha, las compañías mineras han sido denominadas CM1, CM2, CM3, CM4 y CM5 por motivos de confidencialidad.

Tabla 3.3: Adaptación de la población de equipos mineros de acarreo 930E-X

Modelo- versión	Centro minero	Cantidad de equipos
930E-4SE	CM1	70
930E-4SE	CM2	9
930E-4/ 930E-3	CM3	15
930E-4SE	CM4	30
930E-4/ 930E-3	CM5	27

Pese a tener diferentes “edades” y ser de diferentes versiones, los camiones eléctricos Komatsu 930E-3, 930E-4 y 930E-4SE comparten algunos componentes como los citados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Componentes mayores en común, equipos Komatsu 930E-3/-4/4SE

NP	Descripción
SAPKM0001	Cilindro de levante
SAPKM0002	Motor de tracción
SAPKM0003	Motor de enfriamiento de parrillas
SAPKM0004	Suspensión posterior
SAPKM0005	Suspensión delantera
SAPKM0006	Spindle, hub and brake

Para este caso de estudio, se analizará el cilindro de levante con un TBO de estimado de 18,000 h.

Cada operación tiene particularidades de clima, políticas de seguridad, estrategias de mantenimiento, temas sociales, entre otros. Por lo cual los factores de utilización y disponibilidad difieren entre una operación y otra, la Tabla 3.5 muestra la estimación de disponibilidad física y utilización para cada centro minero.

Tabla 3.5: Adaptación de la disponibilidad física y utilización por centro minero

Operación Minera	Disponibilidad Física	Utilización
CM1	89%	85%
CM2	90%	85%
CM3	86%	83%
CM4	90%	87%
CM5	88%	84%

3.2.2. Entradas al modelo

Los datos anteriores se resumen en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Entradas al modelo, dimensionamiento para cada centro minero (caso 2)

Parámetro	Descripción
Componente	Cilindro de Levante
# de equipos en operación	Tabla 4.3
# componentes/equipo	2
TBO	18,000 h
Disponibilidad promedio del equipo	Tabla 4.5
Utilización del equipo (respecto del tiempo disponible)	Tabla 4.5
TAT	35 días

3.3. Desempeño de los modelos empíricos

A la fecha, los modelos empíricos, también conocidos como “reglas del pulgar”, siguen siendo utilizados por las áreas de mantenimiento y gestión de repuestos como método para estimar las cantidades de componentes de respaldo necesarias.

Uno de los objetivos de este trabajo es comparar el desempeño del dimensionamiento basado en el nivel de servicio con cuatro conocidas reglas empíricas descritas en la Sección 2.7.

3.3.1. Comparación entre reglas empíricas

Las reglas conocidas toman como parámetro el tamaño de flota “n”. A fin de comparar las reglas empíricas con el dimensionamiento basado en el nivel de servicio, se usará el mismo diagrama presentado en Sección 3.2 pero tomando como parámetro de sensibilidad al tamaño de flota (n).

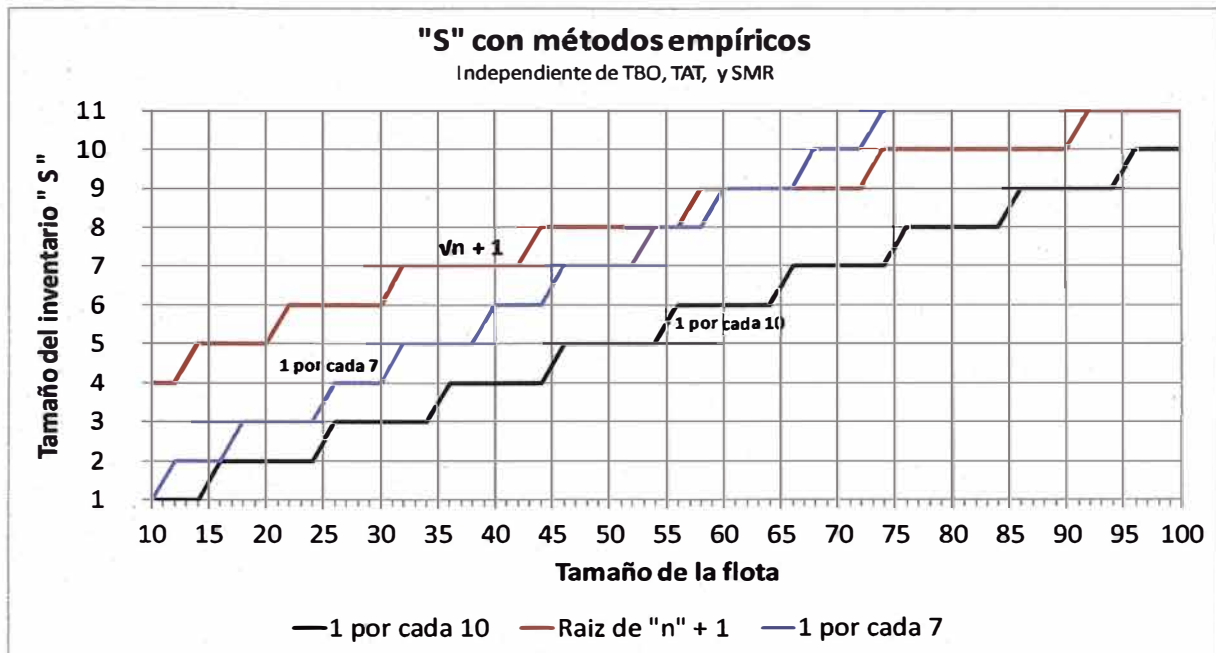


Figura 3.5: Comparación entre reglas empíricas 1,2 y 3

La Figura 3.5 muestra el tamaño sugerido de inventario "S" en función del tamaño de la flota para las reglas empíricas 1,2 y 3. Como se aprecia, los métodos empíricos no presentan ninguna relación entre sí, por lo que adoptar uno u otro método dará resultados muy diferentes.

Por otro lado, los niveles más altos de stock, están asociados a niveles más altos de nivel de servicio. De modo que, en base a la Figura 3.5, se puede ordenar los métodos empíricos en función de su nivel de "seguridad" de la siguiente forma:

Hasta 65 equipos:

$$\sqrt{n} + 1 > (1 \text{ por cada } 7) > (1 \text{ por cada } 10).$$

Para más de 65 equipos (hasta 100):

$$(1 \text{ por cada } 7) > \sqrt{n} + 1 > (1 \text{ por cada } 10).$$

Los métodos empíricos citados, no toman en consideración el tiempo medio entre reemplazos, el tiempo de retorno TAT o las horas de operación del equipo, por lo que no se deberían aplicar indiscriminadamente para cualquier componente.

3.3.2. Análisis de sensibilidad del modelo polinómico

Se realizó el análisis de sensibilidad para el modelo polinómico de manera similar al análisis descrito en la Sección 3.1.4. Se encontró que la influencia del porcentaje de confiabilidad (%C) (Figura 3.6) es muy marcada en los resultados que proporciona el modelo polinómico. Como se mencionó en la Sección 2.7 el porcentaje de confiabilidad está relacionado con el TBO por la curva de confiabilidad, la misma que se construye a partir de información histórica.

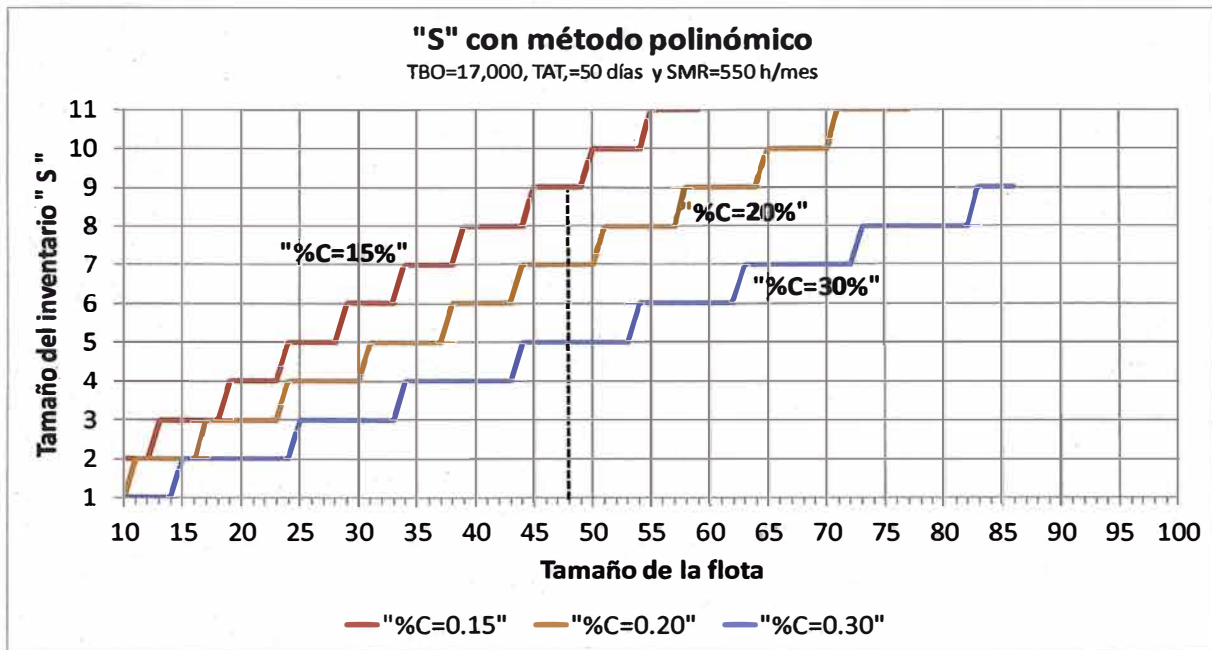


Figura 3.6: Método polinómico para diversos %C

Si se toma como ejemplo un tamaño de flota 48 equipos, se tendrá los siguientes resultados:

TBO:17000h con %C: 15%:	9 componentes
TBO:17000h con %C: 20%:	7 componentes
TBO:17000h con %C: 30%:	5 componentes

Por ello se deduce que la aplicación de este modelo debe estar restringida a los casos en los cuales se cuenta con información suficiente y altamente confiable del centro minero específico a analizar.

Para comparar los cuatro métodos empíricos con el modelo descrito en la Sección 2.8 se plantea el siguiente caso de estudio:

3.3.3. Caso de estudio 3

Cada camión eléctrico Komatsu 930E-4SE cuenta con un alternador principal como el descrito en la Sección 2.2. Para este componente se estima un tiempo TAT de 50 días y un TBO de 17,000 horas, para un porcentaje de supervivencia $\%C=50\%$. Se realizará el dimensionamiento del inventario de este componente para la entrega de 70 equipos al centro minero designado como CM1. Tomando los mismos porcentajes de disponibilidad y utilización que en caso de estudio planteado en la Sección 3.1, se elaboró la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Entradas al modelo basado en nivel de servicio (caso 3)

Parámetro	Descripción
Componente	Alternador Principal
# de equipos en operación	70
# componentes/equipo	1
TBO	17,000 h
Disponibilidad media (flota)	89%
Utilización media (flota)	85%
TAT	50 días

3.3.3.1. Resultados aplicando los modelos empíricos

Los resultados aplicando los modelos empíricos descritos en la Sección 2.7 son de fácil deducción y se resumen en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Resultados por modelos empíricos (caso 3)

Descripción	Fórmula	Inventario “S” para n=70
Modelo empírico 1	$\frac{n}{7}$	10
Modelo empírico 2	$\frac{n}{10}$	7
Modelo empírico 3	$\sqrt{n} + 1$	9
Modelo polinómico	$S = \frac{SMR_{mes} \cdot m \cdot TAT}{2 \cdot TBO \cdot \%C. (30.41)} + m \cdot 1.5\%$	5

3.3.3.2. Resultados aplicando el modelo basado en nivel de servicio

Con los parámetros que se muestran en la Tabla 3.2, se obtiene como resultado un inventario “S” de 7 componentes para un nivel de servicio $R(S)=96.30\%$. El detalle del resultado para este modelo se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Resultados según modelo basado en el nivel de servicio (caso 3)

k	p(k)	R(k)
4	0.194	67.987%
5	0.145	82.462%
6	0.090	91.480%
7	0.048	96.296%
8	0.023	98.546%
9	0.009	99.481%
10	0.003	99.830%
11	0.001	99.949%

3.3.3.3. Comparativo para el caso 3

Los resultados obtenidos por las reglas empíricas y por el método de dimensionamiento basado en el nivel de servicio se resumen en la Figura 3.7. Para este caso de estudio la regla empírica 2, brinda la mejor aproximación, mientras que las reglas empíricas 1 y 3 sugieren inventarios elevados que corresponderían a metas de niveles de servicio más exigentes.

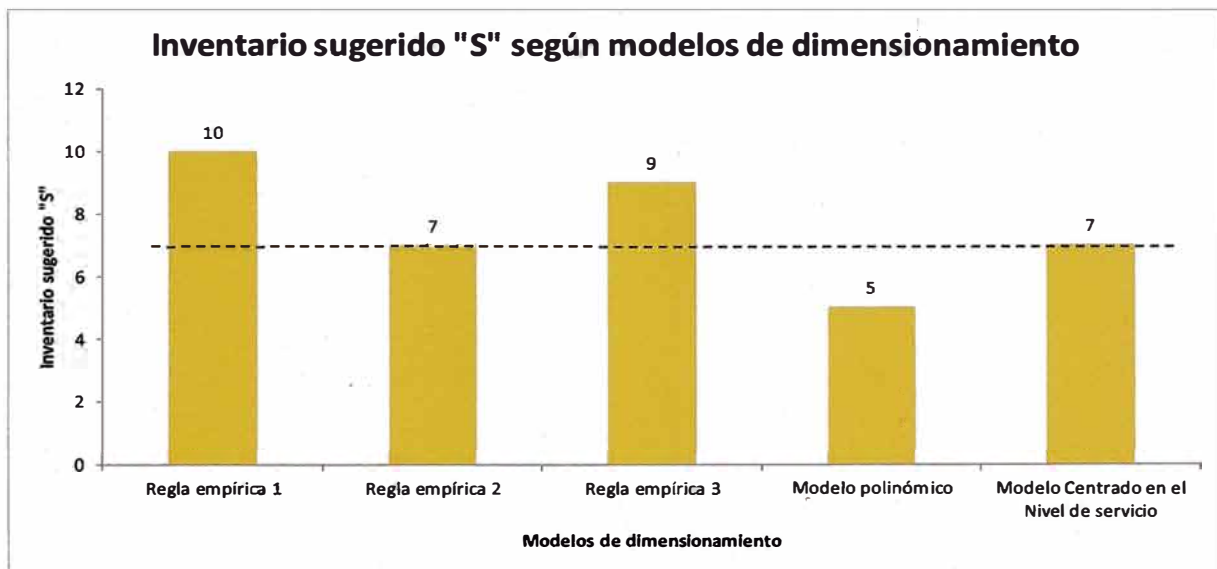


Figura 3.7 Comparativo de inventario sugerido "S" por modelos (caso 3)

De los resultados, no se puede afirmar que la regla empírica 2 sea la que brinda resultados similares al modelo 2.8 para todos los casos; ya que como se vio en la Sección 3.2 un cambio en los parámetros del modelo 2.8, como por ejemplo el tiempo entre overhaul (TBO) o el tiempo de retorno (TAT), dará

como resultado un tamaño de inventario “S” diferente. Mientras que, los resultados de las reglas empíricas solo dependen del tamaño de la flota; es decir, no cambiarán si se modifica el TBO o el TAT.

Para reforzar la idea anterior, si se modifica levemente el TBO a 18,000 y el TAT a 45 días, se obtendría como resultado $S=6$ componentes para el modelo por nivel de servicio y $S=4$ para el modelo polinómico. Resultado que reafirma la idea expuesta en el párrafo anterior.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE LA ESTRATEGIA POOLING DE INVENTARIOS

Como se mencionó previamente, las altas pérdidas ocasionadas por paradas de equipos son aliviadas mediante el reemplazo inmediato de cualquier componente que falla por uno operativo en inventario (stock). Tener la cantidad suficiente de stock de componentes es necesario a pesar de su alto costo y baja rotación.

Intuitivamente, tiene sentido para compañías del mismo rubro y operando los mismos equipos, compartir un gran stock de componentes.

Pese a los beneficios que pueden surgir del hecho de compartir inventarios, aún no es una práctica muy común entre las compañías. Algunos posibles motivos para no compartir un stock pasan por que los gerentes no están seguros de los ahorros que implican o por pensar que los grandes grupos terminarán subsidiando los beneficios a compañías más pequeñas o que las demás compañías no serán honestas en compartir

su información sobre el estado de los componentes, o por pensar que los nuevos miembros recibirán más beneficios al acceder al pool comparado con los beneficios que aportarían. Sin embargo, si existiera un único administrador del inventario, por ejemplo el distribuidor de los equipos, las compañías participantes no tendrían las posibles preocupaciones citadas. Es decir, administrar un pool de componentes representa una oportunidad de negocio.

Para comenzar, se evaluará numéricamente los ahorros ocasionados por las economías de escala al consolidar un inventario de componentes.

4.1. Dimensionamiento del inventario basado en una estrategia Pooling

4.1.1. Caso de estudio 4

Para comprender las economías de escala generadas al tomar en cuenta una mayor cantidad de equipos; se analiza el caso en que el inventario para suplir a todas las compañías se mantiene en un almacén centralizado, que podría ser administrado por el distribuidor de equipos.

En la Sección 3.2, se realizó el cálculo de inventario para las operaciones mineras en el Perú con equipos Komatsu 930E-X. Continuando nuevamente con este caso (cilindro de levante) para un TBO de 18,000 horas con un tiempo de retorno TAT de 35 días. Teniendo en cuenta la adaptación de la flota de camiones Komatsu 930E-X en Perú mostrada en la Tabla 3.3, se tiene un total de 151 equipos operando en el

Perú. Para la disponibilidad física y la utilización se tomará en cuenta los datos proporcionados en la Tabla 3.5.

Se calculará el nivel de inventario necesario para soportar a toda la flota en conjunto, para un nivel de servicio deseado de $\alpha = 95\%$.

4.1.2. Entradas al modelo

La Tabla 4.1 muestra los parámetros de entrada para el modelo descrito en la Sección 2.8.

Tabla 4.1: Entradas al modelo considerando Pooling

Parámetro	Descripción
Componente	Cilindro de levante
# de equipos en operación	151
# componentes/equipo	2
TBO	18,000 h
Disponibilidad promedio de la flota país	88.7%
Utilización promedio de la flota país	86.4%
TAT	35 días

4.1.3. Resultados: Cantidad de componentes vs nivel de servicio

Según los resultados mostrados en la Tabla 4.2 para ofrecer un nivel de servicio superior al 95% se deberá tener un stock mínimo de 16 cilindros de levante, con un nivel de servicio de $R(S_1) = 95.10\%$. Se observa que con 17 cilindros de levante se obtiene un nivel de servicio de $R(S_2) = 97.23\%$. En esta oportunidad se sugerirá 17 cilindros de levante para garantizar un mejor servicio.

Tabla 4.1: Resultados del dimensionamiento (caso 4)

k	p(k)	R(x≤k)
13	0.089	79.940%
14	0.069	86.815%
15	0.049	91.765%
16	0.033	95.106%
17	0.021	97.229%
18	0.013	98.503%
19	0.007	99.227%
20	0.004	99.618%

Para repartir este pool de manera virtual, se utiliza el criterio de repartición entre almacenes descrito en la Sección 2.9.1. Es decir distribuir los componentes de manera que la variación total de los niveles de servicio para cada operación sea mínima. El problema se resuelve en Lingo obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Repartición virtual del inventario en Pooling (caso 4)

Con Pooling (caso 4)			
CENTRO MINERO	TAMAÑO DE FLOTA	Cilindro de levante (k_{pool_t})	Nivel de servicio R_{pool_t}
CM1	70	7	85.41%
CM2	9	1	86.38%
CM3	15	2	91.98%
CM4	30	4	92.83%
CM5	27	3	88.28%
TOTALES	151	17	$R_{pool} = 97.22\%$

R_{pool_t} representa el nivel de servicio que corresponde a 7 cilindros de levante si estuviesen ubicados en la operación minera CM1. Para alcanzar el nivel de servicio deseado de $\alpha=95\%$, se deberá tomar un

componente asignado a otra operación, cuando sea necesario. Por ello la estrategia de Pooling requerirá de una administración de la demanda y de un seguimiento exhaustivo del estado y ubicación de cada componente.

4.1.4. Comparativo del dimensionamiento con Pooling vs sin Pooling

Si se combina los resultados mostrados en la Tabla 3.7, para el caso de dimensionamiento “sin Pooling”, y los resultados mostrados en la Tabla 4.2, para el caso “con Pooling”, se genera la Tabla 4.3 para comparar los resultados numéricamente.

Tabla 4.3: Comparativo del dimensionamiento Sin Pooling/Con Pooling

CENTRO MINERO	TAMAÑO DE FLOTA	Sin Pooling (caso 2)		Con Pooling (caso 4)	
		Cilindro de levante (S_i)	Nivel de servicio $R(S)$	Cilindro de levante (S_{pool_i})	Nivel de servicio R_{pool_i}
CM1	70	9	96.37%	7	85.41%
CM2	9	2	97.24%	1	86.38%
CM3	15	3	98.10%	2	91.98%
CM4	30	5	97.54%	4	92.83%
CM5	27	4	95.97%	3	88.28%
TOTALES	151	23	$\bar{R} = 97.04\%$	17	$R_{pool} = 97.22\%$

Los resultados en la estrategia Pooling muestran 17 cilindros de levante en comparación con los 23 si fueran flotas separadas, eso representa un ahorro del 35%. En el capítulo siguiente se estudia los impactos económicos.

La Figura 5.1 ilustra de manera gráfica los ahorros numéricos obtenidos.

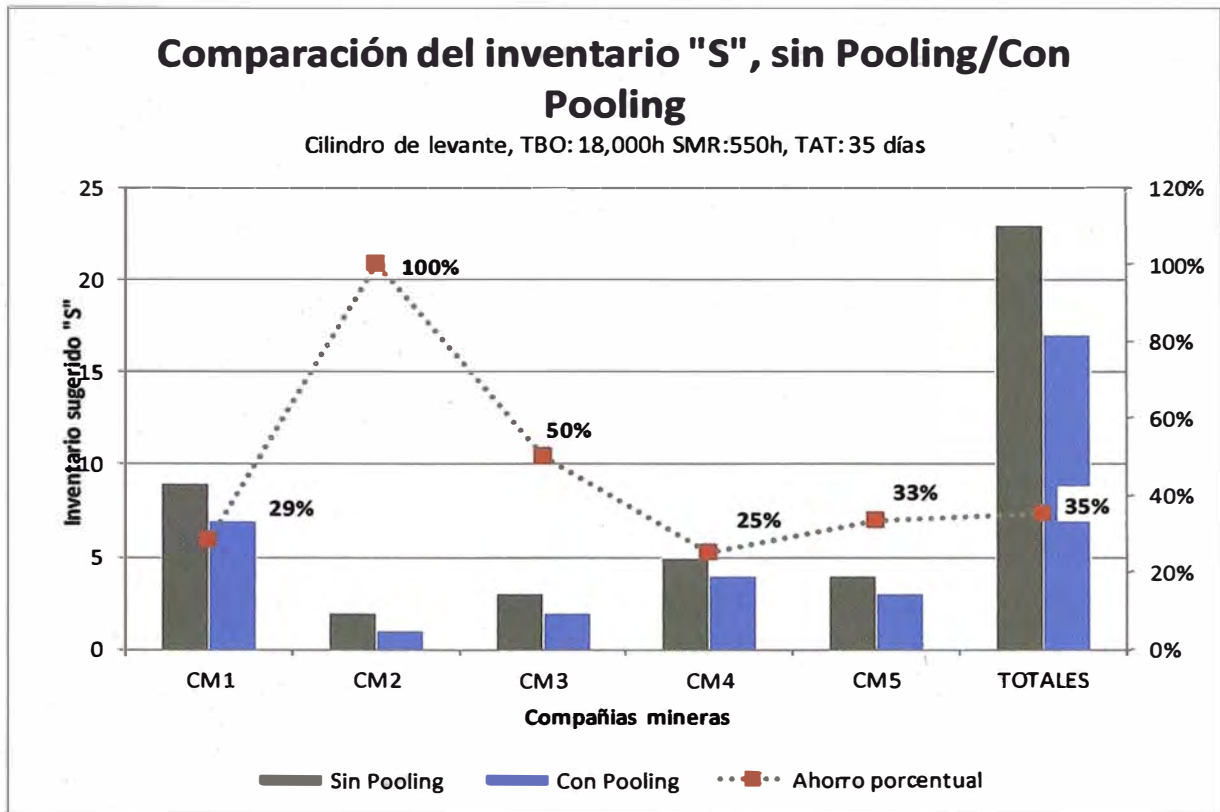


Figura 5.1 Comparativo del tamaño de inventario con Pooling/sin Pooling (caso 2 y caso 4)

Si bien la estrategia Pooling trae consigo un ahorro en la inversión, también se puede plantear la opción de elevar el nivel de servicio aun manteniendo el ahorro de componentes. Por ejemplo, se podría tener **19 componentes** para un nivel de servicio del $\alpha=99.22\%$.

Aunque para este análisis se ha considerado que todo el inventario estará concentrado en un solo almacén, realizar la repartición virtual del inventario es necesario para asignar los costos del inventario a cada centro minero, esta distribución de costos se muestra en el Capítulo V.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se comparan diferentes escenarios de venta para los componentes calculados en el caso 1. Además se estima el costo que implica la parada de un equipo de acarreo y se usan ambos cálculos para comparar el costo de adquirir un inventario de seguridad vs. el costo por no contar con un inventario.

Para la estrategia Pooling se realiza un comparativo económico de los beneficios que obtendría cada compañía minera, y se muestra un criterio para la repartición de los costos asociados.

Bajo este mismo criterio, se determina un precio de alquiler en función de la cantidad de equipos que sería de utilidad si un prestador de servicios decide adquirir el inventario y ofrecer un servicio de alquiler.

5.1. Escenarios de venta del inventario

5.1.1. Caso de estudio 5

Se considera la operación minera CM1 a la cual se realizará una entrega de 70 camiones mineros 930E-4SE. Los equipos tienen un ingreso gradual a la operación, a una tasa de 3 equipos por mes. La Figura 5.1 muestra las fechas de puesta en operación hasta llegar al total de la flota.

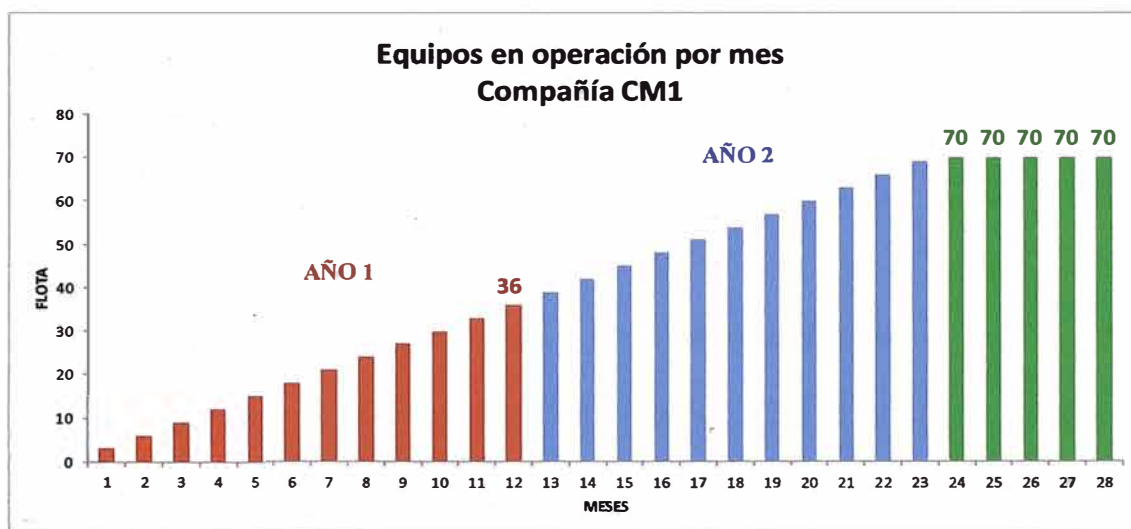


Figura 5.1 Ingreso de equipos por mes, caso 5

Se analizan algunas opciones de adquisición de los componentes dimensionados para el caso de estudio 1 (Sección 3.1.1), donde se obtuvo como resultado que 9 motores de tracción brindarán un nivel de servicio $R(S) = 95.36\%$.

Cabe destacar que desde el punto de vista de la compañía minera se realizará una adquisición, y desde el punto de vista del vendedor de equipos, se realizará una venta.

Para este caso se considera que el precio de venta de un motor de tracción es de 900,000 dólares. Asimismo, se considera un incremento anual del 6% en los precios de venta. Ambos datos corresponden a aproximados manteniendo la confidencialidad de las cifras reales.

La tasa de actualización para el VAN se estima en $t=8\%$ anual y la tasa efectiva de intereses para financiar una venta en 10% anual (TEA).

5.1.2. Venta en dos partes

En el primer año (meses 1 al 12) se tendrá un acumulado de 36 equipos y al finalizar el segundo año (meses 13-24) se completará la flota de 70 equipos. Debido a restricciones de presupuesto se evalúa la opción de adquirir los 09 componentes de respaldo sugeridos, en dos partes, según la Figura 5.2.

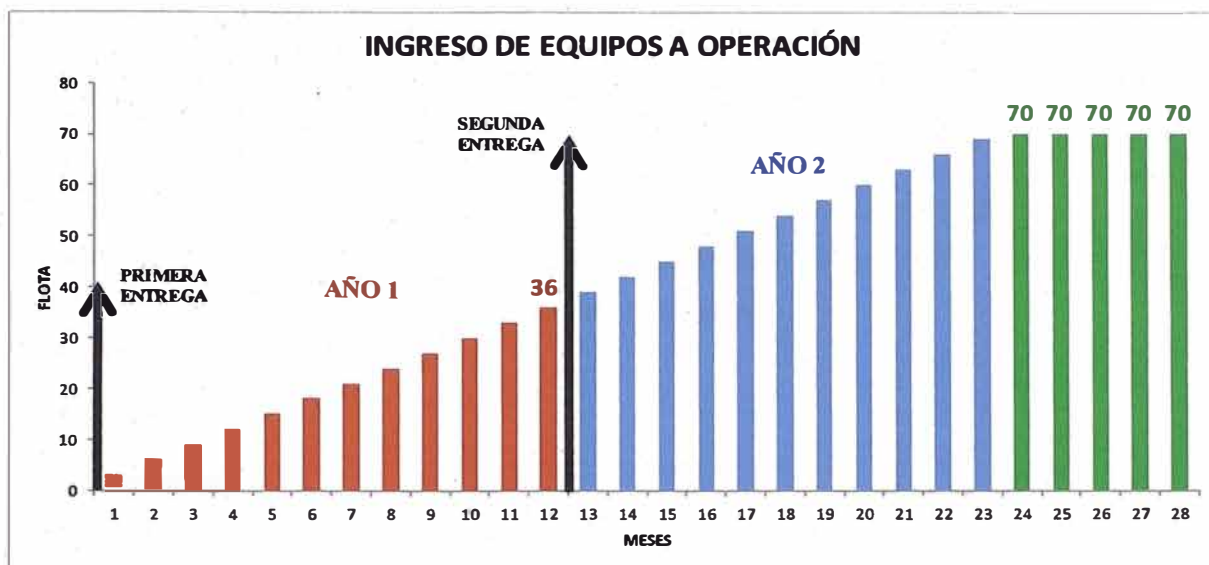


Figura 5.2 Entrega de componentes en 2 partes

Para determinar cuántos componentes se deberá adquirir para el año 1, se calcula la cantidad de componentes requeridos para la flota de ese año (36 equipos). Los datos a ingresar al modelo son los mostrados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros del modelo para año 1 (caso 5)

Parámetro	Descripción
Componente	Motor de tracción
# de equipos en operación	36
# componentes/equipo	2
TBO	19,000 h
Disponibilidad promedio de la flota	89%
Utilización promedio de la flota país	85%
TAT	40 días

Esta vez los resultados (Figura 5.3) se muestran en función de la cantidad de equipos, manteniendo los demás parámetros constantes.

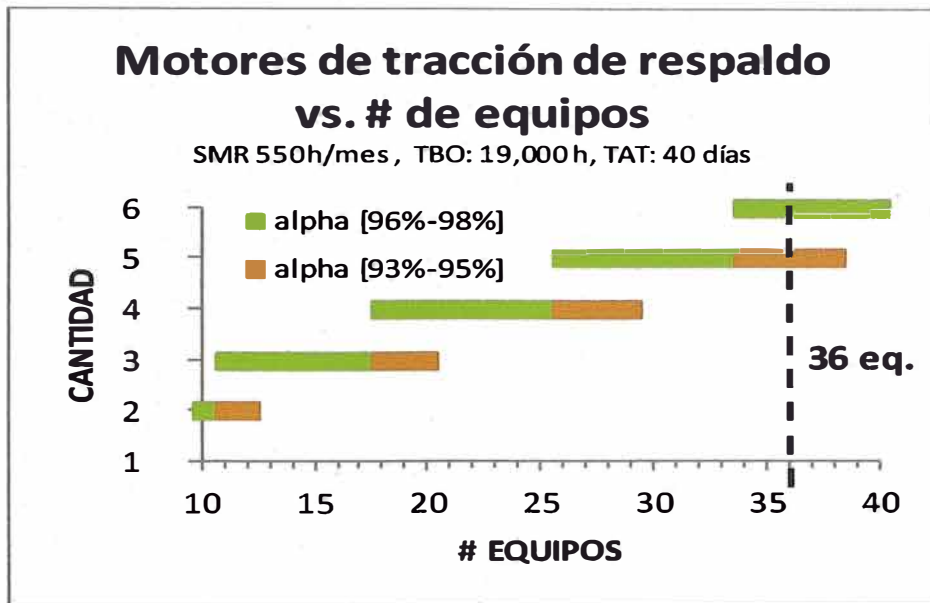


Figura 5.3 Resultados del dimensionamiento para el año 1 (caso 5)

Se observa que para 36 equipos se puede tener 5 o 6 componentes dependiendo del nivel de servicio que se quiera asegurar. Para el análisis económico se considera que el cliente decide comprar 5 componentes para el primer año con $R(s)=94.1\%$ que sería una cantidad aceptable ya que los equipos son nuevos y no deberían presentar muchas paradas significativas en el primer año.

La Tabla 5.2 muestra el valor neto actual de la inversión que servirá para comparar esta opción de venta con otras alternativas.

Tabla 5.2 VAN para la venta en 2 partes (caso 5)

		AÑO 0	AÑO 1
PRECIO	Precio unitario inicial	900,000	900,000
	Incremento anual (6%)	-	54,000
	Precio unitario [USD/unidad]	900,000	954,000
CANTIDAD	Cantidad [unidades]	5	4
VENTA	Total [USD]	4,500,000	3,816,000
	VAN (tasa 8%) [USD]	8,033,333	

5.1.3. Venta completa con descuento

Como parte de una oferta atractiva, el proveedor decide ofrecer un descuento del 5% por la compra inmediata del total de componentes, la Tabla 5.3 muestra el VAN para esta alternativa, ya que la venta se realiza al inicio del periodo, el VAN es igual al precio de venta total.

Tabla 5.3 VAN para la venta con descuento (caso 5)

		AÑO 0
PRECIO	Precio unitario inicial	900,000
	Descuento por compra (-5%)	- 45,000.00
	Precio unitario [USD/unidad]	855,000
CANTIDAD	Cantidad [unidades]	9
VENTA	Total [USD]	7,695,000
	VAN (tasa 8%) [USD]	7,695,000

5.1.4. Venta en dos partes con congelamiento de precios

En caso de existir un acuerdo para el congelamiento de precios se tendrá que el precio de la segunda entrega es el mismo que el precio de entrega de la primera. La Tabla 5.4 muestra en VAN para esta alternativa.

Tabla 5.4 VAN para la venta con precios congelados (caso 5)

		AÑO 0	AÑO 1
PRECIO	Precio unitario inicial	900,000	900,000
	Congelamiento (0%)	-	-
	Precio unitario [USD/unidad]	900,000	900,000
CANTIDAD	Cantidad [unidades]	5	4
VENTA	Total [USD]	4,500,000	3,600,000
	VAN (tasa 8%) [USD]	7,833,333	

5.1.5. Venta por financiamiento en cuotas

Otro esquema posible es la financiación y pago a través de cuotas mensuales. Para este caso se consideró la compra en dos partes y tiempo de pago hasta el año 5, es decir la primera entrega se financia en 5 años y la segunda en 4, la tasa de financiamiento aplicada es de 10% anual. La Tabla 5.5 resume el cálculo para esta alternativa.

Tabla 5.5 VAN con financiamiento hasta 5 años (caso 5)

		AÑO 0	AÑO 1
PRECIO	Precio unitario inicial	900,000	900,000
	Incremento anual (6%)	-	54,000
	Precio unitario [USD/unidad]	900,000	954,000
CANTIDAD	Cantidad [unidades]	5	4
VENTA	Total [USD]	4,500,000	3,816,000
CUOTAS	Periodos [meses]	60	48
	Cuota mensual (TEA 10%)	94,660.1	95,995.6
	VAN (tasa 8%) [USD]	8,359,902	

5.1.6. Comparativo de las opciones de venta

Como era de esperar, la adquisición por financiamiento implica costos mayores, pero brinda la posibilidad de realizar la compra sin comprometer una gran inversión inicial.

La adquisición por descuento es la más cómoda pero requiere de la disposición inmediata del capital.

La adquisición en 2 partes es una opción intermedia pero está sujeta al incremento de precios anuales que sufren todos los productos. Por otra parte, el congelamiento de precios no es frecuente, pero si se da esta asociado a compromisos de negocio adicionales.

Los resultados de este análisis son de carácter ilustrativo solamente; ya que aplica específicamente al caso de un ítem, como lo es el motor de tracción, la venta o adquisición se debe evaluar respecto al total de la oferta comercial. Adicionalmente, esta evaluación está sujeta a factores como los porcentajes de incremento, descuento y tasa de financiación que varían para distintas condiciones comerciales. El VAN menor será el preferido por el comprador.

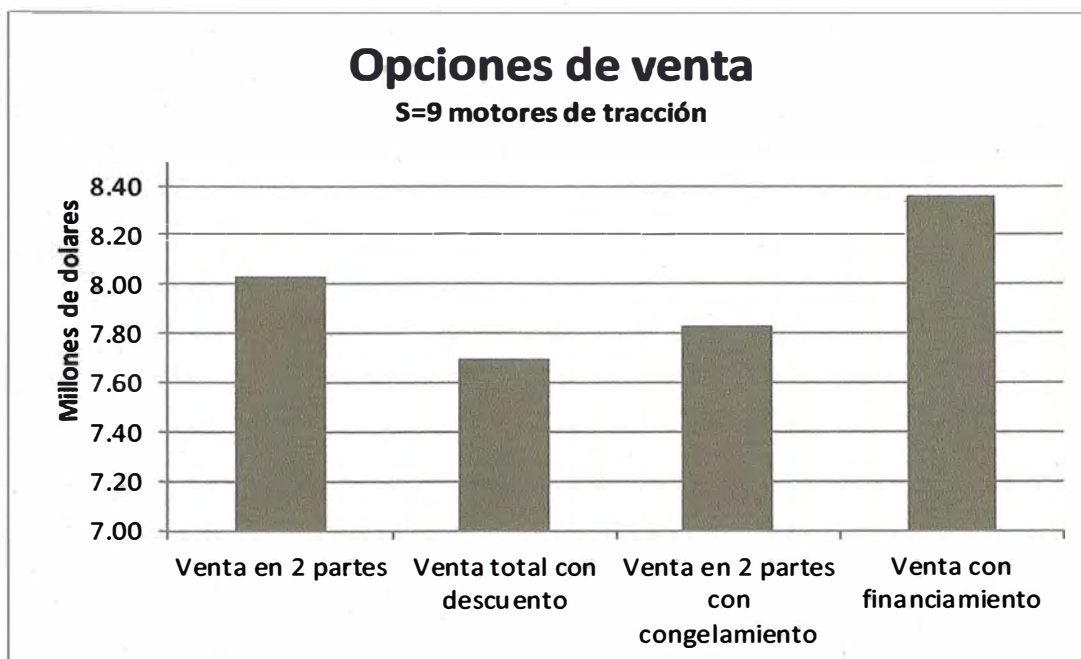


Figura 5.4. Opciones de venta para 9 motores de tracción

En promedio la inversión requerida para 9 motores de tracción es de 8 millones de dólares, este dato se usará para compararlo con el costo de parada de equipo implicado cuando no hay inventario.

5.2. Costo de carencia de inventario

Como se mencionó el inventario de componentes de respaldo se mantiene como un seguro contra los costos de falla implicados por su indisponibilidad en el caso eventual de ser requeridos; para reforzar esta idea, se revisa un cálculo rápido del costo de parada de un equipo de acarreo en una mina de cobre, bajo ciertas consideraciones.

El equipo de acarreo tiene una capacidad de 290 toneladas métricas (tm); es decir, en cada viaje de ida y vuelta el equipo ha movido un total de 290 tm/viaje. Si cada viaje dura en promedio 30 minutos, se tiene que la producción horaria del equipo es 580 tm/h.

La carga transportada está compuesta por roca mineralizada (mineral) y desmante. El porcentaje de mineral transportado se calcula a partir de la relación desmante/mineral (SR), si se considera un $SR=4$, se tiene que el porcentaje de mineral es de 20% respecto del total de la carga. De este modo la media de mineral transportado es $20\%(580) = 116$ toneladas de mineral por hora.

Esta carga de mineral es llevada a molienda y luego a planta concentradora obteniendo como producto el cobre fino; la recuperación metalúrgica se estima en 85% y la ley de cobre en 0.8%. Por tanto, cada camión ayuda a producir $116(85\%)(0.8\%) = 0.788$ toneladas de cobre fino por hora.

Entonces, si se considera un precio de venta del cobre fino en 3 \$/libra (asumiendo venta total) y un costo total de producción de 1.5 \$/libra, se tiene que, por cada hora de equipo detenido, se “deja de ganar” unos 2,608 dólares por hora. Las que variables como el volumen de reserva de mineral (stock-pile) o la reasignación dinámica de equipos (Dispatch) no han sido consideradas.

De este modo, la inversión media en los motores de tracción como componentes de respaldo, ascendente en promedio a 8 millones de dólares, que

cubrirá la operación por 5 años o más se justifica evitando la parada de los equipos por $8,000,000/2,608 = 3,067$ horas de operación.

Por otro lado, si un equipo se detiene por falla del componente mayor, tendría que esperar un periodo igual al TAT para la reparación del componente. El periodo TAT de 40 días es equivalente a 720 horas de operación. Evitando 5 paradas ($720 (5)=3,600$ horas de operación) ya se habría justificado la inversión de 8 millones de dólares en los motores de tracción. Recuerde que hay 140 motores operando que en algún momento tienen que repararse (i.e $140(TAT)$).

5.3. Ahorros económicos en la estrategia Pooling

La estrategia Pooling se basa en las economías de escala producidas al incrementarse la cantidad de equipos. Si se consolida flotas de distintas operaciones que operan el mismo modelo de equipos, es posible alcanzar los mismos niveles de servicio con una cantidad inferior de componentes.

5.3.1. Caso de estudio 5

Se revisa económicamente el caso del cilindro de levante resuelto en la Sección 3.2.1. En primer lugar se calcula el costo del inventario por cada operación minera sin considerar Pooling basándose en la Tabla 3.7.

Seguidamente se compara con el costo del inventario al aplicar Pooling basada en la Tabla 4.2. Luego se muestra el comparativo económico.

5.3.2. Inversión económica sin Pooling

Basándose en la Tabla 3.7 y con un precio unitario del cilindro de levante de 50,000 dólares se calcula la inversión de cada operación minera en este componente del inventario. Se realizó el cálculo asumiendo la opción de compra total sin descuento. Los resultados se muestran en la Tabla 5.6. Para calcular el precio del financiamiento, se utilizó una base de 5 años a una tasa efectiva de 10% anual.

Tabla 5.6 Inversión sin Pooling (caso 5)

CENTRO MINERO	TAMAÑO DE FLOTA	"S" Cilindro de levante	Precio unitario USD/u	Valor Venta USD	Financiamiento (5 años) USD/mes
CM1	70	9	50,000	450,000	9,466
CM2	9	2	50,000	100,000	2,104
CM3	15	3	50,000	150,000	3,155
CM4	30	5	50,000	250,000	5,259
CM5	27	4	50,000	200,000	4,207
TOTALES	151	23		1,150,000	

5.3.3. Inversión económica considerando Pooling

Para el caso de la inversión considerando la estrategia de Pooling, se revisan diferentes métodos de repartición del costo. También se calcula una cuota de financiamiento (TEA 10%) que sería el precio de alquiler mensual que las compañías pagarían al prestador de servicios por acceder al beneficio del inventario en pool.

5.3.3.1. Reparto en función del número de componentes

(Método 1)

En la Tabla 4.2 se mostró la repartición virtual de los componentes de respaldo considerando una estrategia Pooling de un solo almacén. Con base en esta repartición, se calcula el costo y cuota de financiamiento.

Tabla 5.7 Inversión con Pooling (caso 5)

Centro minero	Tamaño de flota	"s" cilindro de levante	Precio unitario	Costo método 1	Financiamiento (5 años) USD/mes
CM1	70	7	50,000	350,000	7,362
CM2	9	1	50,000	50,000	1,052
CM3	15	2	50,000	100,000	2,104
CM4	30	4	50,000	200,000	4,207
CM5	27	3	50,000	150,000	3,155
TOTALES	151	17		850,000	

Sin embargo, no sería equitativo cobrar a cada compañía de acuerdo a la repartición que se muestra en la Tabla 5.7, ya que las

compañías grandes, por ejemplo CM1, terminarían subsidiando beneficios a las compañías pequeñas como CM2, (CM1 ahorraría 100,000 dólares con 70 equipos, y CM2 ahorraría 50,000 con 9 equipos).

5.3.3.2. Reparto en función del número de equipos

(Método 2)

Otra forma más equitativa de repartir costo de inventario por Pooling sería buscar una base común, por ejemplo, el número de equipos. La Tabla 5.8 muestra los resultados.

Tabla 5.8 Reparto del costo en función del número de equipos

Centro Minero	Tamaño De Flota	“S” Cilindro De Levante	Porcentaje De Equipos	Costo Método 2	Financiamiento (5 años) USD/mes
CM1	70	7	46.4%	394,040	8,289
CM2	9	1	6.0%	50,662	1,066
CM3	15	2	9.9%	84,437	1,776
CM4	30	4	19.9%	168,874	3,552
CM5	27	3	17.9%	151,987	3,197
TOTALES	151	17		850,000	

5.3.3.3. Reparto en función de un ahorro porcentual establecido

(Método 3)

Para el prestador de servicios podría ser más beneficioso establecer el precio de alquiler en función de un porcentaje de ahorro establecido. Por ejemplo, si el costo del inventario sin Pooling es X, el costo del inventario con Pooling sería 75% de X, para un ahorro del 25%

a cada compañía. La Tabla 5.9 muestra los resultados de esta repartición de costos.

Tabla 5.9 Repartición de costos a un ahorro del 25%

Centro minero	Tamaño de flota	Costo sin pooling USD	Ahorro (%)	Costo método 3 USD	Financiamiento (5 años) USD/mes
CM1	70	450,000	25%	337,500	7,100
CM2	9	100,000	25%	75,000	1,578
CM3	15	150,000	25%	112,500	2,367
CM4	30	250,000	25%	187,500	3,944
CM5	27	200,000	25%	150,000	3,155
TOTALES	151	1,150,000		862,500	

5.3.4. Ahorros económicos producidos por la estrategia Pooling

Para este caso, si las compañías mineras optaran por un modelo de inventario basado en la estrategia Pooling, tendrían que pagar un monto mensual al distribuidor de equipos o prestador de servicios por hacer uso de los componentes (propiedad del tercero).

Por lo anterior, el comparativo se realiza en base a la cuota de financiamiento mensual, que para el caso de la estrategia Pooling, representaría la cuota de acceso que tendría que pagar cada compañía minera por un determinado componente. La Figura 5.5 resume los resultados, los porcentajes representan los ahorros.

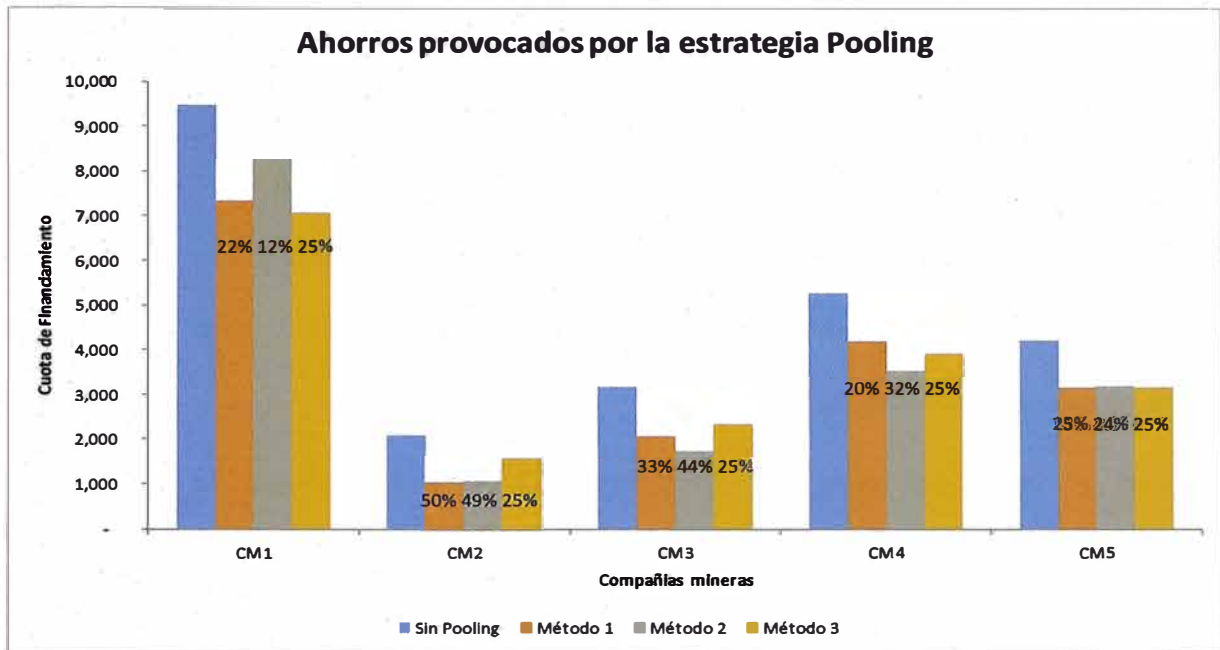


Figura 5.5 Ahorros potenciales por la estrategia Pooling – caso Cilindro de Levante

Como se aprecia en la Figura 5.5, los ahorros producidos por la estrategia Pooling, son importantes y dependen del método que se use para distribuir los costos. El método 3 presenta la distribución más equitativa.

Desde el punto de vista del distribuidor, aplicar la estrategia Pooling, solo le traerá beneficios económicos si toma la posesión del inventario y desarrolla una estrategia de ventas que le permita costear el inventario y la estructura de personal para administrarlo. De otro modo, solo vendería menos componentes.

Una oportunidad de generar ganancias sustanciales se presentará para el distribuidor cuando una nueva compañía adicional opte por acceder al Pool, en este caso, se generarían nuevas economías de escala, por lo que la cantidad de componentes a incluir al pool inicial será mucho menor. De este modo, una vez establecido un pool inicial, todas las compañías que se sumen aportaran directamente beneficios económicos al distribuidor que solo realizará una baja inversión en nuevos componentes.

Para ilustrar este concepto, se desarrolla brevemente un caso adicional.

Sea una nueva compañía X con 70 equipos. Según la Tabla 3.7 se requerían 9 cilindros de levante si no se aplica la estrategia Pooling.

Si esta nueva compañía X accede al Pool, el total de equipos que participan del pool será $151+70 = 221$ equipos. Si se realiza el dimensionamiento de componentes, de manera similar a la descrita en la Sección 4.1 se obtiene que la nueva cantidad de componentes será $S=23$ componentes para $R(S)=96.73\%$. En otras palabras, solo se tendrán que comprar 6 componentes adicionales.

Manejar esa nueva diferencia y establecer una adecuada estrategia de precios serán fundamentales para lograr un modelo de negocio basado en la estrategia Pooling.

CONCLUSIONES

1. Se presentó el modelo de dimensionamiento centrado en el nivel de servicio, el cual tiene varias notaciones matemáticas en la bibliografía consultada, por lo que es importante definir con cuál de ellas se desea trabajar. El modelo aplica a partes reparables de baja rotación, en un sistema cuyos tiempos de ocurrencia de fallas o reemplazos se puedan asumir aleatorios e independientes entre sí. Se argumenta que es posible realizar esta consideración para tamaños de flota grandes.
2. Se ejemplificó el dimensionamiento de componentes a través de los casos de estudio 1, 2, 3 y 4, donde se revisó el dimensionamiento para motores de tracción, alternadores principales y cilindros de levante.
3. Para discutir la influencia de los parámetros en el modelo, se diseñó un diagrama que permite analizar la sensibilidad del resultado a variaciones de los parámetros usados en el dimensionamiento. Se observó que si el TBO aumenta la cantidad de componentes necesarios disminuye. Por otro lado, si el TAT o las horas de uso mensual aumentan, el inventario requerido aumenta. El tamaño del inventario, es muy sensible a variaciones del TAT, una variación de pocos días altera el resultado del dimensionamiento en una unidad.
4. Para comparar los resultados de los modelos primeramente se comparó los modelos empíricos. Se encontró que no son compatibles entre sí. En el caso del modelo empírico polinómico, hay una fuerte dependencia de la curva de confiabilidad, por tanto necesariamente se tiene que asegurar la calidad y

suficiencia de la información histórica. La alta dependencia de información específica de cada centro minero sugiere que este modelo (polinómico) no debe aplicarse para cálculo de inventarios en la etapa de diseño (cuando los equipos aún no están operando), a no ser que se espere un comportamiento del componente muy similar al de otra operación. Los resultados obtenidos del dimensionamiento por nivel de servicio y el dimensionamiento usando modelos empíricos, no convergen en la mayoría de situaciones.

5. Se presentó la estrategia Pooling que consiste en la reducción de inventario a través de la consolidación de flotas de diferentes frentes mineros. Mediante el caso de estudio 4, se ilustra las economías de escala que ocurren al aplicar una estrategia Pooling. Tomando como ejemplo al cilindro de levante, se demostró que, si se centralizará el inventario, se requeriría 35% menos componentes; comparado con el caso donde cada centro minero cuenta con su propio stock. Las operaciones mineras con menor cantidad de equipos se verían más beneficiadas porcentualmente si se aplica la estrategia Pooling. Sin embargo esa desigualdad se puede compensar definiendo un método de repartición de costos uniforme.
6. El costo de parada del equipo se puede relacionar directamente a las pérdidas de producción a causa de la indisponibilidad de un equipo. Se presentó un cálculo teórico de las pérdidas de producción para un equipo en una mina de cobre, que dio como resultado 2,608 dólares por hora, tomando este costo como base se puede justificar la inversión en componentes mayores.

7. Se presentó 3 formas de distribución de costos asociados a la reducción de inventario debido a la estrategia Pooling, siendo el más equitativo, la distribución basada en una reducción porcentual (método 3).

RECOMENDACIONES

Para la empresa distribuidora

1. Si se quiere analizar inventarios existentes, es necesario contar con información acerca del estado de los componentes. Se recomienda la creación de un área de confiabilidad que centralice la información de los componentes a nivel nacional a fin de obtener TBOs específicos para cada operación minera y realizar un mejor pronóstico de la demanda a fin de validar los modelos matemáticos.
2. El tiempo de reparación (parte del TAT) es crítico en el tamaño de inventario, se recomienda revisar las proyecciones a futuro de los tiempos de entrega del taller a fin de buscar mejoras en los inventarios existentes. Este análisis podría derivar en oportunidades de negocio.
3. Los tiempos logísticos de entrega y despacho de componentes (parte del TAT) también deben revisarse a fin de buscar oportunidades de mejora.
4. Promover convenios de investigación con las universidades a fin de generar producción intelectual en beneficio de la empresa y la universidad.

Para estudios futuros

5. Estudiar las técnicas de dimensionamiento centradas en la disponibilidad del sistema y en la reducción de costos.

6. Realizar un estudio de la estrategia Pooling considerando un almacén central y varios sub-almacenes locales, utilizando el método METRIC o sus variantes.
7. Durante el estudio bibliográfico se encontró que es posible aplicar el modelo de dimensionamiento basado en el nivel de servicio a partes no-reparables, por lo que se sugiere realizar un estudio al respecto.
8. Estudiar la influencia de la paridad de los componentes, es decir, el retiro de ambos componentes cuando uno de ellos falle.
9. Desarrollar la estrategia de precios que debe aplicar un distribuidor para obtener beneficios económicos al administrar un pool de inventarios.

BIBLIOGRAFÍA

Alfonso-Romero C, B. G.-S. (2012). Nivel de Servicio y Stock de Referencia: El caso de una empresa distribuidora de repuestos. *XVI Congreso de Ingeniería de Organización*, 935-942.

Bacchetti, A., Plabani, F., Sacconi, N., & Syntetos, A. (2010). *Spare parts classification and inventory management: a case study*. Salford Business School Working Paper (WP) .

Kilpi, J., P.J, A., & Vepsalainen. (2004). Pooling of spare components between airlines. *Journal of Air Transport Management*, 137–146.

Louit M., D. (2007). *Optimization models for critical spare parts: A reliability perspective*. PhD Thesis.

MEM. (2013). Boletín Estadístico de Minería - Reporte Anual. Lima, Peru.

Muckstadt, J. A. (2005). *Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains*. Springer.

Muhaxheri, D. (May de 2010). *Framework for Evaluation of Strategies for Pooling of Repairable Spare Parts*. Master's Thesis - Lund University.

Pascual, R. (2009). *El arte de mantener*. Version 3.1.

PROESMIN. (2009). *Manual de Minería*.

R.J.I. Basten, M.C. van der Heijden, J.M.J. Schutt. (2011). *Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stock*. Beta Working Paper series 346.

Rego, J. R., & Mesquita, M. A. (2011). *Spare parts inventory control: a literature review*. *Produção*, 656-666.

Sherbrooke, C. C. (2004). *Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques*. Springer.

APÉNDICE

Brochure equipo minero de acarreo 930E-4SE

KOMATSU®

930E-4SE

MAXIMUM GVW
505755 kg **1,115,000 lb**
GROSS HORSEPOWER
2611 kW **3,500 HP**

930E

ELECTRIC DRIVE TRUCK



Photo may include optional equipment.

930E-4SE ELECTRIC DRIVE TRUCK

SPECIFICATIONS



ENGINE

Make and model	Komatsu SSDA18V170
Fuel	Diesel
Number of cylinders	18
Operating cycle	4 cycle
Gross horsepower	2611 kW 3,500 HP @ 1900 rpm
Net flywheel power*	2495 kW 3,346 HP @ 1900 rpm
Weight (wet)	10100 kg 22,266 lb

* Net flywheel power is the rated power at the engine flywheel minus the average accessory losses. Accessories include fan and charging alternator.

Power ratings above represent engine performance in accordance with SAE J1995 and J1349 conditions.



ELECTRIC DRIVE

AC CURRENT

Alternator	GTA-39
Dual impeller in-line blower	453 m ³ /min 16,000 cfm
Control	AC Torque Control System
Motorized wheels*	GDY106 AC Induction Traction Motors
Ratio**	32.62:1
Speed (maximum)	64.5 km/h 40 mph

* Wheel motor application depends upon gross vehicle weight, haul road grade, haul road length, rolling resistance and other parameters. Komatsu and G.E. must analyze each job condition to assure proper application.

** Optional ratios available.



TIRES AND RIMS

Rock service, tubeless, radial tires

Standard tire* 53/80 R63

Taper Lock

914 mm x 1600 mm x 127 mm **36" x 63" x 5.0"** rim assembly

Rated at 758 kPa **110 psi** cold inflation pressure for rims,

600 kPa **87 psi** for tires.

* Tires should meet application requirements for tkph/tmph, tread, compound, inflation pressure, ply rating or equivalent, etc.



BODY

All-welded steel flat floor body with horizontal bolsters and full canopy. Eyebrow, rear wheel rock ejectors, body up sling, and rubber mounts on frame are standard. Pivot exhaust heating optional.

Floor sheet 16 mm **0.63"** 1379 MPa **200,000 psi**
tensile strength steel (two-piece)

Front sheet 9 mm **0.35"** 1379 MPa **200,000 psi**
tensile strength steel

Side sheet 8 mm **0.31"** 1379 MPa **200,000 psi**
tensile strength steel

Canopy sheet 5 mm **0.19"** 690 MPa **100,000 psi**
tensile strength steel

Standard SAE heaped 2:1 211 m³ **276 yd³**

Standard Komatsu body weight 30362 kg **66,936 lb**

* Komatsu must approve all bodies through a Body Application Worksheet.



CAB

Advanced Operator Environment with integral 4-post ROPS/FOPS structure (meets J1040 Apr88), adjustable air suspension seat w/lumbar support and arm rests, passenger seat, maximum R-value insulation, tilt and telescoping steering wheel, electric windshield wipers w/washer, tinted safety glass, power windows, Komatsu Payload Weighing System, 55,000 Btu/hr heater and defroster, 21,600 Btu/hr air conditioning (HFC - 134A refrigerant).



FRAME

Advanced technology, full butt-welded box sectional ladder-type frame with integral ROPS supports, integral front bumper, rear tubular cross members, steel castings at all critical stress transition zones, rugged continuous horsecollar.

Plate material 482.6 MPa **70,000 psi**
tensile strength steel

Casting material 620.5 MPa **90,000 psi**
tensile strength steel

Rail width 305 mm **12"**

Rail depth (minimum) 864 mm **34"**

Top and bottom plate thickness 45 mm **1.77"**

Side plate thickness 25 mm **0.98"**

Drive axle mounting Pin and spherical bushing

Drive axle alignment Swing link between frame and axle



BRAKING SYSTEM

Service brakes: oil-cooled, hydraulic-actuated, multiple disc brakes at each wheel. Traction system wheel slip/slide control.

Max. service apply pressure 17237 kPa **2500 psi**

Total friction area per brake 97025 cm² **15,038 in²**

Secondary brakes Automatically applied prior
to hydraulic system pressure dropping below level
required to meet secondary stopping requirements.

Wheel brake locks Switch activated

Parking brakes Multiple disc, spring-applied,
hydraulically-released, dry brakes on inboard end
of each wheel motor rotor shaft. Rated to hold on
±15% grade @ maximum gross vehicle weight.

Electric dynamic retarder Max 4026 kW **5400 hp**

Continuous 2909 kW **3900 hp**

Continuously rated high-density blown grids w/retard at engine idle
and retard in reverse propulsion.



SUSPENSION

Variable rate hydro-pneumatic with integral rebound control

Max. front stroke 328 mm **12.92"**

Max. rear stroke 239 mm **9.40"**

Max. rear axle oscillation ±6.5°

* Rear suspensions are inverted.



COOLING SYSTEM

L&M radiator assembly, split-flow, with deaeration-type top tank
measuring 3277 mm x 2164 **10'9" x 7'1"**.



SERVICE CAPACITIES

Cooling System 719 L **190 U.S. gal**

Crankcase* 341 L **90 U.S. gal**

Hydraulic system 1325 L **350 U.S. gal**

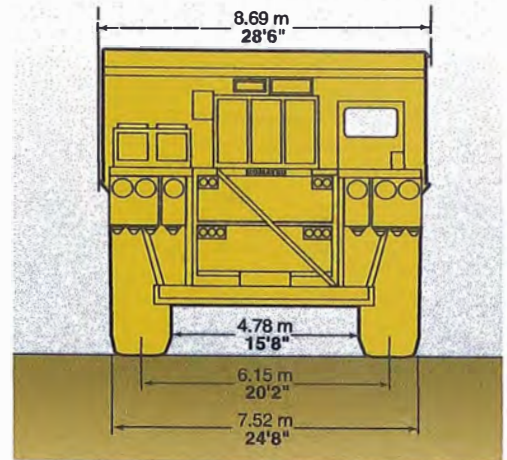
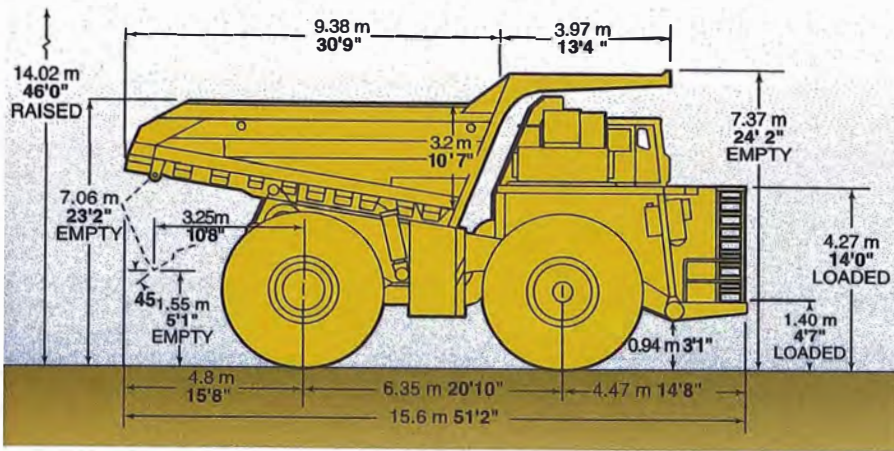
Motor gear box (each) 95 L **25 U.S. gal**

Fuel 5300 L **1400 U.S. gal**

* Includes lube oil filters



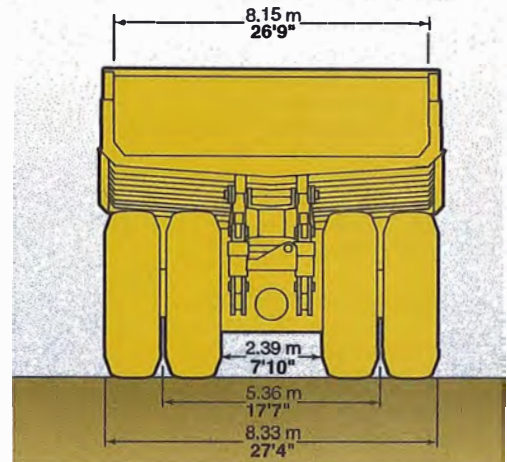
DIMENSIONS



All dimensions are with 218 m³ 285 yd³ body (optional body).

Bodies	Struck	2:1 Heap	*Loading Height
Standard	171 m ³ 224 yd ³	211 m ³ 276 yd ³	7.06 m 23'2"

* Exact load height may vary due to tire make, type, and inflation pressure.



HYDRAULIC SYSTEM

- Steering Accumulator assisted with twin double acting cylinders provide constant rate steering. Secondary steering automatically supplied by accumulator.
- Turning circle diameter (SAE) 29.7 m 97'7"
- Reservoir 947 L 250 U.S. gal
- Filtration In-line replaceable elements
- Suction Single, full flow, 100 mesh
- Hoist and steering Dual, in-line, high pressure.
- Brake component cabinet Above deck, easily accessible with diagnostic test connections.
- Hoist Two 3-stage dual-acting outboard cylinders, internal cushion valve, over-center dampening.
- Hoist times
 - Power-up loaded 21 sec
 - Power-down 23 sec
 - Float-down empty 24 sec
- Pumps Two pumps, single package, end of alternator
- Hoist and brake cooling Tandem gear pump with output of 1022 lpm 270 gpm at 1900 rpm and 17237 kPa 2,500 psi
- Steering and brake Pressure-compensating axial piston pump with output of 246 lpm 65 gpm at 1900 rpm and 18961 kPa 2,750 psi
- System relief pressures
 - Hoist and brake cooling 17237 kPa 2,500 psi
 - Steering and brake 27579 kPa 4,000 psi
- Quick disconnects standard for systems diagnostics and buddy dump.



ELECTRICAL SYSTEM

- 4 x 8D and 2 x 30H, 220-ampere-hour batteries, bumper-mounted with disconnect switch.
- Alternator 24 volt, 140 amp
- Lighting 24 volt
- Cranking motors two/24 volt



WEIGHT DISTRIBUTION

	kg	lb	%
Empty Vehicle			
Front axle	104459	230,293	48.5
Rear axle	110847	244,377	51.5
Total (wet, 100% fuel)	215307	474,670	
Loaded Vehicle at maximum GVW rating			
Front axle	165956	365,871	32.8
Rear axle	339649	748,799	67.2
Total	505755	1,115,000	

NOTE: GVW shall not exceed 505755 kg 1,115,000 lb including options, liners, fuel and payload, subject to application approval by Komatsu.

NOTE: Komatsu trucks comply with SAE specifications for cab noise, ROPS, steering and braking. Cover photos and illustrations may show optional equipment. Materials and specifications subject to change without notice.



STANDARD EQUIPMENT

- Air cleaners, Donaldson SRG
- Air filter evacuators
- Alternator (24 volt/140A)
- Auto lubrication system (Lincoln) w/ground level fill & level indicator
- Batteries—4 x 8D and 2 x 30H (1450 CCA's)
- Battery charging cable and socket
- Body over center device
- Brakes: oil-cooled, multiple disc front & rear
- Circuit breakers, 24 volt
- Control cabinet
- Electric start
- Eliminator system for engine lubrication
- Filters, high pressure hydraulic
- Gate valves on hydraulic tank
- Ground level radiator fill
- Komatsu Payload Weighing System—PLM-III
- Mirrors, LH flat and RH rectangular convex
- Mud flaps
- Muffled exhaust—deck-mounted
- Power supply, 24 volt and 12 volt DC
- Quick disconnects (hoist and diagnostics)
- Radiator sight gauge
- Removable power module unit (radiator, engine, alternator, blower)
- Retard speed control
- Reverse retarding
- Rock ejectors
- Thermostatic Fan Clutch
- Wiggins Fast-Fill Fuel System (in tank and left side remote)
- Service Center—LH
- Body Impact Plate

OPERATOR ENVIRONMENT & CONTROL:

- All hydraulic service brakes with secondary auto apply
- Battery disconnect switch
- Body up sling
- Brake lock and drive system interlock
- Circuit breakers, 24 volt
- Diagonal staircase across grille, L to R
- Dynamic retarding with continuous rated element grids
- Engine shutdown at ground level
- Hoist propulsion interlock
- Homs (electric—front and back-up)
- Integral ROPS/FOPS Cab Level 2

- Maintenance and power lockout
- Parking brakes with warning light & speed application protection
- Power steering w/auto secondary steering
- Protective deck handrails
- Pump driveline protector
- Radiator fan guard
- Seat belts 76 mm 3" retractable
- Skid-resistant coating on walkways

STANDARD HIGH VISIBILITY DELUXE CAB:

- AC Drive Interface Display
- Air cleaner vacuum gauges
- Air conditioner HFC-134A
- Alarm System warning lights (red)
 - Accumulator pre-charge
 - Brake/hydraulic oil temperature w/alarm
 - Coolant low level w/alarm
 - Drive system temperature w/alarm
 - Electric system fault w/alarm
 - Hydraulic oil level w/alarm
 - Low engine oil pressure w/alarm
 - Low brake pressure w/alarm
 - No propel/retard power w/alarm
 - Stop engine no propel w/alarm
 - Steering pressure w/alarm
- AM/FM/CD/MP3 and weather band
- Column-mounted retarder control
- Digital tachometer and speedometer
- Dome light
- Engine hourmeter, oil pressure gauge, coolant temperature gauge, hydraulic oil temperature gauge
- Engine shutdown w/"Smart Timer" delay
- Floor mat (double barrier)
- Fuel gauge in cab and on tank
- Fuel low level light and buzzer
- Gauges (w/backlight)
- Headlight switch
- Heater and defroster (heavy-duty)
- Heater switch
- High beam selector and indicator
- Horn (center of steering wheel)
- Indicator lights (amber):
 - Check engine w/alarm
 - Circuit breaker tripped
 - Coolant high temperature w/alarm
 - Drive system reset switch

- Drive system temperature w/alarm
- Dump body up
- Dynamic retarding
- Lincoln Lube
- Low Fuel
- Manual back-up lights
- Park brakes applied
- Propel system not ready
- Reduced propel system mode
- Retard at continuous level
- Retard speed control
- Service brakes
- Starter circuit
- Timed engine shutdown
- Insulation (Max R-Value)
- Operator seat, adjustable w/air suspension, lumbar support and arm rests
- Panel lighting (adjustable)
- Passenger seat
- Power windows
- Pressurized cab air system w/fan on
- Single brake/retarder pedal
- Starter key switch
- Sunvisor (adjustable)
- Tilt & telescoping steering wheel
- KOMTRAX Plus
- Voltmeter (battery output)
- Windshield (tinted safety plate)
- Windshield wiper (dual) and washer (electric)

LIGHTING:

- Back-up lights—rear mount (2) halogen
- Back-up lights—R and L - deck mount (2) halogen
- Brake and retard lights on top of cab
- Clearance lights
- Control cabinet service light (LED)
- Dynamic retarding, rear (2) halogen
- Engine compartment service lights
- Fog lights (2) halogen
- Headlights (8) halogen
- Stairway lights
- Manual back-up light, switch and indicator
- Payload lights R and L (LED)
- Platform lights R, L and Center
- Stop & tail lights (2) (LED)
- Turn signals halogen
- Under-hood service lights



OPTIONAL EQUIPMENT

(Optional equipment may change operating weight).

- Body Liners*
- Fire extinguisher 9 kg 20 lb
- Heated Body
- Hot start engine coolant (220V 2-2500W)
- Hot start engine oil (220V 2-600W)
- Hubodometer (miles or kilometers)
- Modular Mining Systems (MMS) ready
- Mufflers between frame rails
- Radiator shutters
- Service Center—RH
- Special language decals
- Suspensions, cold weather

*Available factory installed or non-installed. All other options and accessories listed are available factory installed only.

AESS778-01

©2009 Komatsu America Corp.

Printed in USA

D01(1M)C

01/09 (EV-3)

KOMATSU®