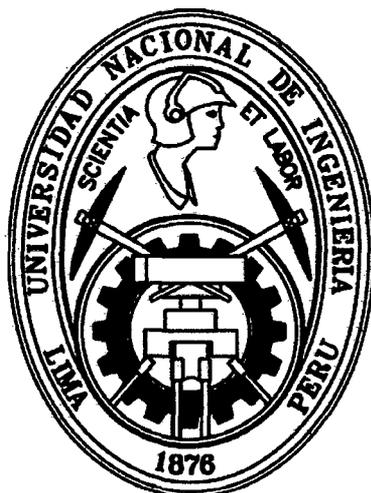


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**OPTIMIZACIÓN DE PROYECTOS CONSTRUCTIVOS**  
**DE TÚNELES DESARROLLANDO UN MODELO**  
**DE REEMPLAZO DE LA MAQUINARIA**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de**

**INGENIERO CIVIL**

**LUIS ENRIQUE CHARCA PONCE**

**LIMA - PERÚ**

**2010**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

Dedicado a quienes agradezco por existir en mi vida:

A mi esposa, Yayita, por su cautivante y tierno amor, su gran apoyo, paciencia y comprensión, y por ser mi compañera y mejor amiga en los buenos y malos momentos.

A mis padres, Irene y Enrique, y mis hermanas, Sheyla, Deysi y Dianita, por su amor maravilloso, su enorme esfuerzo y grandes ejemplos, y por haberme regalado un dulce hogar.

## **AGRADECIMIENTOS**

El inicio, el desarrollo y la finalización de esta Tesis, jamás hubiesen sido posibles sin el inmenso apoyo de muchísimas personas, a las que agradezco enormemente por haber contribuido al desarrollo de este estudio. En particular, agradezco a don Rafael López, por haberme sugerido esta investigación, otorgarme las facilidades necesarias para su desarrollo y por sus oportunos consejos y aportes. Del mismo modo, agradezco a don Juan Carlos Ubillús, por haber confiado en mí y destinar parte de su preciado tiempo a guiarme, asesorarme y ofrecerme valiosas sugerencias y apreciaciones.

Culminar este estudio no hubiera sido factible sin el constante apoyo y motivación de Yayita. Gracias por la comprensión y sacrificios, las noches de desvelo acompañándome y por confiar en mí cuando continuar se tornaba más difícil de lo debido.

Mi eterno y más grande agradecimiento está destinado a mis padres, ya que por su enorme amor y esfuerzo crearon para mí la oportunidad de estudiar en esta gran universidad y superarme profesionalmente, pero desde siempre, me hicieron crecer como ser humano.

También, debo y quiero agradecer a mis amigos y compañeros de trabajo, por su tolerancia, apoyo y sugerencias durante todo este proceso. A mis grandes amigos y profesores de la universidad, por haber marcado una etapa trascendental de mi vida, y haber contribuido significativamente en mi formación profesional y personal.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 1: GENERALIDADES</b>	<b>15</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. TUNELERÍA APLICADA A OBRAS CIVILES	15
1.2.1. DEFINICIÓN DE TÚNEL	15
1.2.2. USOS DE LOS TÚNELES	16
1.2.3. SISTEMAS DE EXCAVACIÓN EN ROCA	17
A. CON PERFORACIÓN Y VOLADURA (DRILL AND BLAST)	17
B. CON MEDIOS MECÁNICOS	23
1.2.4. TÚNELES FAMOSOS	25
1.3. MAQUINARIA TRADICIONAL	27
1.3.1. MAQUINARIA PARA PERFORACIÓN	27
A. PERFORADORA MANUAL	27
B. PERFORADORA MECANIZADA (JUMBO)	28
1.3.2. MAQUINARIA PARA EL RETIRO DE ESCOMBROS	29
A. PALA CARGADORA DE BAJO PERFIL	29
B. PALA CARGADORA MÁS CAMIÓN DUMPER	30
C. HÄGGLOADER	30
1.4. RESUMEN	31
<b>Capítulo 2: MAQUINARIAS</b>	<b>32</b>
2.1. INTRODUCCIÓN	32
2.2. NATURALEZA DE LOS COSTOS	32
2.2.1. COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	32
A. COSTOS OPERACIONALES	33
B. COSTOS POR NO DISPONIBILIDAD	34

---

2.2.2.	COSTO DE POSESIÓN O INVERSIÓN	35
A.	VALOR DE ADQUISICIÓN	35
B.	VALOR DE VENTA	36
C.	OVERHAUL	36
2.3.	MÉTODOS DE VALUACIÓN DE ACTIVOS	37
2.3.1.	FLUJO DE CAJA DESCONTADO	37
2.3.2.	VALUACIÓN EN EL MERCADO	37
2.4.	DEPRECIACIÓN	38
2.4.1.	MÉTODO DE LA LÍNEA RECTA	39
2.4.2.	MÉTODO DE LAS UNIDADES PRODUCIDAS	39
2.4.3.	MÉTODO DE LA SUMA DE LOS AÑOS DE VIDA	40
2.4.4.	MÉTODO DE LA DOBLE TASA DE SALDO DECRECIENTE	40
2.5.	RESUMEN	41
<b>Capítulo 3: MOMENTO ÓPTIMO DE REEMPLAZO</b>		<b>42</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN	42
3.2.	¿EXISTE UN MOMENTO ÓPTIMO?	42
3.2.1.	INVERSIÓN	43
3.2.2.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	44
3.2.3.	MOMENTO ÓPTIMO	45
3.3.	CASO DE ÉXITO	46
3.3.1.	NATURALEZA DEL ESTUDIO	46
3.3.2.	PLANTEAMIENTO ADOPTADO	47
3.3.3.	MODELO DE REEMPLAZO	47
3.3.4.	PARÁMETROS DEL MODELO	48
3.3.5.	RESTRICCIONES CONSIDERADAS	48
3.3.6.	SIMULACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD	49
3.3.7.	ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN	49
3.3.8.	RESULTADOS	50
3.4.	RESUMEN	50
<b>Capítulo 4: ANÁLISIS DE MODELOS EXISTENTES</b>		<b>52</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN	52
4.2.	MODELOS DE COMPARACIÓN ANTIGUO - NUEVO	52
4.2.1.	MODELO MAPI	53

A.	CRITERIO DE DECISIÓN	53
B.	LIMITACIONES	54
4.2.2.	MODELO DEL COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)	54
A.	FORMULACIÓN	54
B.	CRITERIOS DE DECISIÓN	56
4.3.	MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	57
4.3.1.	MODELO DE ESPINOZA	57
A.	VALOR DE LA MAQUINARIA	58
B.	COSTO DEL MANTENIMIENTO	59
C.	METODOLOGÍA	60
4.3.2.	MODELO DE CANTILLO	61
4.3.3.	MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA	63
A.	FUNDAMENTOS	63
B.	FORMULACIÓN	64
C.	REQUISITOS	65
D.	RESOLUCIÓN	66
4.4.	RESUMEN	66

**Capítulo 5: DESARROLLO DE MODELO APLICABLE A UNA EMPRESA  
CONSTRUCTORA**

		<b>68</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN	68
5.2.	EL MODELO	69
5.2.1.	ETAPAS	69
5.2.2.	VARIABLES DE DECISIÓN	70
5.2.3.	VARIABLES DE ESTADO	70
5.2.4.	FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN	71
5.2.5.	FUNCIÓN OBJETIVO	72
5.2.6.	CONDICIONES DE BORDE	74
5.2.7.	RESTRICCIONES	75
5.3.	ENTORNO DE DESARROLLO	76
5.4.	DISPONIBILIDAD DE LA MAQUINARIA	77
5.5.	COSTOS OPERACIONALES	79
5.6.	DEPRECIACIÓN	81
5.7.	OVERHAUL	83
5.8.	ARCHIVO EJECUTABLE DEL MODELO	86

---

5.8.1. HOJA INPUT	86
5.8.2. HOJA BASE_DATOS	88
5.8.3. HOJA COSTOS_EDADES	88
5.8.4. HOJA FLUJOS_EFECTIVO	88
5.8.5. HOJA EVOLUCIÓN	89
5.8.6. HOJA OUTPUT	90
5.9. RESUMEN	92
<b>Capítulo 6: ANÁLISIS DEL MODELO DESARROLLADO</b>	<b>93</b>
6.1. INTRODUCCIÓN	93
6.2. APLICACIÓN DEL MODELO	94
6.2.1. INFORMACIÓN DE ENTRADA	94
A. INFORMACIÓN GENERAL	94
B. CONDICIONES CONTABLES	94
C. CONDICIONES PARA OVERHAUL & REEMPLAZO	95
D. PARÁMETROS DE ANÁLISIS	95
6.2.2. COSTOS OPERACIONALES	96
6.2.3. RESULTADOS	98
6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	100
6.3.1. TASA DE INTERÉS MENSUAL	101
6.3.2. VIDA ÚTIL DE DEPRECIACIÓN	102
6.3.3. EDAD MÍNIMA PARA REEMPLAZO	103
6.3.4. EDAD MÁXIMA DE CONSERVACIÓN	104
6.3.5. EDAD MÍNIMA PARA OVERHAUL	105
6.3.6. REDUCCIÓN DE EDAD POR OVERHAUL COMPLETO	106
6.3.7. REDUCCIÓN DE EDAD POR OVERHAUL PARCIAL	107
6.3.8. RATIO COSTO FIJO / COSTO TOTAL	108
6.3.9. DISPONIBILIDAD EXIGIDA	109
6.3.10. TASA DE REDUCCIÓN DE DISPONIBILIDAD	110
6.4. CONSISTENCIA DE LOS DATOS DE SALIDA	113
6.5. ANÁLISIS FODA	114
6.6. RESUMEN	116
<b>Capítulo 7: CONDICIONES GENERALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO</b>	<b>117</b>

---

---

7.1.	INTRODUCCIÓN	117
7.2.	ÁMBITO INTERNO	117
7.2.1.	CONTROL DE COSTOS	117
7.2.2.	CAPACITACIÓN	119
7.2.3.	APLICACIÓN DE LA POLÍTICA RECOMENDADA	119
7.3.	ÁMBITO EXTERNO	120
7.3.1.	VARIABILIDAD DE LAS CONSIDERACIONES INICIALES	121
7.3.2.	VARIABILIDAD DEL MERCADO	121
7.4.	ANÁLISIS DE COSTO - BENEFICIO	122
7.5.	RESUMEN	123
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>124</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>126</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>130</b>

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1. Objetivos constructivos de túneles mineros y civiles	17
Tabla 1.2. Túneles famosos del mundo	26
Tabla 1.3. Túneles famosos del Perú	26
Tabla 4.1. Costos medios anuales (millones de pesos colombianos)	62
Tabla 6.1. Distribución de Tasa de Uso Mensual de variabilidad cuatrimestral	96
Tabla 6.2. Costos operacionales reales del Scooptram SCT-01	97
Tabla 6.3. Pronóstico de costos operacionales en función de la edad inicial	98
Tabla 6.4. Resumen de decisiones recomendadas por el modelo	100
Tabla 7.1. Costo de implementación del modelo con horizonte de 10 años	122
Tabla 7.2. Beneficio de implementación del modelo con horizonte de 10 años	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Perforación con Jumbo	18
Figura 1.2. Carga de explosivos	19
Figura 1.3. Carguío de escombros: Scooptram y volquete	21
Figura 1.4. Sostenimiento con shotcrete, pernos y malla	22
Figura 1.5. Rozadora tipo Alpine	23
Figura 1.6. Cabezal del TBM usado en el Proyecto Especial Olmos	24
Figura 1.7. Perforadora manual	27
Figura 1.8. Jumbo de 4 brazos	28
Figura 1.9. Scooptram ST1030	29
Figura 1.10. Häggloader 10HR	30
Figura 3.1. Costo de Inversión en el tiempo	44
Figura 3.2. Costo de Operación y Mantenimiento en el tiempo	45
Figura 3.3. Costos de maquinaria en el tiempo	46
Figura 4.1. Costo Anual Equivalente	57
Figura 4.2. Cruce histórico: valor de maquinaria y costo de mantenimiento.	60
Figura 4.3. Desarrollo anual de costos medios de maquinaria	62
Figura 5.1. Interacción EXCEL y VBA	77
Figura 5.2. Vista de la hoja Base_Datos	79
Figura 5.3. Vista de la hoja Costos_Edades	83
Figura 5.4. Data sobre Overhaul en la hoja INPUT	85
Figura 5.5. Parámetros de Análisis en la hoja INPUT	87
Figura 5.6. Hoja Flujos_Efectivo	89
Figura 5.7. Hoja Evolución	90
Figura 5.8. Hoja OUTPUT	91
Figura 6.1. Esquema de evolución por etapas del resultado final de las decisiones	99
Figura 6.2. Variación del resultado VS variación de la tasa de interés mensual	101
Figura 6.3. Número y tipo de eventos VS variación de la tasa de interés mensual	101
Figura 6.4. Variación del resultado VS variación de la vida útil de depreciación	102
Figura 6.5. Número y tipo de eventos VS variación de la vida útil de depreciación	102
Figura 6.6. Variación del resultado VS variación de la edad mínima para reemplazo	103

Figura 6.7. Número y tipo de eventos VS variación de la edad mínima para reemplazo	103
Figura 6.8. Variación del resultado VS variación de la edad máxima de conservación	104
Figura 6.9. Número y tipo de eventos VS variación de la edad máxima de conservación	104
Figura 6.10. Variación del resultado VS variación de la edad mínima para Overhaul	105
Figura 6.11. Número y tipo de eventos VS variación de la edad mínima para Overhaul	105
Figura 6.12. Variación del resultado VS variación de reducción de edad por Overhaul Completo	106
Figura 6.13. Número y tipo de eventos VS variación de reducción de edad por Overhaul Completo	106
Figura 6.14. Variación del resultado VS variación de reducción de edad por Overhaul Parcial	107
Figura 6.15. Número y tipo de eventos VS variación de reducción de edad por Overhaul Parcial	107
Figura 6.16. Variación del resultado VS variación del ratio Costo Fijo / Costo Total	108
Figura 6.17. Número y tipo de eventos VS variación del ratio Costo Fijo / Costo Total	108
Figura 6.18. Variación del resultado VS variación de la disponibilidad exigida	109
Figura 6.19. Número y tipo de eventos VS variación de la disponibilidad exigida	109
Figura 6.20. Variación del resultado VS variación de la tasa de reducción de disponibilidad	110
Figura 6.21. Número y tipo de eventos VS variación de la tasa de reducción de disponibilidad	110
Figura 6.22. Variación del resultado por incremento de V/P en 1%	111
Figura 6.23. Variación del resultado por decremento de V/P en 1%	112
Figura 6.24. Rango de inalterabilidad del número y tipo de eventos	113
Figura 6.25. Rango de inalterabilidad de la Política de Decisiones	113

## RESUMEN

En los proyectos de construcción de túneles, la maquinaria tiene una elevada incidencia en el margen final resultante. Por ello es de suma relevancia decidir adecuadamente respecto a los reemplazos<sup>1</sup> de la maquinaria que se deben realizar, visto con el objetivo de incrementar dicho margen. La forma más metódica de ejecutar el reemplazo, es a través de un modelo, que debe proveer elementos de juicio consistentes para coadyuvar en esta decisión, básicamente en cuanto al momento en que se debe realizar.

Este estudio, aborda un planteamiento de solución al problema de reemplazo de maquinaria, a través de la creación de un modelo que divide el horizonte de planificación en etapas equivalentes a meses, y en cada una de las cuales establece cuál es la decisión que es más conveniente practicar: conservar la maquinaria, reemplazarla, o realizarle un Overhaul<sup>2</sup> (parcial o completo).

El modelo desarrollado utiliza los criterios de la Programación Dinámica, y comprende variables de edad de la maquinaria, costos y disponibilidad, y parámetros contables, de operación, y restricciones para los reemplazos y Overhails. Las consideraciones adoptadas se condensaron en un archivo ejecutable implementado en el entorno del programa Microsoft Excel, donde se diseñaron hojas de ingreso de datos, procesamiento intermedio y visualización de resultados. Para la determinación de las decisiones que conducen a la política óptima<sup>3</sup>, se elaboró un algoritmo de solución construido a través de una macro incorporada al archivo ejecutable.

Se analizó la sensibilidad de los parámetros considerados por el modelo, determinándose que los más relevantes son la edad mínima de reemplazo, la reducción de edad por realización de Overhaul y la vida útil de depreciación. Finalmente, se establecen recomendaciones generales para la implementación del modelo y se analiza su viabilidad, utilizando el análisis costo – beneficio.

---

<sup>1</sup> El reemplazo al que se refiere esta Tesis, es al de la sustitución de una maquinaria en operación por otra idéntica, de las mismas características y tecnología, pero nueva (sin uso).

<sup>2</sup> Un Overhaul o reparación mayor, consiste en la reparación parcial o completa de una maquinaria, en la que sus piezas y componentes son refaccionados en talleres, donde sus partes son derivadas a las respectivas áreas especializadas en cada componente.

<sup>3</sup> La política óptima es el conjunto de decisiones, etapa por etapa, que conduce al mayor resultado económico final derivado de la gestión de la maquinaria.

## INTRODUCCIÓN

### A. ANTECEDENTES

En los proyectos de tunelería aplicada a obras civiles, la maquinaria tradicional empleada para su ejecución consta de Jumbos<sup>4</sup> y Scooptrams<sup>5</sup>, como los equipos más incidentes dentro del costo global del proyecto.

Las condiciones operativas, el número de horas de trabajo de la maquinaria, la antigüedad de la misma, los mantenimientos y su frecuencia, entre otros factores, determinan un nivel de producción y costos asociados, que pueden resultar rentables o no.

Es entonces tarea de la Gerencia del Proyecto, determinar con certeza si una maquinaria específica, en un momento cualquiera, mantiene niveles de operación rentables. Una decisión determinante en el margen final del proyecto es la de definir si la maquinaria se conserva, o se somete a un Overhaul, o se reemplaza. Y si no se conserva, entonces, ¿en qué momento es más oportuno económicamente optar por las otras alternativas?... La clave es: el momento óptimo.

Suele valerse de la experiencia y de algunos indicadores de mediana relevancia, como elementos de asistencia en la toma de este tipo de decisiones, sin embargo, el empirismo es lo que prevalece, y en consecuencia, no se puede saber con certeza si se procede de la mejor forma.

Existen modelos que podrían resultar importantes herramientas de apoyo, como son el modelo del Costo Anual Equivalente, o el modelo de los costos promedios acumulados, siendo estos de los más conocidos. El primer modelo mencionado es propio de las ciencias económicas, y resulta válido para todos los

---

<sup>4</sup> Jumbo, carrocería automóvil equipada con uno o hasta cuatro brazos articulados, en cada uno de los cuales puede montarse una perforadora o una cesta para uno o dos operarios. Esta maquinaria es usada para realizar perforaciones para colocación de explosivos (excavación *Drill and Blast*), pemos, drenes, etc.

<sup>5</sup> Scooptram, es una pala cargadora de bajo perfil, utilizada para el carguío y eliminación de escombros en túneles.

sectores productivos. El segundo es más específico, y se orienta a los equipos de construcción.

Naturalmente, cada uno de estos modelos presenta limitaciones y ventajas en su aplicación particular al sector productivo en el que se enfoca esta Tesis, y es por ello que surge la necesidad de generar un modelo *ad hoc*, en el que se superen las limitaciones y se aprovechen las ventajas.

En nuestra casa de estudios no existen tesis previas que se enfoquen particularmente en el planteamiento señalado, pues se ha estudiado la maquinaria desde otros puntos de vista parcialmente afines: optimización de rendimientos económicos; selección y administración de maquinaria de una constructora; además de la racionalización del uso de la maquinaria de construcción.

## B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Gestión de Proyectos, tal como se desarrolla en estos días, presenta limitaciones en su afán de solucionar un problema relevante en los proyectos, que es el desconocimiento del momento óptimo para reemplazar los activos incidentes en el costo global.

Existe el llamado momento óptimo de reemplazo, antes y después del cual, los márgenes resultantes de realizar un reemplazo son menores (o mucho menores) que los que resultarían de hacerlo en el momento oportuno.

Actualmente, en la mayoría de los casos los reemplazos se realizan de manera casi empírica, basándose en la experiencia de los gestores del proyecto, y en algunos indicadores que no reflejan con la claridad necesaria la situación de los activos, en este caso específico, de la maquinaria de producción.

Es así que por la ausencia de herramientas que asistan en la toma de decisiones, se puede seguir operando la maquinaria con costos de producción elevados, que merman la rentabilidad final del proyecto, considerando que ésta depende en gran parte de los costos de la maquinaria.

## C. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La tendencia actual en la industria constructiva, y más aun considerando el crecimiento que se ha producido en el sector en los últimos años, apunta hacia el

desarrollo de la Gestión de Proyectos, como herramienta esencial para conseguir la satisfacción en la demanda requerida de alcance, tiempo, costo, calidad y seguridad.

En esta misma línea de pensamiento, es que se arriba a la conclusión que para conseguir el objetivo deseado en lo relativo al costo de proyectos de la naturaleza abordada en esta Tesis, se debe controlar adecuadamente la maquinaria, por ser de alta incidencia.

Es sumamente necesario entonces, disponer de procedimientos, resumidos en un modelo, que permitan establecer la política de reemplazo de las maquinarias de producción, de forma que se asegure la mayor rentabilidad.

#### D. MARCO TEÓRICO

- **Gestión de Proyectos**, comprende el emprendimiento de políticas y acciones orientadas hacia la adecuada administración de recursos, de forma que se culmine el trabajo previsto sin sobrepasar el plazo esperado, con las especificaciones señaladas, con condiciones de trabajo apropiadas, y con el costo óptimo.
- **Investigación de Operaciones**, ciencia de la preparación de las decisiones en todas las esferas de la actividad humana, argumentándolas con la aplicación de herramientas lógico-matemáticas y orientadas hacia propósitos definidos.
- **Programación Dinámica**, técnica matemática orientada a la solución de problemas (básicamente de optimización), con decisiones secuenciales en etapas sucesivas. Basa su eficiencia en la descomposición de un problema de gran magnitud en pequeños problemas, de resolución más sencilla.

#### E. HIPÓTESIS

La hipótesis formulada consiste en que el momento óptimo de reemplazo (variable dependiente) de los Jumbos y Scooptrams, está determinado por las siguientes variables: costos de operación y mantenimiento; valor de inversión y rescate; costo de oportunidad; grado de deterioro; Overhalls; y alternativas tecnológicas.

## F. LIMITACIONES Y DELIMITACIONES

La ocurrencia de accidentes que impidan inevitablemente el correcto y normal funcionamiento de la maquinaria, establece la limitación principal del modelo, ya que su aparición es totalmente aleatoria e imprevisible, y su efecto desequilibra todas las suposiciones y pronósticos considerados por el modelo.

La delimitación más importante considerada por el modelo, es la no inclusión del efecto externo del mercado<sup>6</sup> para la determinación del precio de venta residual de la maquinaria, así como de su valor de adquisición, pues se considera que éste se mantiene constante durante el tiempo que dura el horizonte de planificación. La segunda delimitación, es la no consideración de las consecuencias por la No Disponibilidad de la maquinaria en el sistema productivo completo.

---

<sup>6</sup> No obstante, puede simularse el comportamiento del mercado a través de la inclusión de un factor o factores que modifiquen el valor residual o de adquisición de la maquinaria, esto en el ingreso de datos del archivo ejecutable del modelo.

## Capítulo 1 GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El título de esta Tesis es “Optimización de proyectos constructivos de túneles desarrollando un modelo de reemplazo de la maquinaria”, pues bien, no se puede pensar en optimizar algo sin antes conocerlo, sin antes entender plenamente al sujeto de la optimización.

No se puede hablar de proyectos constructivos de túneles, sin antes saber qué son los túneles, para qué sirven, de qué tipos los hay, cómo se construyen y qué maquinarias se usan para ello.

Por todo lo señalado, es que este primer capítulo desarrolla los aspectos generales que se deben conocer respecto a los túneles, y constituye el paso inicial para establecer la optimización que plantea la Tesis.

### 1.2. TUNELERÍA APLICADA A OBRAS CIVILES

#### 1.2.1. DEFINICIÓN DE TÚNEL

El diccionario de la Real Academia Española define túnel como “Paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación”.<sup>7</sup>

Desde una perspectiva ingenieril, túnel es aquella obra de trazo lineal en planta, subterránea o subacuática, que determina la comunicación entre dos ubicaciones distintas, y cuya construcción responde a propósitos diversos, siendo uno de los más comunes el transporte, sea éste de personas o de materiales.

---

<sup>7</sup> Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española – Vigésima segunda edición* [en línea]. <[http://buscon.rae.es/draef/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=túnel](http://buscon.rae.es/draef/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=túnel)> [Consulta: 04.07.08]

## 1.2.2. USOS DE LOS TÚNELES

Los túneles tienen una gran cantidad de usos, que en general permiten clasificarlos en dos grupos: túneles mineros y túneles con propósitos civiles.

En el primer grupo, la finalidad esencial del túnel es permitir el acceso hacia el material de la mina para su extracción, siguiendo una capa, filón o masa mineralizada.

El segundo grupo es más amplio y extendido en diversos sectores de la actividad humana. A continuación se detalla una lista de los principales usos considerados en este grupo:

- Tránsito de peatones o ciclistas
- Tránsito de vehículos automotrices
- Tráfico ferroviario
- Tráfico suburbano: sistemas de transporte metropolitano
- Trasvase de cuencas hidrográficas
- Desvío del cauce de un río mientras se construye una presa
- Instalaciones para centrales hidroeléctricas
- Transporte de agua (para abastecimiento, para centrales hidroeléctricas o como cloacas)
- Transporte de gas, petróleo y otros materiales
- Conducción de otros servicios, como cables de comunicaciones
- Defensa civil o militar

Los requerimientos del uso final que se dará a los túneles mineros y civiles, determinan que se presenten diferencias en la forma como se enfoca el proceso constructivo, pues si en el caso de los túneles mineros, éstos sólo sirven como medio de acceso hacia el material, no ocurre lo mismo en los túneles civiles, donde lo que se valora es el recinto resultante.

La tabla 1.1 resume los objetivos que se espera alcanzar durante la construcción de los túneles:

Criterio	Túneles Mineros	Túneles Civiles
Metas de producción	Las metas de producción son medidas en toneladas o m <sup>3</sup> .	La producción se mide en m de túnel, se procura hacer el frente de avance tan rápido como sea posible.
Consideraciones del diseño	Minar las toneladas a un costo más bajo como sea posible, no siendo relevante el acabado.	Consideraciones detalladas de requerimientos en el diseño.
Uso de la maquinaria	Asegurar una alta utilización de la maquinaria.	La utilización de la maquinaria es una prioridad secundaria.
Seguridad y Medio Ambiente	Cumplir con las regulaciones de Seguridad y Medio Ambiente.	Cumplir con las regulaciones de Seguridad y Medio Ambiente.

**Tabla 1.1** Objetivos constructivos de túneles mineros y civiles<sup>8</sup>

### 1.2.3. SISTEMAS DE EXCAVACIÓN EN ROCA

#### A. CON PERFORACIÓN Y VOLADURA (*DRILL AND BLAST*)

Es el sistema de mayor utilización en los túneles alojados en roca. Su aplicación es la más recomendable cuando la roca presenta una alta resistencia, en cambio, cuando la resistencia es baja o media, es indistinta su aplicación o alternativamente la de los sistemas con medios mecánicos.<sup>9</sup>

Los procesos que componen este sistema tienen una estructura cíclica, siendo los principales: (1) replanteo topográfico, (2) perforación, (3) carga de explosivos, (4) voladura y ventilación, (5) desatado y regado, (6) remoción de escombros, y (7) sostenimiento.

<sup>8</sup> Adaptado a partir de: Baldeón, D. *Optimización de perforación frontal en desarrollo de túneles y galerías* [en línea]. Atlas Copco. XV Simposium de Ingeniería en Minas – SIMIN 2007. Chile, agosto 2007. <[http://www.simin.cl/PDF-Jueves-23-08/Optimizacion\\_de\\_Perforacion\\_Frontal\\_en\\_desarrollo\\_de\\_tuneles\\_y\\_galerias.pdf](http://www.simin.cl/PDF-Jueves-23-08/Optimizacion_de_Perforacion_Frontal_en_desarrollo_de_tuneles_y_galerias.pdf)> [Consulta: 28.06.08]

<sup>9</sup> Gobierno Vasco. Departamento de Transportes y Obras Públicas. *Manual de Criterios Técnicos relacionados con el Proyecto, Construcción y Explotación de los Túneles de Carretera* [en línea]. [s.l.], [1995?], p. 80-101. <[http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06\\_met.pdf](http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06_met.pdf)> [Consulta: 28.06.08]

### REPLANTEO TOPOGRÁFICO:

Consiste en marcar en el frente de avance la ubicación de los taladros que se van a perforar, de acuerdo a la disposición establecida por la malla de disparo, conocida también en otras latitudes como esquema de tiro.

Cuando se diseña la malla, se orienta hacia un propósito particular, que es romper el mayor volumen de roca con la menor cantidad de taladros y de explosivos.<sup>10</sup> No obstante, el diseño de malla debe ser tal que el disparo no produzca subexcavación, y menos aun, sobreexcavación elevada.

En el caso de los túneles con propósitos civiles, el replanteo topográfico requiere de alta precisión, pues es muy importante que el alineamiento establecido a través del replanteo se encuentre dentro de las desviaciones tolerables.

### PERFORACIÓN:



**Figura 1.1** Perforación con Jumbo

<sup>10</sup> Peurifoy, R. *Métodos, planeamiento y equipos de construcción*. 3a ed. México: Editorial Diana, 1965, p. 333.

Una vez esquematizada la malla de disparo en el frente de avance, se procede a perforar los taladros correspondientes, y para este propósito se pueden emplear perforadoras manuales convencionales (Jackleg) o mecanizadas (Jumbo). Independientemente del tipo de perforadora que se use, ésta debe garantizar precisión en el alineamiento de la perforación, en cualquier dirección que se realice.

#### CARGA DE EXPLOSIVOS:

Se introducen los explosivos en el interior del taladro perforado, y se conectan todos estos mediante un sistema de iniciación y un agente detonador, que puede ser eléctrico, no eléctrico o electrónico.



Figura 1.2 Carga de explosivos

## VOLADURA Y VENTILACIÓN:

Se evacua al personal y maquinaria a una distancia segura del frente cargado. Los taladros de un esquema típico de voladura se disparan con cierto desfase entre ellos (retardo o microrretardo), con la finalidad de hacer más efectiva la voladura.

Primero debe detonarse la zona central para formar un cráter, donde puedan liberarse los esfuerzos de las detonaciones posteriores, que corresponderán a la zona intermedia y finalmente a la zona periférica del contorno del túnel.

Es necesario esperar un tiempo prudente posterior a la voladura para que se ventile el frente, por varias razones: proporcionar aire fresco a los trabajadores, sacar los gases nocivos así como los vapores producidos por los explosivos y para sacar el polvo producido por la operación misma.<sup>11</sup>

## DESATADO Y REGADO:

El desatado tiene la finalidad de remover los fragmentos de roca que hubiesen quedado inestables luego de la voladura, y que se pueden desprender con cierta facilidad.

El regado permite controlar el polvo generado en el frente de excavación.

## REMOCIÓN DE ESCOMBROS:

Los escombros generados por la voladura y el posterior desatado de rocas, son eliminados en esta etapa, a través de una secuencia de carguío y transporte hacia botaderos previamente establecidos.

Para optimizar el ciclo productivo, se puede primero trasladar la totalidad de los escombros hacia nichos cercanos disponibles, al hacer esto el área de trabajo queda despejada para realizar el sostenimiento. Luego, los escombros ya pueden ser evacuados desde los nichos hacia los botaderos, sin provocar interferencias.

---

<sup>11</sup> Ibid, p. 335



Figura 1.3 Carguío de escombros: Scooptram y volquete

#### SOSTENIMIENTO:

Cuando el frente se encuentra sin escombros, se procede a colocar pernos de anclaje, concreto lanzado (shotcrete), mallas, cimbras metálicas<sup>12</sup> o costillas, dependiendo de las condiciones geológicas de la roca, es decir, si la roca es dura y estable, es probable que sólo se necesite colocar algunos pernos.

Conforme vaya desmejorando la condición de la roca, ya no sólo será suficiente colocar pernos, e irá aumentando el sostenimiento necesario para garantizar la estabilidad del macizo rocoso.

<sup>12</sup> Las cimbras metálicas son arcos de acero estructural, que se usan como suplemento al shotcrete, mallas y pernos de anclaje, en el soporte de excavaciones subterráneas.



**Figura 1.4** Sostenimiento con shotcrete, pernos y malla

Se han descrito los principales procesos que conforman el ciclo operativo del sistema de excavación *Drill and Blast*; ahora, es necesario mencionar otro aspecto muy importante relacionado con este sistema: la **seguridad industrial**.

En todo momento, deben cumplirse las normas de seguridad industrial vigentes en el territorio donde se sitúe la operación. Fundamentalmente, comprende lo siguiente:

- Ventilación, se debe suministrar, instalar, operar y mantener sistemas de ventilación en toda la excavación, de manera que la capacidad de dichos sistemas debe ser suficiente para asegurar que el aire en la excavación no presente ningún riesgo para la salud de los trabajadores, ni peligro de explosión.  
El suministro del sistema de ventilación debe incluir: (1) aparatos detectores de gases en el aire así como el equipo para su calibración; y (2) anemómetros, con los que se podrá medir la velocidad del aire.
- Iluminación y energía eléctrica, se debe proveer permanentemente la iluminación adecuada que se requiera para la excavación, así como

para los trabajos de supervisión. Esto no excluye la necesidad de tener lámparas portátiles de batería en número suficiente para cada sector de trabajo, y de lámparas portátiles de alta intensidad a fin de iluminar cualquier zona para inspección y/o mapeo geológico.

- Manejo de explosivos, se debe proceder tomando todas las medidas y precauciones correspondientes a lo indicado en las normas.

## B. CON MEDIOS MECÁNICOS

### ROZADORA:

Es una máquina para el corte de roca que usa una cabeza rotatoria con picos de ataque de punta, montada en un brazo articulado, que permite acceder a todos los puntos del frente de excavación. Cuenta con un sistema de recojo y acarreo de escombros desde el frente hacia la parte trasera de la máquina.

Los mecanismos descritos se encuentran ensamblados a un chasis móvil montado sobre orugas.

Estas máquinas utilizan el sistema de ataque puntual, en el cual la potencia total del motor de corte y el peso de la máquina se concentran en una única punta cortadora, lo que permite atacar rocas bastante duras.



Figura 1.5 Rozadora tipo Alpine

Existen dos sistemas de corte empleando rozadoras: *Ripping* y *Milling*. En el sistema *Ripping* el cabezal de corte gira perpendicularmente al eje del túnel, por lo que la roca es golpeada frontalmente. En el sistema *Milling*, el cabezal gira en torno a un eje longitudinal paralelo al eje del túnel, en este caso la roca es golpeada lateralmente, y no se aprovecha todo el peso de la máquina.

Ambos sistemas presentan ventajas y desventajas, y en consecuencia tienen aplicaciones para las que un sistema es más apropiado que el otro. En el mercado existen máquinas que permiten la aplicación de ambos sistemas mediante la sustitución del cabezal de corte.

#### TUNELADORA, TOPO O TBM (*TUNNEL BORING MACHINE*):

Es una máquina alargada que puede excavar túneles a sección completa, pues son diseñadas para abrir los túneles del tamaño deseado y con paredes lisas, lo que es difícil de conseguir con explosivos, que con frecuencia abren huecos mayores que el precisado (sobreexcavación). Gira y avanza accionada por energía hidráulica, arrancando la roca de la pared a través de una cabeza circular equipada con elementos de corte.



**Figura 1.6** Cabezal del TBM usado en el Proyecto Especial Olmos

Se trata de una máquina integral de construcción de túneles, pues es capaz no sólo de excavar la roca, sino que también retira el escombros y aplica el revestimiento del túnel. A su paso va dejando el túnel terminado.

Algunas ventajas respecto a otros sistemas de excavación son: eliminación de los riesgos de accidentes por explosiones y el ruido, ya que los trabajadores no están expuestos a humos y gases nocivos y pueden transportar los trozos de roca sin tener que parar para realizar las voladuras; los rendimientos conseguidos son mucho mayores que los logrados con otros sistemas.

También presenta ciertas desventajas, pues su uso no es rentable hasta una longitud mínima y considerando que se requiere cierto tiempo para diseñar, fabricar, transportar y montar la máquina; no se puede utilizar en suelos blandos, lodo o barro, ya que en vez de avanzar se hunde; los túneles a excavar requieren radios de curvatura grandes, pues el TBM no acepta curvas cerradas.

#### MARTILLO HIDRÁULICO:

El martillo hidráulico va montado sobre una retroexcavadora ordinaria o sobre excavadoras-cargadoras provistas de un sistema de evacuación de escombros. Tiene una importante utilidad cuando se trata de excavar rocas blandas o fisuradas.

Existen sistemas automáticos que ajustan la fuerza y cadencia de los golpes en función de la resistencia que presenta el terreno, con lo que se consiguen rendimientos muy elevados.<sup>13</sup>

#### 1.2.4. TÚNELES FAMOSOS

A lo largo de la historia humana, existen varios túneles que han determinado hitos en el progreso de la tunelería, por sus dimensiones, complejidad, aportes tecnológicos y otras razones que han motivado el interés común. Algunos de estos túneles son indicados en las tablas 1.2 y 1.3, mostradas a continuación:

---

<sup>13</sup> Gobierno Vasco. Departamento de Transportes y Obras Públicas. Op. Cit., p. 96.

Nombre	Ubicación	Uso	Longitud	Apertura
Mont Cenis	Francia - Italia	Ferrocarril	13,6 Km	1871
Simplon	De Suiza a Italia, a través de los Alpes	Ferrocarril	19,8 Km	1906 (1922)
Apenino	Italia	Ferrocarril	18,5 Km	1934
Delaware	Estados Unidos	Acueducto	137 Km	1944
Mont Blanc	Francia - Italia	Automóviles	11,6 Km	1965
Kammon	Japón	Ferrocarril	18,7 Km	1975
Arlberg	Austria	Automóviles	13,9 Km	1978
Frejus	Francia - Italia	Automóviles	13 Km	1980
Oshimizo	Japón	Ferrocarril	22,2 Km	1982
San Gotardo	Suiza - Italia	Automóviles	16,32 Km	1985
Seikan	Japón	Ferrocarril	53,85 Km	1988
Eurotúnel	Francia - Inglaterra	Ferrocarril	50 Km	1994
Lærdal	Noruega	Automóviles	24,5 Km	2000
Guadarrama	España	Ferrocarril	28,4 Km	2007

**Tabla 1.2** Túneles famosos del mundo<sup>14, 15</sup>

Nombre	Ubicación	Uso	Longitud	Apertura
El Platanal	Cañete, Lima	Hidroenergético	12,5 Km	2009
Túnel Trasandino de Olmos	Lambayeque, Lambayeque	Irrigación e Hidroenergético	21 Km	2010
Túnel de Kovire	Tarata, Tacna	Irrigación, Agua Potable e Hidroenergético	8,4 Km	1994
Charcani	Arequipa, Arequipa	Hidroenergético	10 Km	1989

**Tabla 1.3** Túneles famosos del Perú<sup>16</sup>

<sup>14</sup> Sandoval, J. *Grandes Pasadizos* [en línea]. Revista D – Semanario de Prensa Libre, 25 de junio 2006, No 103. <<http://www.prensalibre.com/pl/domingo/archivo/revistad/2006/junio06/250606/mundo.shtml>> [Consulta: 28.06.08]

<sup>15</sup> Puell, F. *Capítulo I: Definición, historia y normativa de túneles* [en línea]. Febrero 2008. <[http://www.equipodeprospecciones.com/descargas/modulo\\_excavaciones\\_subterranas/tema\\_historia\\_v\\_2.pdf](http://www.equipodeprospecciones.com/descargas/modulo_excavaciones_subterranas/tema_historia_v_2.pdf)> [Consulta: 28.06.08]

<sup>16</sup> Elaboración propia.

### 1.3. MAQUINARIA TRADICIONAL

Se refiere a la maquinaria asociada al sistema tradicional de perforación y voladura para la excavación de túneles.

De acuerdo al ciclo productivo descrito anteriormente, las actividades que determinan el uso prioritario de maquinaria son la perforación y el retiro de escombros.

#### 1.3.1. MAQUINARIA PARA PERFORACIÓN

##### A. PERFORADORA MANUAL

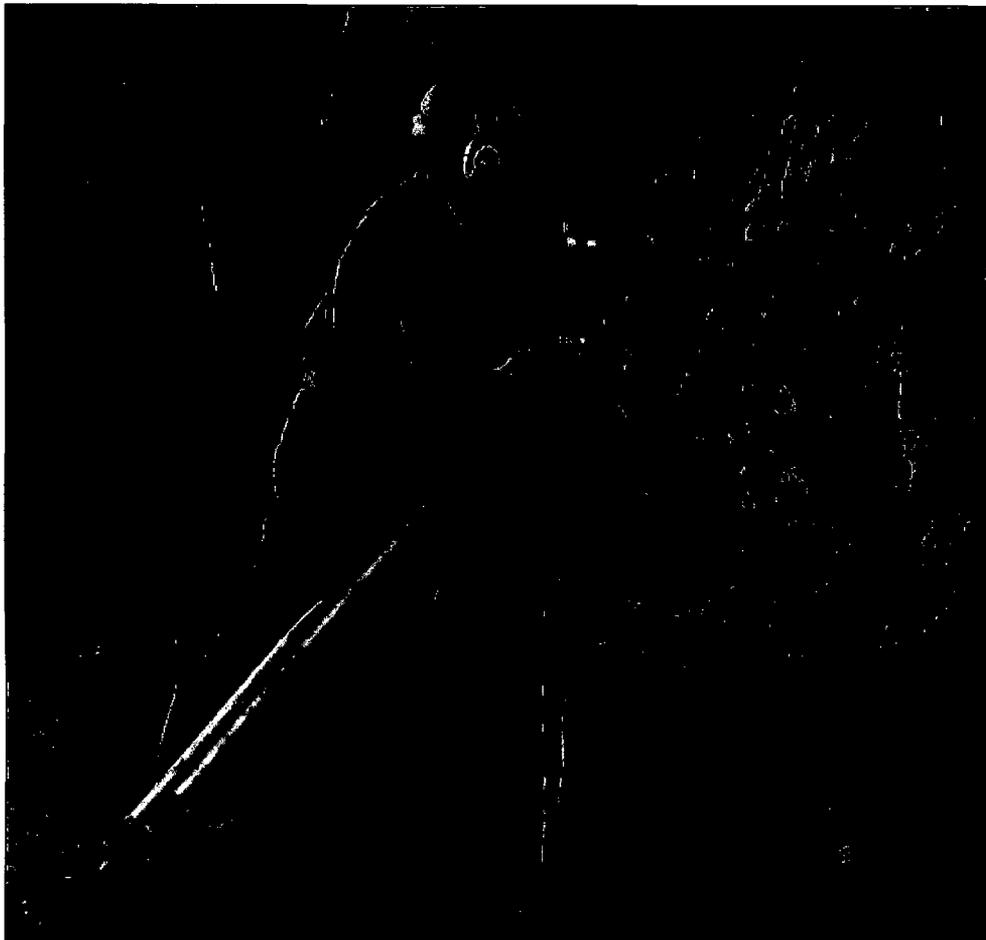


Figura 1.7 Perforadora manual

Son máquinas que funcionan a percusión, accionadas por aire comprimido. La barrena golpea contra la roca girando de manera discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro. El detritus generado es retirado hacia el exterior del taladro empleando agua, que a la vez sirve como refrigerante de la barrena.

#### B. PERFORADORA MECANIZADA (JUMBO)

Se trata de una carrocería automóvil equipada con uno o hasta cuatro brazos articulados, en cada uno de los cuales puede montarse una perforadora o una cesta para uno o dos operarios. El mecanismo de los brazos permite el acceso hacia cualquier parte del frente de excavación.

El funcionamiento del Jumbo es eléctrico cuando se encuentra estacionado en situación de trabajo y puede disponer de un motor Diesel para su desplazamiento.



Figura 1.8 Jumbo de 4 brazos

Fuente Atlas Copco

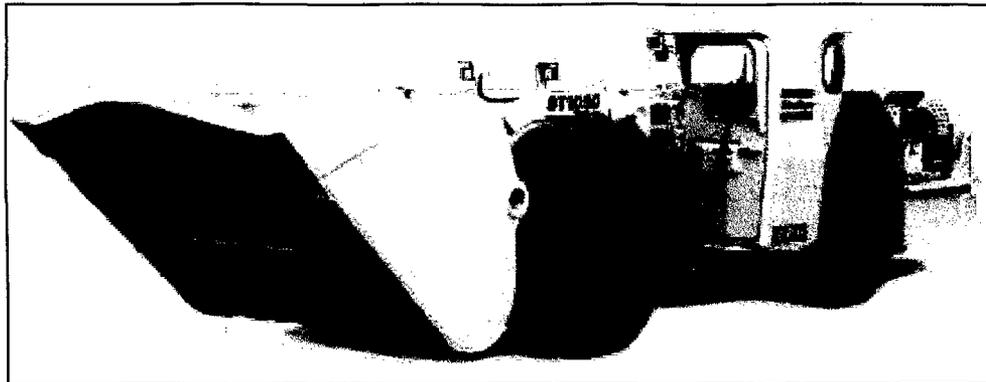
Los martillos trabajan a rotopercusión: la barrena gira en forma continua ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro. El accionamiento es hidráulico, con lo que se consiguen potencias mucho más elevadas que con el sistema neumático. Similar a las perforadoras manuales, el arrastre del detritus y la refrigeración se consiguen con agua.

Los Jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar la malla de disparo y perforar todos los taladros automáticamente.<sup>17</sup>

### 1.3.2. MAQUINARIA PARA EL RETIRO DE ESCOMBROS

#### A. PALA CARGADORA DE BAJO PERFIL

Se emplea para distancias relativamente cortas y cuando los túneles presentan una sección pequeña o mediana. La pala se encarga de cargar el escombros del frente y transportarlo hacia el exterior. En la operación no se requiere que la máquina gire, ya que el operador se sienta lateralmente y puede conducir en ambos sentidos.



**Figura 1.9** Scooptram ST1030

**Fuente** Atlas Copco

<sup>17</sup> Gobierno Vasco. Departamento de Transportes y Obras Públicas. Op. Cit., p. 85-86.

Los Scooptrams son equipos que pertenecen a esta categoría, y proveen un respaldo poderoso para la carga subterránea. En el mercado se encuentran modelos de variados tamaños y con distintas capacidades de desplazamiento, pudiendo tener motor eléctrico (mayormente usados en minería) o motor diesel (en tunelería con propósitos civiles).

### B. PALA CARGADORA MÁS CAMIÓN DUMPER

Esta combinación se recomienda cuando las distancias de transporte son grandes. La pala cargadora montada recoge el escombros y lo carga sobre el dumper, que se encargará de conducir el material fuera del túnel.

Cuando las distancias que tiene que recorrer el dumper son muy grandes, se pueden ensanchar ciertos tramos del túnel, a fin de que puedan trabajar varios dumpers pudiendo cruzarse entre si.

### C. HÄGGLOADER

El Häggloader es una máquina sobre ruedas, que cuenta en la parte frontal con unos brazos de excavación, que acercan los escombros hasta una cinta transportadora incorporada, donde serán evacuados hasta la parte posterior.

La experiencia demuestra que esta maquinaria presenta una alta productividad en todo tipo de túneles, ya que su sistema de carga es eficaz.



Figura 1.10 Häggloader 10HR

Fuente GIA industri ab

#### 1.4. RESUMEN

Se presenta en este capítulo la definición de túnel, y de acuerdo a su uso se establecen dos grupos: túneles mineros y túneles con propósitos civiles; ambos grupos son comparados desde el punto de vista de los objetivos que se deben alcanzar durante su construcción.

En cuanto a los sistemas de excavación en roca, se detallan las principales características de la excavación por perforación y voladura (*Drill and Blast*), y de la excavación con medios mecánicos (rozadora, TBM y martillo hidráulico). Como parte de la tunelería aplicada a obras civiles, se incluye una lista de túneles famosos.

Finalmente, se describe la maquinaria tradicional utilizada en tunelería, para la perforación y para la remoción de escombros. Dentro de las maquinarias detalladas, se encuentran el Jumbo (perforación) y el Scoop (remoción de escombros).

## Capítulo 2 MAQUINARIAS

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo del capítulo 1, se describieron las generalidades en cuanto a los túneles, partiendo desde su definición hasta la descripción de la maquinaria que se emplea para su construcción. Precisamente desde este último tópico, es decir, la maquinaria, es que surge la necesidad de ahondar más en cuanto a este tema para continuar con el análisis de la optimización planteada por la Tesis.

Más allá de la descripción realizada en el capítulo 1, lo que ahora se desarrollan son los costos asociados a las maquinarias, separados en dos categorías: costos de operación y mantenimiento, y costos de posesión o inversión. Al respecto de los costos de posesión, se complementa la información detallando los métodos de depreciación que existen.

### 2.2. NATURALEZA DE LOS COSTOS

Para desarrollar la teoría referente a los costos asociados a las maquinarias, se ha dividido éstos en dos grupos: costos de Operación y Mantenimiento, y costos de Posesión o Inversión.

#### 2.2.1. COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de Operación y Mantenimiento, han sido subdivididos en dos categorías: costos Operacionales y costos por No Disponibilidad.

## A. COSTOS OPERACIONALES

### OPERADOR:

El costo determinado por el operador de la maquinaria, no será considerado como componente del costo operacional que se establecerá para esta Tesis, pues se juzga como no imputable a la vida útil de la maquinaria.

### COMBUSTIBLE:

Comprende el costo por todos los consumos de gasolina y diesel para el funcionamiento de los motores.

La maquinaria considerada en el desarrollo de esta Tesis, consume combustible tipo Diesel 2. Mientras que el Scooptram emplea el diesel para su traslado y operación, el Jumbo sólo lo hace para su traslado.

El consumo de combustible se encuentra en directa proporción con la potencia nominal del equipo, y con un factor de operación determinado por las condiciones del trabajo.

Sin embargo, se suele establecer su control a través de ciertos ratios, como pueden ser: consumo de combustibles por hora de trabajo, o por kilómetros de recorrido.

### NEUMÁTICOS:

Costo correspondiente al desgaste de los neumáticos. Cuando se considere este costo, al calcular la depreciación de la maquinaria deberá deducirse del valor inicial de la misma el valor de los neumáticos.

Para determinar su costo horario, se divide el valor inicial de los neumáticos entre su vida económica útil.

La estimación de la vida económica útil de los neumáticos se realiza de acuerdo a la experiencia, tomando en consideración las condiciones de la operación, determinadas por factores como: velocidad máxima del trabajo, condiciones de las vías por donde transitará la maquinaria, cargas que soportará, y el clima.

## LUBRICANTES, GRASAS Y FILTROS:

Es el costo originado por los cambios periódicos, de servicio, de los lubricantes, las grasas y los filtros. Este costo puede ser estimado como un porcentaje del costo de los combustibles.

Para establecer un adecuado control sobre estos consumos, la mejor fuente de información la proveen los registros, que el propietario o administrador de la maquinaria deben llevar.

## REPUESTOS:

Costo originado por el reemplazo de las piezas de la maquinaria. Se conoce que las piezas de cualquier equipo están sujetas a fallas debido al desgaste ocasionado por el tipo de uso y por la frecuencia de éste. Similar a otros componentes de costo, para un adecuado control se debe llevar un buen registro de estos elementos.

## B. COSTOS POR NO DISPONIBILIDAD

La disponibilidad de la maquinaria se mide por el porcentaje del tiempo en que ésta se encuentra operativa en la obra. Se calcula usando la siguiente relación:

$$\text{Disponibilidad}(\%) = \frac{\text{Horas}_{\text{Totales}} - \text{Horas}_{\text{F/S}}}{\text{Horas}_{\text{Totales}}}$$

2.1

Las horas totales por turno corresponden a la diferencia entre los horarios de fin y de inicio de turno definidos para una obra en particular.

Las horas F/S (Fuera de Servicio) son las horas del turno en que el equipo no está disponible para su utilización en la obra. Esta No Disponibilidad se debe a: (1) fallas mecánicas, y (2) mantenimiento programado dentro del turno.

No se considera como parte de las horas F/S el tiempo perdido ocasionado por:

- Causas atribuibles a la obra (Stand By).

- Tiempo de reparación de la maquinaria por consecuencia de mala operación o siniestros.
- Tiempo usado en el cambio o reparación de neumáticos producto del siniestro de éstos (pinchazos, cortes laterales).
- Tiempo usado para intervenir la maquinaria cuando no está programado su uso.

#### NO DISPONIBILIDAD POR FALLAS MECÁNICAS:

Una falla es un evento no programado que impide la utilización de la maquinaria en el uso que ha sido designado. La falla mecánica debe su origen a desperfectos de la maquinaria o deficiencias de mantenimiento.

#### NO DISPONIBILIDAD POR MANTENIMIENTO PROGRAMADO:

El tiempo por mantenimiento considerado como parte de las horas F/S es aquel tiempo programado para esta actividad dentro de las horas totales del turno.

Los dos elementos arriba descritos, componentes del tiempo de No Disponibilidad, generan un costo, cuya cuantificación se sugiere e implementa para esta Tesis, en proporción directa con las pérdidas de venta generadas por las horas F/S.

### 2.2.2. COSTO DE POSESIÓN O INVERSIÓN

#### A. VALOR DE ADQUISICIÓN

Este valor incluye el precio de la maquinaria puesta en el puerto de embarque más los gastos de embarque, fletes y desembarque en el puerto del Callao, pagos de derecho Ad Valorem, sobre tasa arancelaria, impuesto general a las ventas (de ser aplicable), derechos portuarios de almacenaje, seguros para bienes en tránsito, otros gastos conexos (cartas de crédito, garantías), entre otros.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Ramos, J. *El equipo y sus costos de operación*. 3a Ed. Lima: Fondo Editorial CAPECO, 2007, p. 10

Para el enfoque particular de esta Tesis, el valor de adquisición que se usará es el valor de la maquinaria puesta en obra.

## B. VALOR DE VENTA

Respecto al valor de venta, para esta Tesis se establecen las siguientes definiciones:

### VALOR COMERCIAL:

Es el precio al que la maquinaria podría venderse en el mercado, determinado por las condiciones de oferta y demanda en ese momento.

### VALOR RESIDUAL:

Es aquella parte del valor de la maquinaria que se espera recuperar por su venta al final de su vida útil.

### VALOR DE SALVAMENTO:

Es el valor que se obtiene por la venta de un equipo en cualquier momento de su vida útil.

### VALOR DE REPOSICIÓN:

Es el costo de reemplazar una maquinaria por otra similar.

## C. OVERHAUL

Un Overhaul o reparación mayor, consiste en la reparación parcial y/o completa de un equipo, abarcando todas sus piezas y componentes, los cuales son refaccionados en su totalidad en talleres, de los que se derivan sus partes a las respectivas áreas especializadas en cada componente.

Los objetivos que se persiguen al realizar un Overhaul son: aumentar la productividad; ahorrar tiempo en reparaciones; mejorar la calidad de sus

componentes; alargar la vida útil del equipo; reducir los costos de operación y mantenimiento; entre otros.

### 2.3. MÉTODOS DE VALUACIÓN DE ACTIVOS

La valuación o valoración es el proceso de estimar el valor de un activo o de un pasivo, ejercicio que puede considerarse tanto un arte como una ciencia pues no hay criterios absolutos para su realización, y depende finalmente de la experiencia y juicio del perito que realice la valuación.

Los siguientes, son los principales métodos de valuación:

#### 2.3.1. FLUJO DE CAJA DESCONTADO

Es un método de valuación absoluto, que responde al criterio de “negocio en marcha” y relaciona el valor de un activo con el valor presente de los flujos de caja esperados del mismo, empleando una tasa de descuento que represente el costo de oportunidad del capital empleado.

Para su adecuada aplicación se debe cumplir ciertos requerimientos mínimos, como:<sup>19</sup>

- Elaborar proyecciones de los distintos flujos de ingresos y egresos, de acuerdo a consideraciones técnico-económicas.
- Estimar las inversiones mínimas requeridas, sobre la base de un programa de inversiones proyectado.
- Determinar el costo de oportunidad sobre la base de la situación actual de los mercados financieros nacionales e internacionales.
- Calcular el valor residual al final del horizonte de proyección.

#### 2.3.2. VALUACIÓN EN EL MERCADO

Esta metodología estima el valor del activo basado en los precios de mercado, determinados por el efectivo que se podría obtener en una transacción libre ejecutada de inmediato y en las condiciones presentes tanto del activo,

---

<sup>19</sup> ProInversión. Procedimiento para aplicar metodologías de valuación de activos, empresas y proyectos [en línea]. Lima, 13 de febrero del 2004. <[http://www.proinversion.gob.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/CONSULTORIA\\_ABASTECIMIENTO\\_AGUA\\_HUACHIPA/P-04-2004-DE.pdf](http://www.proinversion.gob.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/CONSULTORIA_ABASTECIMIENTO_AGUA_HUACHIPA/P-04-2004-DE.pdf)> [Consulta: 28.08.08]

como su estado de conservación y capacidad de uso, así como del entorno y posibles demandantes.

Para su aplicación se deberá contemplar lo establecido en el Reglamento Nacional de Tasaciones vigente (del año 2007), usos y prácticas en el mercado y otras disposiciones aplicables.

También, deberá tomarse en cuenta factores como: características propias del activo, antigüedad, grado de conservación, situación legal, cargas y gravámenes, ocupación y uso, y ciertas contingencias o limitaciones.

## 2.4. DEPRECIACIÓN

La depreciación es el desgaste en el valor que sufre un activo en el transcurso de su vida útil. El monto pagado por el activo será distribuido como costos durante el tiempo que preste servicios a su propietario.

Entendido de otra forma, el proceso de depreciación es la distribución periódica, sistemática y racional del costo del activo.<sup>20</sup>

Las causas que producen la reducción del valor del activo pueden clasificarse en:<sup>21</sup>

- CAUSAS FÍSICAS
  - Uso o desgaste por la operación normal del activo.
  - Decrepitud, acción del tiempo y de los elementos naturales.
  
- CAUSAS FUNCIONALES
  - Insuficiencia, el activo no genera la producción requerida.
  - Obsolescencia, el activo no presta el servicio requerido por razones tecnológicas o porque su operación resulta antieconómica.
  
- CAUSAS EVENTUALES
  - Accidentes

---

<sup>20</sup> Palenque, J. Depreciación & Revalorización. En: *Contabilidad y Decisiones* [en línea]. Cap. 5 <[http://pz.ucb.edu.bo/publicaciones/libros/contabilidad\\_decisiones/pdf/contdec\\_ap2.pdf](http://pz.ucb.edu.bo/publicaciones/libros/contabilidad_decisiones/pdf/contdec_ap2.pdf)> [Consulta: 28.08.08]

<sup>21</sup> Cámara Chilena de la Construcción (Santiago). *Las Depreciaciones del Activo Fijo, Escudo Tributario* [en línea]. *Cartilla Tributaria*, 1 (2007). <<http://www.cchc.cl/kwldg/databank/19710.pdf>> [Consulta: 30.08.08]

Para distribuir en el tiempo la depreciación de un activo, existen varios métodos, a saber:

#### 2.4.1. MÉTODO DE LA LÍNEA RECTA

El fundamento del método de la línea recta es que el activo se desgasta por igual y a razón constante durante todos los periodos que comprenden su vida útil. Se recomienda la aplicación de este método cuando el activo tendrá un uso relativamente parejo.

De esta forma, la depreciación por cada periodo se calcula dividiendo el valor total a depreciar entre el número de periodos. El valor total a depreciar es el resultante de restar el valor residual del valor de adquisición del activo.

Si se considerase la división de la vida útil del activo en periodos anuales, se tendría:

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\text{Valor de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{Años de vida útil}}$$

2.2

#### 2.4.2. MÉTODO DE LAS UNIDADES PRODUCIDAS

El enfoque de este método se centra en el factor uso o prestación de servicio del activo. Se considera que a mayor uso o producción o servicio del activo, consecuentemente mayor será el deterioro del mismo.

Considerando la maquinaria como el activo, la aplicación de este método requiere en principio estimar la cantidad de unidades de producción que realizará el equipo, si fuese ese el enfoque más cercano a las necesidades del propietario, que también podría ser la cantidad de horas que trabajará o la cantidad de kilómetros que recorrerá dicho equipo.

La relación matemática que plasma lo descrito es:

$$\text{Depreciación}_k = \text{Valor a depreciar} * \frac{\text{Unidades producidas / usadas}_k}{\sum_{i=1}^n \text{Unidades producidas / usadas}_i}$$

2.3

Donde:

- $k$  : Período (1, 2, 3, ..., n)  
 $n$  : Número de periodos de la vida útil

### 2.4.3. MÉTODO DE LA SUMA DE LOS AÑOS DE VIDA

Este método considera la elaboración de una progresión aritmética de razón 1, que va desde el número 1 hasta un número equivalente a la cantidad años establecidos como vida útil del activo.

Luego, la tasa de depreciación que se aplicará para cada periodo es igual a una fracción cuyo denominador es la suma de los términos de la progresión aritmética elaborada, y cuyo numerador es el valor correspondiente de ordenar la progresión anterior en forma decreciente.

Entonces, la depreciación en cada periodo se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Depreciación}_k = (\text{Valor de adquisición} - \text{Valor residual}) * \frac{n+1-k}{\sum_{i=1}^n i}$$

2.4

Donde:

- $k$  : Período (1, 2, 3, ..., n)  
 $n$  : Número de periodos de la vida útil

### 2.4.4. MÉTODO DE LA DOBLE TASA DE SALDO DECRECIENTE

Consiste en aplicar una tasa de depreciación igual al doble de la que se usaría en el método de la línea recta, sobre los saldos netos del activo depreciable. Es decir, en cada periodo se aplica la tasa calculada como el doble de la tasa de una depreciación uniforme sobre el valor que resulta de restar la depreciación acumulada del valor de adquisición del activo.

La depreciación en cada periodo se calcula con la relación matemática mostrada:

$$Depreciación_k = (Valor\ de\ adquisición - \sum_{i=1}^{k-1} Depreciación_i) * 2 * r$$

2.5

Donde:

$k$  : Período (1, 2, 3, ..., n)

$r$  : Tasa que se usaría en la depreciación uniforme

Puesto que es necesario conservar el valor residual, la cantidad a depreciar no puede alterarse del valor original, por tanto es preciso ajustar la depreciación del último periodo de la vida útil del activo, de tal suerte que el total de la depreciación acumulada llegue a ser igual a la cantidad a depreciar originalmente calculada.

## 2.5. RESUMEN

Se desarrolla la teoría de la naturaleza de costos, que no es otra cosa que la descripción de los componentes del costo, divididos en dos grandes grupos: los costos de operación (incluyen costos operacionales y costos por No Disponibilidad), y costos de posesión o inversión. Son especificados y delimitados varios conceptos, que serán recurrentemente usados en el desarrollo de la Tesis.

También, se hace un breve recorrido por la teoría de valuación de activos, explicando los dos principales métodos que al respecto existen.

Finalmente, se explica el fenómeno de la depreciación, y los cuatro principales métodos que existen para calcularla, entre ellos, el método de depreciación lineal o uniforme.

## Capítulo 3

### MOMENTO ÓPTIMO DE REEMPLAZO

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

Una persona, como también una empresa, con posesión de activos como una maquinaria por ejemplo, sin mayor profundidad de análisis puede percatarse que con el tiempo, el activo va desgastándose y cada vez va reduciendo más y más su eficiencia.

Ante ello, surge la ineludible necesidad de reemplazar el activo, ya sea por uno de la misma clase pero nuevo, o por otro más moderno, que se estima ha de realizar las mismas o más funciones, pero de manera más idónea.

Lo que no resulta tan evidente, es si existe un momento que sea mejor que otro para realizar el reemplazo, y en el caso de que sí existiera tal diferencia respecto a cuando se ejecute el reemplazo, entonces, ¿existe un momento que sea mejor que todos los demás, es decir, un momento óptimo?

Este capítulo parte de esta interrogante, y al final, se logra demostrar que sí existe el momento óptimo de reemplazo.

#### 3.2. ¿EXISTE UN MOMENTO ÓPTIMO?

De cara a la decisión del reemplazo de maquinaria, lo primero que se tiene que establecer es la real necesidad de realizar dicho reemplazo.

A saber, existen dos factores principales que influyen en tal determinación: el deterioro y la obsolescencia.<sup>22</sup>

Sálvese el hecho de que se considera que la maquinaria puede continuar operando, pues también puede surgir la ineludible necesidad del reemplazo por

---

<sup>22</sup> De Las Casas, L. Reemplazo de Bienes Captales [en línea]. *Revista Desde Adentro*, 25 (2005): 34-36. <<http://www.snmpe.org.pe/wInformacion/revistas/revista2005/pdf/25/panorama.pdf>> [Consulta: 14.07.08]

destrucción física o por imposibilidad de seguir prestando un nivel de servicio apropiado.<sup>23</sup>

El deterioro se traduce en la reducción progresiva de la eficiencia de la maquinaria, partiendo desde una eficiencia inicial, cuando nueva.

La obsolescencia implica un menor nivel de producción de la maquinaria en contraste con otros equipos alternativos en el mercado.

El deterioro y la obsolescencia son criterios técnicos, pero sus síntomas determinan el inicio del análisis del reemplazo, y que se traducen en repercusiones económicas, sobre la base de cuyo análisis es que se debe decidir el reemplazo.

Para establecer cuando se debe reemplazar la maquinaria, y si es que existe un momento en particular que sea mejor que otros (momento óptimo), se debe trazar un esquema de la evolución de los costos asociados a la maquinaria en una escala temporal.

De acuerdo a la estructura de costos pautada en el Capítulo 2, se divide el costo total en dos grupos: (1) Inversión, y (2) Operación y Mantenimiento.

### 3.2.1. INVERSIÓN

Debe tomarse en consideración que las maquinarias en general, tienen una vida útil para la cual son diseñadas, pues resulta ilógico pensar en alguna maquinaria que dure eternamente. Durante el transcurso de dicha vida útil, la maquinaria va pasando por un proceso de envejecimiento y poco a poco va perdiendo su valor, hasta que al final, sólo tiene un valor residual.

Entonces, el primer factor que afecta a una maquinaria, esté en operación o no, es su depreciación, cuyo comportamiento puede ser representado por una función que describa la velocidad a la que se produce la misma. Generalmente, esta velocidad es leve al comienzo y se va incrementando con el tiempo.<sup>24</sup>

La figura 3.1 permite apreciar una curva característica de la evolución de la inversión en el tiempo.

<sup>23</sup> Viveros, A.; González, G.; Rodríguez, R. Aproximación al reemplazo de equipo industrial [en línea]. *Scientia et Technica*, 25 (2004), p. 164. <<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/165520163-168.pdf>> [Consulta: 18.08.08]

<sup>24</sup> Espinosa, F. *Modelo para el estudio del reemplazo de un equipo productivo* [en línea]. Material de estudio y consulta. Universidad de Talca, [200-], 11 p. <<http://ing.otalca.cl/~fespinos/4-MODELO%20PARA%20EL%20ESTUDIO%20DEL%20REEMPLAZO%20DE%20UN%20EQUIPO.pdf>> [Consulta: 14.07.08]

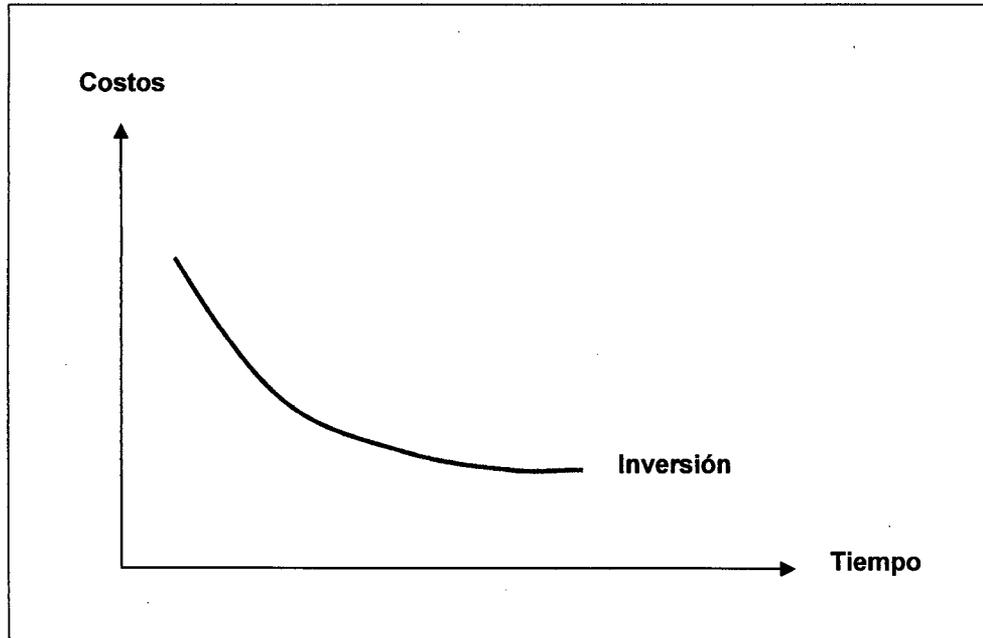


Figura 3.1 Costo de Inversión en el tiempo

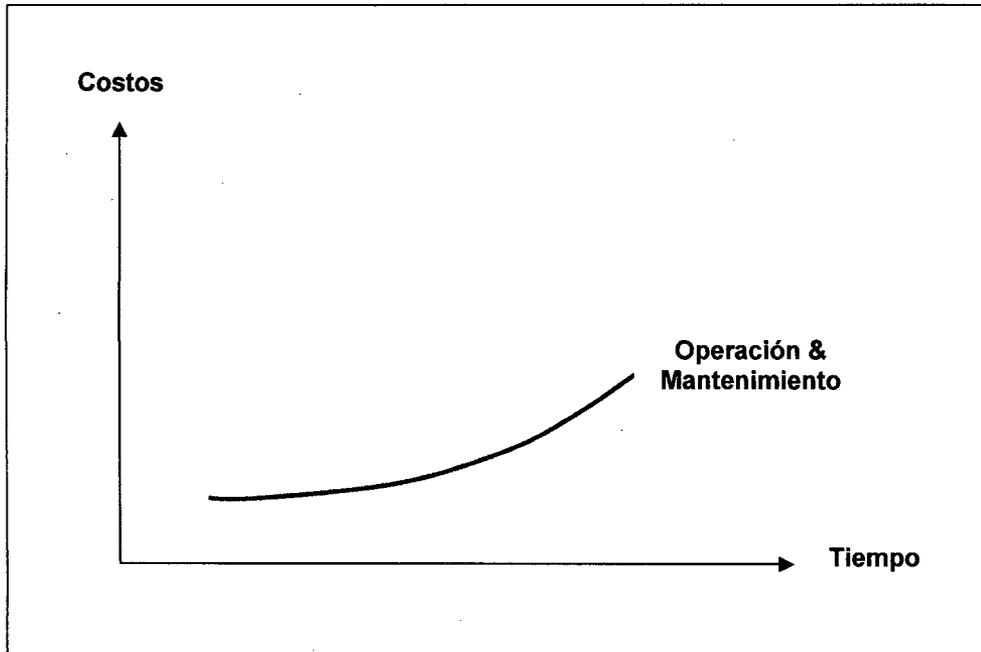
### 3.2.2. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Anteriormente se establecieron los conceptos de deterioro y obsolescencia, señalados como factores determinantes frente a la decisión del reemplazo. Ahora, se explica su efecto en la evolución temporal de los costos de operación y mantenimiento.

El deterioro afecta la maquinaria por influencia del desgaste de sus componentes esenciales, y consecuente pérdida de sus juegos, tolerancias y acabado cumplimiento de la función asignada. El efecto es la pérdida de eficiencia, que determina la incapacidad creciente del equipo. Se entiende que esto podría ser revertido, pero surge un punto esencial de análisis: ¿a qué costo?

La obsolescencia afecta la maquinaria por efecto del avance tecnológico que tiende a producir maquinaria de mejores características y más segura; la consecuencia es que a medida que transcurra el tiempo será más difícil y costoso adquirir los repuestos, los manuales de mantenimiento no los consultarán y la capacitación será anacrónica.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Espinoza, J. Reemplazo de equipos, un enfoque de mantenimiento [en línea]. *Revista Mantenimiento*, 1 (1990). <<http://www.aciem.org/bancoconocimiento/R/Replazodeequipos/Replazodeequipos.asp>> [Consulta: 18.07.08]



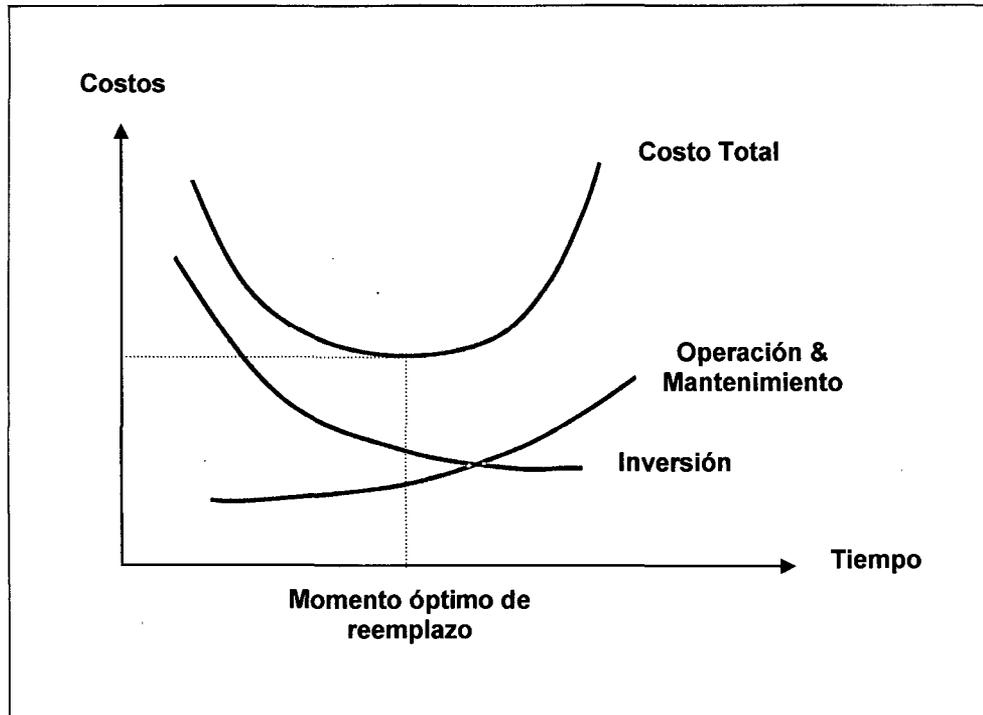
**Figura 3.2** Costo de Operación y Mantenimiento en el tiempo

En la figura 3.2, se presenta una curva que retrata el comportamiento del costo de operación y mantenimiento en la línea del tiempo.

### 3.2.3. MOMENTO ÓPTIMO

En este capítulo, se ha referido que la necesidad del reemplazo está influenciada por dos factores principales, y se ha establecido que la problemática del reemplazo tiene una connotación económica en esencia, donde el norte está fijado en un punto de equilibrio, en el que los costos totales sean mínimos, o que equivalentemente el rendimiento de la inversión sea máximo.

Se presenta a continuación, la transposición de las curvas mostradas en las figuras 3.1 y 3.2. La unión de ambas curvas, determina una tercera curva que representa el costo total asociado a la maquinaria.



**Figura 3.3** Costos de maquinaria en el tiempo

Al revisar la figura 3.3, se logra apreciar que existe un punto en el tiempo, para el que el costo total es mínimo. Se deduce entonces que efectivamente, **sí existe un momento óptimo para efectuar un reemplazo**, antes o después del cual, realizar el reemplazo resulta inadecuado, pues redundaría en mayores costos.

### 3.3. CASO DE ÉXITO

Se describe la experiencia publicada en la revista "Ingeniería de Sistemas", bajo el artículo denominado "Reemplazo de Equipos en un Sistema Productivo Complejo"<sup>26</sup>.

#### 3.3.1. NATURALEZA DEL ESTUDIO

El estudio fue desarrollado para su aplicación en la mina de cobre Chuquicamata, propiedad de la empresa chilena CODELCO.

<sup>26</sup> Bosch, M.; Varas, S. Reemplazo de Equipos en un Sistema Productivo Complejo [en línea]. *Revista Ingeniería de Sistemas*, XV (2001): 93-115. <[http://www.dii.uchile.cl/ris/articulos/art\\_reemplaz.pdf](http://www.dii.uchile.cl/ris/articulos/art_reemplaz.pdf)> [Consulta: 23.07.08]

El problema abordado consistió en determinar el reemplazo óptimo de palas en la mina, equipos que son de alto valor (en el orden de 4 a 7 millones de dólares), considerando la complejidad del sistema productivo, un horizonte de decisiones finito y requerimientos variables de extracción de materiales.

### 3.3.2. PLANTEAMIENTO ADOPTADO

Para cuando se realizó el estudio, la Administración de la Mina disponía de dos herramientas de gestión. La primera denominada Plan de Explotación de Largo Plazo (PLP), cuya finalidad era la de determinar las cantidades a producir durante cada año del horizonte de planificación; y la segunda herramienta consistente en un Modelo de Programación Lineal, cuyo objeto era el de determinar el parque de camiones y su política de reemplazo en el horizonte de explotación.

En esas circunstancias, el estudio se enfocó en la creación de una tercera herramienta que permitiese establecer el parque de palas óptimo para el cumplimiento del PLP, la política de compra, venta y baja de las palas así como del reemplazo de las mismas, con el objetivo final y primordial de reducir hasta el mínimo el costo de explotación.

El desarrollo de esta tercera herramienta se estableció por medio de un **Modelo de Programación Dinámica**, con capacidad de toma de decisiones de parque y reemplazo.

### 3.3.3. MODELO DE REEMPLAZO

Formulado a través de un Modelo de Programación Dinámica, en el que se consideró la división del horizonte de planificación en periodos anuales.

El modelo fue diseñado para que en cada periodo se determine el tamaño y composición del parque, mediante la decisión de adquirir diferentes flotas, y vender y/o dar de baja a las palas existentes. La solución del modelo fue establecida por el método *forward* (desde el periodo inicial hacia el periodo final).

Para el desarrollo del modelo, se hizo una simulación de la productividad para establecer una función que permitiese su incorporación al modelo. También fueron desarrolladas funciones de costos, que contemplaron costos directos, es decir, aquellos asociados a las palas; y costos indirectos incurridos sobre

camiones y otros equipos, por fallas en las palas y por el efecto red de los sistemas productivos.

### 3.3.4. PARÁMETROS DEL MODELO

Es preciso, definir el concepto posición, como una de las combinaciones: mina de procedencia – tipo de material extraído.

Los parámetros considerados fueron:

- Tasa de descuento por año.
- Horizonte de planificación.
- Número de tipos de flotas disponibles por año.
- Número máximo de compras realizables por año.
- Edades mínima y máxima para la venta de un equipo.
- Número de posiciones a ser extraídas durante el horizonte de planificación.
- Requerimiento de extracción de una posición específica en un año determinado.
- Distancia media a botaderos desde una posición en particular en un año específico.
- Cantidad de material por posición que una pala de una flota determinada puede extraer durante un año.
- Tiempo nominal de trabajo de una pala de una flota determinada en un año en particular.
- Tiempo de fallas largas de una pala de flota y edad específicas.
- Tiempo mínimo de reserva de una pala de flota y edad específicas.
- Productividad operativa para una pala de flota y edad específicas.

### 3.3.5. RESTRICCIONES CONSIDERADAS

Para establecer la solución del modelo generado, se consideraron dos condiciones de borde y seis restricciones.

Las condiciones de borde fueron: conocimiento del parque de palas en el año 0 con valor de función objetivo 0; y venta de todas las palas hacia el final del horizonte de planificación.

Enumeradas, las restricciones que se consideraron son:

1. La cantidad de palas asignadas a una posición específica debía satisfacer los requerimientos de tal posición, para un año determinado.
2. La cantidad de palas de flota y edad específicas asignadas a las distintas posiciones, no debía exceder el parque disponible de las palas de dicho tipo, debida consideración del tiempo de reserva y fallas mayores.
3. El número de compras posibles cada año no debía exceder el máximo permitido.
4. Función de transformación de los estados en el modelo de programación dinámica.
5. Existe una edad mínima y una edad máxima para la venta de una pala, dentro de cuyo rango sólo era posible la venta.
6. Las variables debían ser enteras y positivas.

### 3.3.6. SIMULACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

Se estableció que la productividad tiene dependencia de una gran cantidad de variables, cuyo efecto individual es de difícil determinación, por lo que el análisis requerido fue de la acción conjunta de todos estos factores.

Las variables determinadas para ser incorporadas en el análisis de su efecto sobre la productividad fueron: edad de la pala, distancia media a botaderos, número de camiones por pala, y capacidad nominal del parque de palas.

Se construyó un metamodelo para cada uno de los tipos de palas (4), en el que de las citadas variables, las tres primeras fueron consideradas como discretas, mientras que la cuarta fue considerada como continua.

### 3.3.7. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Dada la complejidad y la estructura del modelo creado, se encontró que para su resolución era recomendable dividir el modelo en dos partes: dos modelos jerárquicos.

El primero de tales modelos fue denominado Modelo del Parque de Palas (MPP), y su finalidad era la de establecer el parque de palas para un periodo específico, considerando el parque existente en el periodo anterior, y las limitantes de compra y venta de maquinaria.

El segundo modelo fue denominado Modelo de Asignación de Equipos (MAE). La característica de este modelo fue la de establecer para un parque de palas específico, la asignación óptima de palas a posiciones y de camiones a palas, garantizando el cumplimiento de los requerimientos de extracción.

La interacción establecida entre ambos modelos consistía en que un parque de palas determinado por el MPP era considerado factible, si al aplicar para tal parque de palas el MAE no se concluía que las soluciones eran inviables.

### 3.3.8. RESULTADOS

Los parámetros empleados para el modelo generado fueron: cuatro posiciones (dos minas y dos tipos de mineral), 20 años de horizonte de planificación, 15 años de vida útil, 8 años como edad mínima de venta, 2 palas como máximo a comprar por año, 25 palas como parque inicial, 4 modelos disponibles de palas (de 17, 28, 34 y 50 yd<sup>3</sup>), y una tasa de descuento de 12%.

La programación del modelo fue empleando el lenguaje FORTRAN, y su resolución tomó 40 minutos, con un computador 486DX de 40 MHz.

La política de reemplazo resultante, determinó una compra de 9 palas y la venta de 21. Hacia el final del horizonte de planificación, la flota óptima determinada se reduce a un parque de 6 palas de 50 yd<sup>3</sup>. Considérese que los requerimientos de extracción de las minas estudiadas son decrecientes con el tiempo.

La utilización del modelo, significó un ahorro del 20 a 30% en los costos totales, y una considerable disminución en el tiempo de evaluación de la política de reemplazo.

### 3.4. RESUMEN

Este capítulo parte de la interrogante ¿existe o no un momento óptimo para realizar el reemplazo de una maquinaria?, con el objetivo fijado en

establecer la respuesta a esta interrogante, se define primero dos factores relevantes para establecer la necesidad del reemplazo: el deterioro y la obsolescencia, factores que son técnicos, pero que finalmente tienen un impacto en el plano económico. Precisamente, el eje principal para la decisión de establecer un reemplazo se basa en consideraciones económicas, es por ello que, haciendo hincapié en el contenido del capítulo 2, se divide el costo en dos grupos: costo de inversión, y costo de operación y mantenimiento.

Se hace una explicación del comportamiento en el tiempo de estos dos componentes del costo, siendo decreciente la curva de la inversión, y en su contraparte, la curva de operación y mantenimiento tiene una tendencia creciente. Posteriormente, tras la superposición de estas dos curvas, se determina la curva del costo total, y se establece que efectivamente, sí existe un momento óptimo para realizar el reemplazo.

Luego, se describe un caso de éxito al respecto de la determinación de reemplazos óptimos, que es la experiencia publicada en la revista "Ingeniería de Sistemas", a través del artículo denominado "Reemplazo de equipos en un sistema productivo complejo". Este estudio, fue desarrollado para su aplicación en la mina de cobre Chuquicamata, propiedad de la empresa chilena CODELCO. El modelo adoptado para el referido estudio es el de la Programación Dinámica, y sus resultados son óptimos en cuanto al ahorro económico generado por las decisiones adoptadas, y en cuanto al ahorro de tiempo para la evaluación de las políticas de decisiones de la empresa.

Este artículo, entre otras cosas, confirma la existencia del momento óptimo para la realización del reemplazo de maquinaria, y establece un antecedente positivo acorde a los objetivos de esta Tesis.

## Capítulo 4

### ANÁLISIS DE MODELOS EXISTENTES

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 se estableció la existencia del momento óptimo de reemplazo, que es cuando las condiciones y circunstancias determinan que la realización del reemplazo resulte más beneficiosa que en cualquier otro momento, analizado esto desde un enfoque económico.

Lo anterior resulta interesante, pero a su vez da origen a una nueva interrogante que es ¿cómo determinar con precisión cuál es ese momento?... para establecer la respuesta a tan importante cuestionamiento, existen modelos que analizan el reemplazo, y desde perspectivas diferentes plantean como optimizarlo. De los modelos referidos, en este capítulo se describen los más importantes, a juicio del autor, clasificados en dos grupos: modelos de comparación antiguo - nuevo, y modelos de optimización.

#### 4.2. MODELOS DE COMPARACIÓN ANTIGUO - NUEVO

Son modelos que establecen el momento de reemplazo a través de un balance entre la maquinaria en uso y la maquinaria que la reemplazaría; el criterio empleado cimienta sus bases sobre la determinación de las ventajas económicas de operar una u otra. Por lo general, la comparación se realiza usando datos *a priori* estimados por quien realiza esta evaluación.

La aplicación de estos modelos es recomendable cuando se dispone de poca información y la decisión de reemplazo debe tomarse considerando costos supuestos y datos determinados por el analista, de acuerdo a su experiencia.

La limitación de estos modelos radica en que su grado de aproximación con la realidad está supeditado a la validez de los valores asumidos.

#### 4.2.1. MODELO MAPI<sup>27</sup>

Es el primer modelo que se encuentra de este tipo. Fue propuesto en el año 1946 por Terborgh, como resultado de su investigación asociada a la *Machinery and Allied Products Institute* (MAPI), de Estados Unidos.

Este modelo introduce el término “inferioridad operativa”, como un intento por cuantificar las mejoras tecnológicas entre una maquinaria existente y su sucesora. Terborgh establece la comparación entre el “defensor” (maquinaria existente) y el “desafiante” (maquinaria alternativa de reemplazo), basado en la pauta de que las mejoras tecnológicas tienden a hacer al “defensor” obsoleto.

Con este modelo, año a año debe analizarse nuevamente la viabilidad del reemplazo, pues la validez de su decisión sólo es por un periodo anual.

#### A. CRITERIO DE DECISIÓN

El modelo MAPI define el indicador  $R$ , del cual se vale para determinar si se realiza o no el reemplazo:

$$R = \frac{A + B - C}{D} * 100$$

41

Donde:

- $A$  : Ventaja operativa del uso de la maquinaria nueva
- $B$  : Costo de depreciación de la maquinaria existente que es evitado para el año siguiente disminuido en el costo de la depreciación de la maquinaria nueva en su primer año
- $C$  : Impuesto pagadero en el siguiente año, ajustado a las ventajas de costo resultante de la decisión de reemplazar inmediatamente
- $D$  : Inversión neta de capital

<sup>27</sup> Jaafari, A.; Mateffy, V.K. Realistic Model for Equipment Replacement. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116 (1990): 514-532.

Si el valor obtenido para  $R$  es superior a la tasa de retorno de inversión aceptada o esperada por el inversionista, entonces se recomienda el reemplazo de la maquinaria. De no ser este el caso, se debe conservar la maquinaria existente por un año adicional, finalizado el cual se debe repetir este análisis.

## B. LIMITACIONES

Las condiciones de análisis de este modelo limitan el horizonte de reemplazo a un periodo de un año, lo que resultaría inadecuado si se quisiera plantear políticas de reemplazo en el mediano y largo plazo.

Otra limitación es que los valores obtenidos para el indicador  $R$  tienden a ser elevados, lo que invitaría frecuentemente al reemplazo, no siendo necesariamente lo más pertinente. Cabe señalar que la metodología empleada por este modelo requiere de abundante información.

### 4.2.2. MODELO DEL COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)

La característica de este modelo es que se orienta hacia la anualización de dos términos de comportamiento antagónico; por un lado, los costos totales de operación, cuyo valor es creciente con el tiempo; y por el contrario, el valor de la inversión neta, que tiende a decrecer.<sup>28</sup>

Las consideraciones de este modelo se sustentan en la asunción de que las inversiones se repetirán indefinidamente, es decir, cada vez que se liquida un activo, se vuelve a invertir en uno similar. Así, se considera que los reemplazos se realizan de forma perpetua.<sup>29</sup>

## A. FORMULACIÓN

En principio, se define el factor de conversión anual ( $f$ ), de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

<sup>28</sup> Chile. Ministerio de Planificación y Cooperación, División de Planificación, Estudios e Inversiones. *Metodología Proyectos de Reemplazo de Equipos* [en línea]. 1a edición electrónica, 2006. <<http://bip.mideplan.cl/bip-consultas/SEBI/SE2005/metodologias/MetodologiaReemplazoEquipos.doc>> [Consulta: 28.06.08]

<sup>29</sup> Bravo, S; Cueto, D. *La vida útil de un activo y política de reemplazo de activos* [en línea]. ESAN, cuadernos de difusión. [200?], p. 137. <<http://www.esan.edu.pe/paginas/PDF/Vida.pdf>> [Consulta: 28.06.08]

$$f = \frac{1}{i} * \left[ 1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

4.2

Donde:

- $i$  : Tasa de descuento
- $n$  : Número de periodos

Conocido lo anterior, se muestra la expresión que determina el Costo Anual Equivalente de Inversión:

$$CAE_{inversión} = \left[ I_0 - \frac{VR_n}{(1+i)^n} \right] * \frac{1}{f}$$

4.3

Donde:

- $I_0$  : Inversión en la maquinaria en el año 0
- $VR_n$  : Valor residual de la maquinaria en el año n

La relación matemática para el cálculo del Costo Anual Equivalente de Operación es:

$$CAE_{operación} = \left[ \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \right] * \frac{1}{f}$$

4.4

Donde:

- $C_j$  : Costo de operación en el año j

El Costo Anual Equivalente, es la suma de los costos de inversión y de operación:

$$CAE = CAE_{inversión} + CAE_{operación}$$

4.5

Ahora, es preciso definir el Costo Marginal de Operación ( $CM$ ), que es aquel costo en que se incurriría de continuar operando la maquinaria antigua durante un periodo adicional. La expresión de cálculo del costo marginal de operación es la indicada en la ecuación 4.6.

$$CM = \frac{C_1}{1+i} + VR_0 - \frac{VR_1}{(1+i)^n}$$

4.6

Donde:

- $C_1$  : Costo de operación durante un periodo adicional
- $VR_0$  : Valor residual de la maquinaria en el momento 0
- $VR_1$  : Valor residual al final del periodo adicional

## B. CRITERIOS DE DECISIÓN

Si al comparar el CAE de la maquinaria nueva con el CM de la maquinaria antigua, este último resulta mayor, será recomendable realizar el reemplazo. En el caso opuesto, se deberá continuar operando la maquinaria antigua hasta que la relación comparativa se invierta.

En la figura 4.1 se puede apreciar que adicionalmente al criterio indicado, este modelo presenta otro aporte, que es la determinación de la vida económica útil: la conjugación de los costos anualizados, tanto de inversión como de operación, permite el descubrimiento de un punto en el tiempo para el que el Costo Anual Equivalente presenta su mínimo valor; ese punto establece la vida económica útil de la maquinaria, y señala también el momento oportuno para el reemplazo.

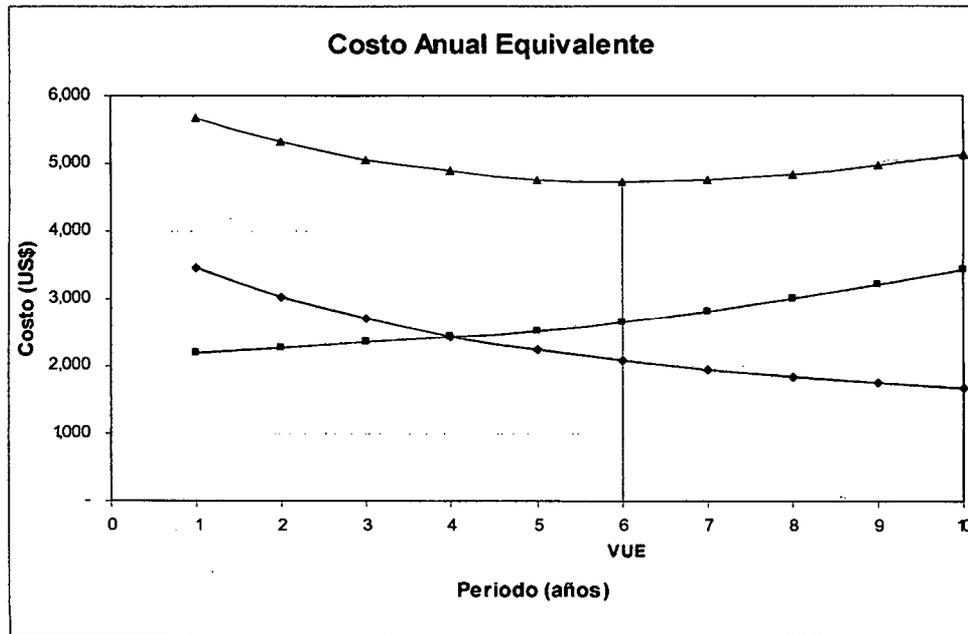


Figura 4.1 Costo Anual Equivalente

### 4.3. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

La filosofía de estos modelos se basa en la búsqueda del valor óptimo de una función predeterminada, ya sea el mínimo para una función de costos o gastos asociados con la utilización de la maquinaria; o el máximo para una función de rentabilidad o utilidad generada por la operación de la maquinaria.<sup>30</sup>

La fortaleza de estos modelos se encuentra en que el panorama que proveen al enfrentar la toma de las decisiones de reemplazo, se sustenta en la información existente de la maquinaria en uso, y lo que se busca es la optimización del servicio que ella brinda. Esto, a diferencia de los modelos de comparación antiguo - nuevo, reduce el nivel de incertidumbre asociado a estos últimos por la predicción de información futura para la maquinaria nueva.

#### 4.3.1. MODELO DE ESPINOZA<sup>31</sup>

Modelo que plantea el cruce histórico del mantenimiento excesivo y del valor decreciente de la maquinaria, fue desarrollado por Julio Espinoza Vega (Ing. Civil), y fue publicado el año 1990.

<sup>30</sup> Viveros, A.; González, G.; Rodríguez, R. Op. Cit., p. 165.

<sup>31</sup> Espinoza, J. Op. Cit.

## A. VALOR DE LA MAQUINARIA

Se conoce que una maquinaria es diseñada para trabajar durante un periodo de tiempo específico, que es su vida física útil, a lo largo de la cual paulatinamente se va depreciando, hasta el punto en el que alcanza un valor residual mínimo, prácticamente de desecho.

Entonces, el valor de la maquinaria está afectado en primer lugar por la depreciación, cuyo comportamiento en el tiempo, puede ser representado por funciones de pendiente negativa. Lo descrito se plasma en la siguiente relación:

$$RV = IV * Fd$$

4.7

Donde:

$RV$  : Valor remanente teórico

$IV$  : Valor inicial

$Fd$  : Función de depreciación

La depreciación, también está influenciada por factores exógenos, resumidos en tres categorías: obsolescencia, inadecuación e ineficiencia.

El progreso tecnológico, que apunta hacia la producción de maquinaria con mejoras y fortalezas respecto a la existente, determina la pérdida de valor por obsolescencia.

La inadecuación afecta a la maquinaria por variaciones en el entorno productivo, puesto que cuando éstas se producen generalmente se trata de incrementos en los requerimientos de producción, que determinan condiciones de operación con más rigor para la maquinaria.

La ineficiencia surge por el deterioro mismo de la maquinaria, proceso natural durante el transcurso de su vida, que se evidencia en la reducción gradual de su eficiencia inicial, cuando nueva.

El efecto conjunto de los factores descritos, se representa por la relación mostrada:

$$FPV = Fo * Fi * Fe$$

4.8

Donde:

$FPV$  : Factor de pérdida de valor

$Fo$  : Factor de obsolescencia

$Fi$  : Factor de inadecuación

$Fe$  : Factor de ineficiencia

Finalmente, el costo de reemplazo se calcula como sigue:

$$CR = (RV + SV) * FPV$$

4.9

Donde:

$CR$  : Costo del reemplazo

$RV$  : Valor remanente

$SV$  : Valor de los repuestos

$FPV$  : Factor de pérdida de valor

## B. COSTO DEL MANTENIMIENTO

Debe reconocerse en principio la ventaja de realizar un apropiado mantenimiento preventivo periódico, que de todas formas conlleva a la paralización de la maquinaria por cierto periodo de tiempo, pero que resulta preferible a que la maquinaria tenga que ser paralizada por la falla de la misma, que puede originar tiempos muertos de mucha mayor duración.

El costo del mantenimiento tiene dos componentes: directo e indirecto.

El costo directo está compuesto por la mano de obra, materiales, contratistas, equipos de apoyo, energía y demás elementos que incurran en costos para realizar el mantenimiento.

El costo indirecto se compone del valor del tiempo muerto, cuando la maquinaria es separada del proceso productivo para darle mantenimiento.

Así, ambos componentes son sumados para determinar el costo del mantenimiento:

$$CTM = CDM + CTPM$$

4.10

Donde:

- CTM* : Costo del mantenimiento
- CDM* : Costo directo del mantenimiento
- CTPM* : Costo indirecto del mantenimiento

### C. METODOLOGÍA

Se trazan las curvas del valor de la maquinaria y del costo del mantenimiento, ambas representadas en un esquema anual tiempo costo. El método recomienda como momento oportuno de reemplazo aquel que resulta de la intersección de las citadas curvas, equivalentemente, cuando el valor de la maquinaria sea igual al costo de mantenimiento.

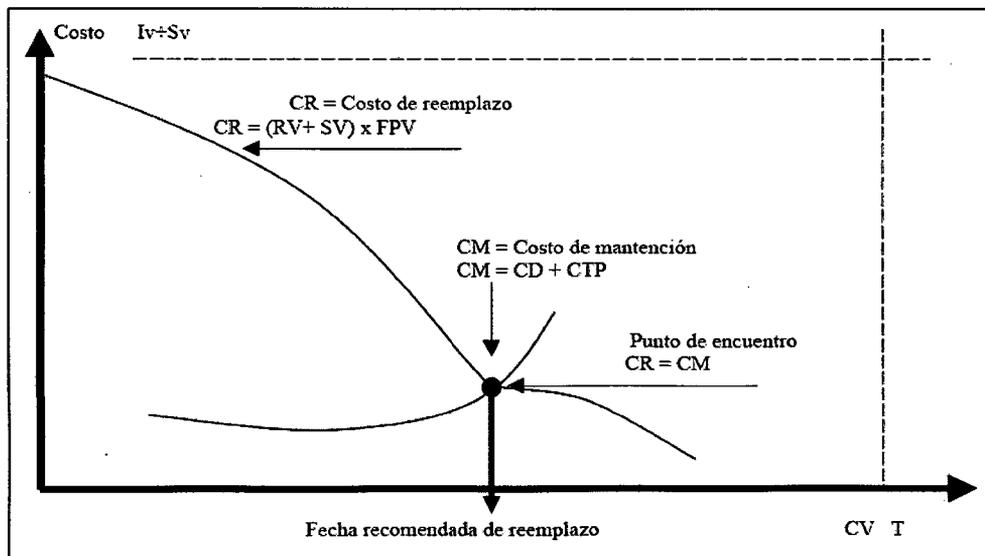


Figura 4.2 Cruce histórico: valor de maquinaria y costo de mantenimiento

#### 4.3.2. MODELO DE CANTILLO <sup>32</sup>

Modelo de los Costos Promedios Acumulados, desarrollado por Víctor Cantillo Maza (Ing. Civil), fue publicado en Colombia el año 1998.

Enfoca el problema de reemplazo hacia la determinación de un punto de equilibrio en el que los costos acumulados de la maquinaria sean mínimos o que la utilidad de la inversión sea máxima.

Las características del modelo establecen la necesidad de que el control de la maquinaria sea llevado a cabo a través del manejo de una estadística completa de la operación y los costos de la maquinaria. En este modelo, los costos a controlar se clasifican de la siguiente manera:

- COSTOS FIJOS O DE PROPIEDAD, incluyen:
  - Depreciación
  - Costo de capital, intereses
  - Seguros e impuestos
  - Costo de almacenamiento y bodegaje
  
- COSTOS VARIABLES O DE OPERACIÓN, incluyen:
  - Combustible
  - Lubricantes
  - Operador
  - Llantas
  - Mantenimiento
  
- COSTOS DE MÁQUINA PARADA Y DE OBSOLESCENCIA

La metodología consiste en registrar anualmente los costos de la maquinaria anteriormente descritos, y efectuar el reemplazo cuando el costo medio anual acumulado sea el mínimo.

Se ilustra el método a través de un ejemplo práctico. Considérese que los costos de un tractor sobre orugas son los mostrados en la siguiente tabla:

---

<sup>32</sup> Cantillo, V. Reemplazo económico de los equipos [en línea]. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, 3-4 (1998): 58-63. <[http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria\\_desarrollo/3\\_4/reemplazo\\_economico\\_de\\_los\\_equipos.pdf](http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/3_4/reemplazo_economico_de_los_equipos.pdf)> [Consulta: 14.07.08]

Año	Fijos	Variables	Máq. Parada	Total Anual	Acumulado	Medio anual
[1]	[2]	[3]	[4]	[5=2+3+4]	[6]	[7=6/1]
1	42.00	26.00	3.00	71.00	71.00	71.00
2	33.00	29.00	4.00	66.00	137.00	68.50
3	26.00	34.00	5.20	65.20	202.20	67.40
4	22.00	39.00	6.30	67.30	269.50	67.38
5	16.00	43.00	7.00	66.00	335.50	67.10
6	13.00	48.00	8.00	69.00	404.50	67.42
7	11.00	56.00	8.60	75.60	480.10	68.59
8	10.00	64.00	9.30	83.30	563.40	70.43
9	9.50	72.00	10.70	92.20	655.60	72.84
10	9.00	81.00	11.90	101.90	757.50	75.75

Tabla 4.1 Costos medios anuales (millones de pesos colombianos)

Se esquematiza el progreso de estos costos en el tiempo:

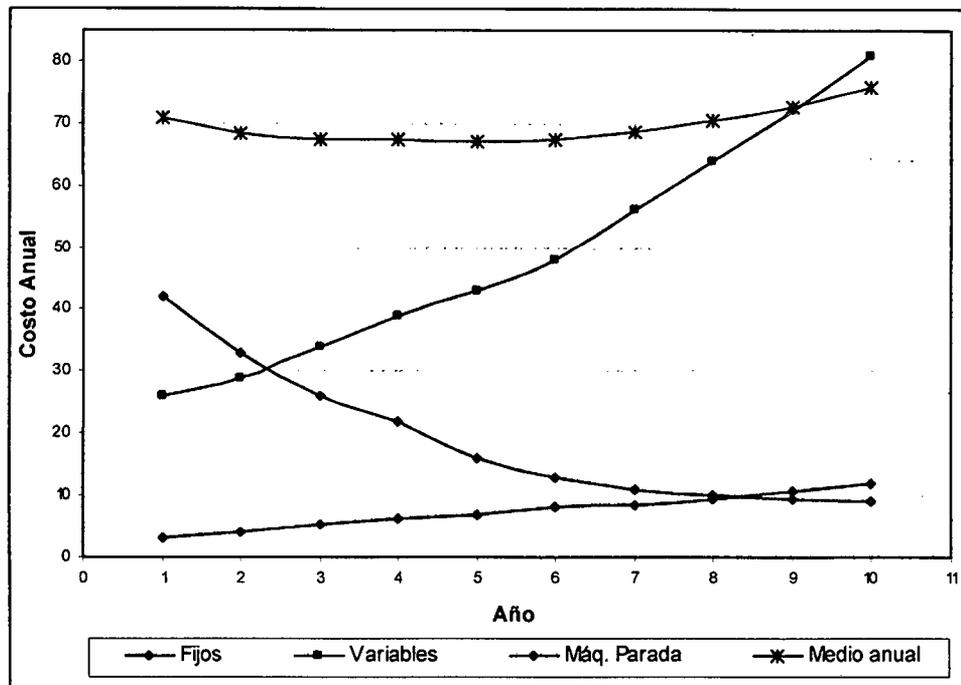


Figura 4.3 Desarrollo anual de costos medios de maquinaria

De la revisión de la figura 4.3, se concluye que el costo anual mínimo acumulado se presenta en el quinto año. De acuerdo a este método, lo anterior implica que los reemplazos deben realizarse con una periodicidad de 5 años.

La limitación de este método se encuentra en la consideración de que durante todos los años del horizonte de planificación la producción de la

maquinaria es la misma, aseveración no tan cercana a la realidad considerando la naturaleza del trabajo en construcción.

#### 4.3.3. MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Se ha referido en este capítulo, dentro del grupo de los modelos de optimización, planteamientos específicamente diseñados para las maquinarias. A diferencia de los modelos anteriores, el modelo de Programación Dinámica tiene un espectro de aplicabilidad mucho más amplio, y permite resolver una gran cantidad de problemas de diversa índole, siempre y cuando se cumplan ciertos requisitos, los que se detallan más adelante.

Naturalmente, dentro del conjunto de problemas que pueden ser resueltos usando este modelo, se encuentra el de la determinación del momento óptimo de reemplazo de una maquinaria. Cabe indicar, que la Programación Dinámica, por ser de una aplicación más universal, no deja de ser tanto o más útil que otros modelos diseñados específicamente para las maquinarias.

##### A. FUNDAMENTOS

La Programación Dinámica, utiliza como metodología para determinar la solución óptima de un problema, la descomposición del mismo en etapas, cada una de las cuales incluye un subproblema de una sola variable.

Presenta una naturaleza recursiva en los cálculos, en el sentido de que la solución óptima de un subproblema se utiliza como entrada para el siguiente subproblema, y para cuando se haya resuelto el último subproblema, se habrá conseguido la solución óptima de todo el problema.<sup>33</sup>

Este modelo se basa en la utilización de ecuaciones funcionales y en el Principio de Optimalidad de Bellman. Las ecuaciones funcionales son explicadas en el subtítulo correspondiente a la formulación del modelo, y son las siguientes:

- Las funciones que constituyen la función objetivo.
- La función de interrelación entre estados de dos etapas consecutivas.
- Condiciones de borde.

---

<sup>33</sup> Taha, H. *Investigación de Operaciones: Una introducción*. 6a edición, México: Prentice Hall, 1998, p. 409.

El Principio de Optimalidad de Bellman establece que “Una solución óptima tiene la propiedad que cualquiera sea el estado inicial y la decisión inicial, las decisiones para las etapas posteriores deben constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la primera decisión”<sup>34</sup>.

## B. FORMULACIÓN

La formulación depende del tipo de recursión que se realice, pudiendo ser **recursión hacia adelante (forward)**, es decir cuando los cálculos se realizan desde la etapa inicial hacia la etapa final del problema, y en el caso opuesto, la **recursión hacia atrás (backward)**. Es importante mencionar que ambos procedimientos conducen a la misma solución, sin embargo, la recursión hacia atrás puede ser más eficiente desde el punto de vista de los cálculos.<sup>35</sup>

$$f_k(Y_k) = \max^{(*)} \{H_k(Y_k, X_k, f_{k+1}(Y_{k+1}))\}$$

$$Y_{k+1} = Tk(Y_k, X_k)$$

$$k = n, n-1, \dots, 1$$

$$Y_1 = M$$

$$f_{n+1}(Y_{n+1}) = F$$

(\*) *Máximo o mínimo, depende de  $H_k$*

4.11

La ecuación 4.11 describe en forma general la formulación tipo backward. Se describe a continuación, cada uno de sus elementos:<sup>36</sup>

- ETAPAS ( $k$ ), subdivisiones del problema en los cuales se pueda tomar decisiones que no dependan de estados anteriores, sino sólo de su estado actual. Debe existir una etapa final, denominada  $n$ .

<sup>34</sup> Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Universidad de Chile). IN34A-2 Optimización [en línea]. 2006, p. 8. <[https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2006/2/IN34A/2/material\\_docente/objeto/115095](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2006/2/IN34A/2/material_docente/objeto/115095)> [Consulta: 18.05.09]

<sup>35</sup> Taha, H. Op. Cit., p. 413.

<sup>36</sup> Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Universidad de Chile). Op. Cit., p. 3.

- VARIABLES DE ESTADO ( $Y_k$ ), caracterizan la situación en la que se encuentra el problema en una etapa específica. Deben existir tantas variables de estado, de forma tal que permitan establecer en qué condiciones comienza o finaliza una etapa.
- VARIABLES DE DECISIÓN ( $X_k$ ), permiten cuantificar las decisiones, y cuyos valores para una política óptima se determinan luego de que se hayan solucionado todos los subproblemas.
- FUNCIÓN DE RECURSIÓN ( $f_k$ ), ecuación que indica cómo se acumula la función beneficio, desde la etapa  $k$  hasta la etapa  $n$ .
- FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN ( $Y_{k+1} = T_k(Y_k, X_k)$ ), ecuación que vincula el estado y la decisión de una etapa, con el estado de la etapa siguiente.
- FUNCIÓN OBJETIVO ( $H_k$ ), establece el criterio de comparación entre los distintos estados que se pueden presentar en una etapa.
- CONDICIONES DE BORDE ( $Y_1 = M$  y  $f_{n+1}(Y_{n+1}) = F$ ), limitaciones que son impuestas al problema, y corresponden a condiciones iniciales o finales que deben cumplirse.

### C. REQUISITOS

Para que un problema pueda ser modelado y resuelto por medio de la Programación Dinámica, debe cumplir con los siguientes requisitos:<sup>37</sup>

- Naturaleza secuencial de las decisiones, el problema puede ser dividido en etapas.
- Cada etapa tiene un número de estados asociados a ella.
- La decisión óptima de cada etapa sólo depende de su estado inicial y no de las decisiones anteriores.
- La decisión tomada en una etapa determina cuál será el estado de la etapa siguiente.

---

<sup>37</sup> Goig, M. *Programación Dinámica* [en línea]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, [2006], p. 1.  
<<http://www.andrew.cmu.edu/user/mgoic/files/documents/optimization/pdinamica.pdf>> [Consulta: 03.06.09]

## D. RESOLUCIÓN

Puesto que la naturaleza de las etapas depende del problema de optimización que se analice, la Programación Dinámica no proporciona los detalles de los cálculos que se deben realizar para optimizar cada etapa, es entonces la persona que resuelve el problema quien improvisa y diseña estos detalles.<sup>38</sup>

En forma general, para resolver un problema de Programación Dinámica debe seguirse la siguiente secuencia:

- Identificación de etapas, estados y variables de decisión, procurando que la definición de estado que se adopte sea suficiente para que en él, se puedan tomar decisiones factibles sin reexaminar decisiones anteriores.
- Elección del tipo de recursión más conveniente, de manera que los cálculos que se tengan que realizar sean más eficientes.
- Construcción de las funciones de recursión, de transformación y objetivo, incorporando todos los parámetros que sean estrictamente necesarios.
- Delimitación de las condiciones de borde y restricciones necesarias, imprescindible para que las recurrencias estén bien definidas.

### 4.4. RESUMEN

Este capítulo recopila y analiza los principales modelos existentes que ofrecen la posibilidad de optimizar el reemplazo de maquinaria, algunos con planteamientos genéricos que permiten su aplicación no sólo en este tipo de problemas (el caso de los modelos Costo Anual Equivalente y Programación Dinámica), y otros que son específicos para las maquinarias.

Los modelos han sido clasificados en dos grandes grupos: los de comparación antiguo - nuevo, y los de optimización. En el caso de los modelos de comparación antiguo - nuevo, éstos parten del balance entre la maquinaria que sería reemplazada, y la maquinaria que la reemplazaría. El criterio de decisión lo determina la ventaja económica de operar una u otra.

---

<sup>38</sup> Taha, H. Op. Cit., p. 409.

Dentro de este grupo se encuentran el modelo MAPI y el modelo Costo Anual Equivalente, este último adicionalmente introduce fundamentos para la determinación de la vida económica útil.

Los modelos de optimización, concentran su metodología en la búsqueda del valor óptimo de una función predeterminada, ya sea el mínimo para una función de costos o gastos, o el máximo para una función de rentabilidad o utilidad. El hallazgo del valor óptimo de la función diseñada, trae consigo el establecimiento del momento óptimo de reemplazo.

Este grupo está comprendido por el modelo de Espinoza, el modelo de Cantillo y el modelo de Programación Dinámica.

## Capítulo 5

### DESARROLLO DE MODELO APLICABLE A UNA EMPRESA CONSTRUCTORA

#### 5.1. INTRODUCCIÓN

Han sido revisados varios modelos de reemplazo en el capítulo 4, algunos con planteamientos muy particulares y otros con filosofías afines entre sí. Definitivamente no hay ningún par de modelos que propongan exactamente lo mismo, pero sí presentan similitudes respecto a la orientación de sus planteamientos, pues algunos se perfilan hacia el mantenimiento y otros hacia la rentabilidad.

En general, ninguno de esos modelos considera efectiva y explícitamente el impacto del Overhaul, llegando algunos de ellos sólo a mencionarlo como elemento a tomar en cuenta, pero sin especificar concretamente cómo incorporarlo en el análisis y determinar los efectos de su realización. He ahí un sesgo importante en cuanto a la riqueza del modelo, con miras a la obtención de los mejores resultados para la política de reemplazos o reparaciones mayores (Overhaul) de las maquinarias.

En el modelo desarrollado para esta Tesis, el cual será explicado en este capítulo, se incluye dentro de las alternativas de decisión el Overhaul, sea del tipo Parcial o Completo, a través de un planteamiento, cuya mayor o menor validez dependerá de la experiencia que posea la persona que desea determinar la política de decisiones, pues será esta persona la que provea de la información que necesita el modelo para incluir el impacto por la ejecución de un Overhaul.

Además, la concepción teórica que ha servido de base a este modelo, será expresada no sólo con ecuaciones, formulaciones y descripciones, sino a través de un archivo ejecutable desarrollado en un entorno muy accesible.

## 5.2. EL MODELO

En el capítulo 4, se hizo una reseña de los principales modelos, a juicio de este autor, utilizados para la evaluación del reemplazo de maquinaria. De acuerdo a lo ahí vertido, corresponde indicar que el tipo de modelo que se usará en esta Tesis, y que se describirá en este capítulo, es un **modelo de optimización**.

En detalle, han sido adoptados para este modelo los criterios de la **Programación Dinámica**, de formulación tipo *backward* (de adelante hacia atrás), ya que se ha determinado que tal metodología se ajusta de mejor forma al enfoque de esta Tesis.

La Programación Dinámica, debido a su generalidad y al amplio espectro de situaciones que pueden ser resueltas usando sus consideraciones, no define ecuaciones *ad hoc* para la optimización de reemplazos, ni para ningún otro problema en particular. Lo que sí provee son lineamientos y recomendaciones estándar para solucionar en forma óptima cualquier problema que cumpla con sus requisitos, y establece una estructura básica para la configuración del escenario de estudio.

Para superar la pluralidad de la Programación Dinámica, se ha adaptado cada uno de sus componentes al problema formulado en esta Tesis, generando un modelo específico, cuyos elementos se describen a continuación:

### 5.2.1. ETAPAS: $k$

Se ha subdividido el análisis en etapas equivalentes a meses, y considerando que el horizonte de planificación es de como máximo diez años (vale decir, que el análisis puede limitarse a horizontes de menor cantidad de años), la variable  $k$  se delimita así:

$$k \in Z \wedge k \in [1; 120]$$

5.1

La elección de un horizonte de planificación de diez años, más que deberse a un análisis riguroso y estricto, obedece a la necesidad de la empresa

de proyectar sus decisiones durante un periodo similar, y a las consideraciones de que (1) durante diez años las condiciones de las maquinarias y los proyectos de tunelería se mantengan más o menos parecidas, y (2) a que la maquinaria analizada en esta Tesis típicamente se deprecia durante periodos comprendidos en el rango indicado para  $k$ .

Vale acotar que la riqueza de la información de la que se disponga, prioritariamente de costos, es también relevante en la delimitación del horizonte de planificación, pues como se verá en el capítulo 6, necesariamente se tienen que hacer proyecciones con los datos existentes para estimar comportamientos futuros, y mientras más grande sea el tamaño de la proyección, más grande es también el riesgo de caer en error.

### 5.2.2. VARIABLES DE DECISIÓN: $X_k$

Las decisiones se determinan al inicio de cada etapa  $k$ , pudiendo entonces optar por una de las siguientes alternativas:

- Conservar la maquinaria :  $X_k = 0$
- Reemplazar la maquinaria :  $X_k = 1$
- Realizar Overhaul completo :  $X_k = 2$
- Realizar Overhaul parcial :  $X_k = 3$

### 5.2.3. VARIABLES DE ESTADO: $Y_k$

Esta variable identifica el estado de la maquinaria de acuerdo a la edad que posee al inicio de cada etapa. La edad se expresa en horas.

Dependiendo de la edad máxima que se establezca como límite para que resulte aceptable conservar la maquinaria (edad máxima de conservación), y del ancho que tendrán los rangos en que se dividirá esta edad máxima para evaluar los costos (ancho de rango), se determinará una cantidad de rangos de edades, o en forma equivalente, el universo de estados posibles.

Para establecer un ejemplo, supóngase que se presenta la siguiente configuración:

- Edad máxima de conservación : 8000 horas
- Ancho de rango : 4 horas
- Número de rangos :  $1 + 8000 / 4 = 2001$
- Universo de estados posibles :  $Y_k \in Z \wedge Y_k \in [1; 2001]$
- Edad al inicio de la etapa : 318 horas
- Estado ( $Y_k$ ) :  $Z_{\text{sup}} (0.0000001 + 318 / 4)$   
 $Z_{\text{sup}} (79.5000001) = 80$

El ancho de rango es variable, y se entiende que si el usuario escoge anchos pequeños, se requerirá de mayor tiempo en la ejecución de la rutina de solución, a cambio de una mayor precisión en el análisis.

#### 5.2.4. FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La función de transformación permite establecer la edad al inicio de la etapa  $k+1$ , dependiendo de la edad al inicio de la etapa precedente ( $k$ ) y de la decisión tomada en esa etapa ( $X_k$ ).

$$Edad_{k+1} = A_k * \Phi c_k + B_k * \Phi r_k + C_k * \Phi oc_k + D_k * \Phi op_k$$

5.2

$$A_k = -\frac{(X_k - 1) * (X_k - 2) * (X_k - 3)}{6}$$

$$B_k = \frac{X_k * (X_k - 2) * (X_k - 3)}{2}$$

$$C_k = -\frac{X_k * (X_k - 1) * (X_k - 3)}{2}$$

$$D_k = \frac{X_k * (X_k - 1) * (X_k - 2)}{6}$$

5.3

$$\Phi_{c_k} = Edad_k + Tasa\_Uso_k * \frac{disp_{Y_k}}{disp\_ex}$$

$$\Phi_{r_k} = Tasa\_Uso_k * \frac{disp_1}{disp\_ex}$$

$$\Phi_{oc_k} = Edad_k - red\_OC$$

$$\Phi_{op_k} = Edad_k - red\_OP$$

5.4

Donde:

- $\Phi$  : Funciones de transformación
- $Edad_{k+1}$  : Edad al inicio de la etapa  $k + 1$
- $disp_{Y_k}$  : Disponibilidad para el estado  $Y_k$
- $disp_1$  : Disponibilidad para la maquinaria nueva (estado 1)
- $disp\_ex$  : Disponibilidad exigida por la empresa
- $red\_OC$  : Reducción de la edad de la maquinaria debido a Overhaul Completo
- $red\_OP$  : Reducción de la edad de la maquinaria debido a Overhaul Parcial
- $Tasa\_Uso_k$  : Tasa de uso de la maquinaria en la etapa  $k$

### 5.2.5. FUNCIÓN OBJETIVO: $F_k(Y_k)$

La función objetivo cuantifica el resultado de los flujos de dinero de una etapa, dependiendo del estado de la maquinaria y de la decisión adoptada. Los flujos de dinero pueden ser positivos o negativos, siendo positivos los que representan los ingresos o ventas, y en su contraparte, los negativos representan los egresos y pérdidas de dinero.

La finalidad de esta función es establecer el criterio de comparación y elección en cada etapa, para determinar la decisión que resulta más conveniente para la empresa. Debido a que esta función incorpora resultados que se presentan en etapas diferentes entre si, los valores son convertidos al tiempo base o tiempo 0, para que las comparaciones sean coherentes.

$$F_k(Y_k) = \max \left\{ \frac{A_k * \Psi_{c_k} + B_k * \Psi_{r_k} + C_k * \Psi_{oc_k} + D_k * \Psi_{op_k} + F_{k+1}(Y_{k+1})}{(1+r)^k} \right\}$$

$$X_k \in \{0; 1; 2; 3\}$$

5.5

$$\Psi_{c_k} = Tasa\_Uso_k * Flujo\_H_{Y_k}$$

$$\Psi_{r_k} = Tasa\_Uso_k * Flujo\_H_1 + VS_{Y_k} - V0$$

$$\Psi_{oc_k} = -inv\_OC - (1+r)^k * (Venta_{Y_k} * CF/CT) * \sum_{i=0}^{dur\_OC-1} \frac{Tasa\_Uso_{k+i}}{(1+r)^{k+i}}$$

$$\Psi_{op_k} = -inv\_OP - (1+r)^k * (Venta_{Y_k} * CF/CT) * \sum_{i=0}^{dur\_OP-1} \frac{Tasa\_Uso_{k+i}}{(1+r)^{k+i}}$$

5.6

$$Flujo\_H_{Y_k} = \frac{disp_{Y_k} * (Venta_{Y_k} - COP_{Y_k}) - (disp\_ex - disp_{Y_k}) * Venta_{Y_k} * (CF/CT)}{disp\_ex}$$

5.7

Donde:

- $\Psi$  : Funciones objetivo
- $r$  : Tasa de interés mensual (determinada por el costo de oportunidad del capital y por la tasa de inflación)
- $F_{k+1}(Y_{k+1})$  : Función objetivo de la etapa  $k+1$  para el estado  $Y_{k+1}$
- $Flujo\_H_{Y_k}$  : Flujo de dinero por hora para el estado  $Y_k$
- $VS_{Y_k}$  : Valor de salvamento para el estado  $Y_k$
- $V0$  : Costo de la maquinaria nueva
- $inv\_OC$  : Inversión requerida para un Overhaul Completo
- $inv\_OP$  : Inversión requerida para un Overhaul Parcial
- $Venta_{Y_k}$  : Valor de venta de una hora de operación para el estado  $Y_k$
- $CF/CT$  : Ratio Costo Fijo / Costo Total (Análisis de PU)

- $dur_{OC}$  : Duración de ejecución de Overhaul Completo  
 $dur_{OP}$  : Duración de ejecución de Overhaul Parcial  
 $COp_{y_k}$  : Costo operacional por hora

Dado que se trata de una función que mide aquello que podría denominarse como ganancia o beneficio económico, el objetivo del análisis es maximizar este valor, por lo que en cada etapa, la decisión más favorable será aquella que origine el mayor valor de esta función.

Se dice que lo que mide esta función “podría” ser equivalente al concepto de ganancia, debido a la similitud de sus formas, pero debe decirse que no son exactamente iguales, por lo siguiente: mientras que los flujos positivos así como el flujo negativo debido al costo operacional son “reales”, dado que constituyen movimientos de caja efectivos o tangibles, no ocurre lo mismo con el flujo negativo debido al costo por No Disponibilidad, que representa más bien un movimiento de caja “virtual”, pues su finalidad es establecer la venta que se deja de percibir por la No Disponibilidad.

En secciones posteriores de este capítulo, se desarrollará con más detalle precisiones respecto a las ecuaciones, desde la 5.2 hasta la 5.7.

#### 5.2.6. CONDICIONES DE BORDE

Son las limitaciones que se imponen al análisis, para las etapas inicial y final del horizonte de planificación.

La condición de borde inicial establece que el estado  $Y_k$  de la etapa  $k = 1$  (punto de partida del horizonte de planificación), es el que corresponde a la edad de la maquinaria en ese momento. Esta edad es conocida.

En cuanto a la condición de borde final, esta consiste en que la última función objetivo, es decir, de la etapa posterior al último mes del horizonte de planificación ( $k = 1 + 12 * horizonte$ ), es igual al valor de salvamento de la maquinaria en esa circunstancia. Esta condición se plasma en la ecuación 5.8:

$$F_{k = 1 + 12 * horizonte} = VS_{Y_{k = 1 + 12 * horizonte}}$$

5.8

Donde:

$F_{k=1+12*horizonte}$  : Función objetivo de la etapa  $k = 1 + 12 * horizonte$

$VS_{Y_{k=1+12*horizonte}}$  : Valor de salvamento para el estado  $Y_{k=1+12*horizonte}$

La explicación de esta ecuación radica en que concluido el horizonte de planificación, la maquinaria no necesariamente debe venderse, sin embargo, la inclusión del valor de salvamento de la maquinaria en el estado en que se encontrase, debe hacerse porque se trata de un activo para la empresa, y si no se procediera así, resultaría erróneamente indistinto que la maquinaria en ese instante tenga una edad de 100 horas o 7,000 horas.

#### 5.2.7. RESTRICCIONES

Además de las condiciones de borde indicadas, el problema analizado está sujeto a las siguientes restricciones:

- El horizonte de planificación será indicado por un número entero de años, no mayor de diez.
- La maquinaria no puede ser reemplazada si tiene una edad menor que el parámetro edad mínima para reemplazo.
- La maquinaria debe ser obligatoriamente reemplazada si alcanza una edad mayor que el parámetro edad máxima de conservación.
- La maquinaria no será sometida a ningún tipo de Overhaul, si no posee una edad superior al parámetro edad mínima para Overhaul.
- El parámetro reducción de edad (debido a la realización de Overhaul) no puede ser mayor que el parámetro edad mínima para Overhaul.
- Los rangos de edades no podrán ser de un ancho mayor de diez horas, para una mejor precisión en el análisis.
- La disponibilidad real que se considerará para una maquinaria nueva será igual a la disponibilidad exigida por la empresa.

- El parámetro tasa de disminución de la disponibilidad debe ser menor que el cociente de dividir la disponibilidad exigida entre la vida útil de depreciación.

### 5.3. ENTORNO DE DESARROLLO

Se deduce de las ecuaciones hasta ahora indicadas, que forman parte del sustento de este modelo, la necesidad de realizar cálculos con un mediano grado de dificultad, y sobretodo la necesidad de realizar operaciones de carácter iterativo.

De las alternativas existentes donde podría implementarse este modelo, se ha escogido para su desarrollo el entorno del programa **Microsoft® Office Excel 2003 (11.8302.8221) SP3**, que en lo que sigue de esta Tesis sólo será referido como **EXCEL**. Vale decir, que toda la concepción teórica que compone el modelo desarrollado, se ve resumida y traducida finalmente en un archivo ejecutable de EXCEL.

Es conocida la potencia de EXCEL, debido a que provee de un importante soporte para cálculos de alto grado de dificultad, y aunado a esto, la incorporación de macros permite desarrollar programas enteros propios, con niveles elevados de rendimiento<sup>39</sup>. Para ello, el respaldo es el lenguaje de programación **Visual Basic for Applications (VBA)**, que comentario aparte, está presente y disponible en todos los programas que componen Microsoft® Office y entre otros, AutoCAD® y ArcGIS®.

De lado fueron dejados programas alternativos donde se podría construir el modelo, como Microsoft® Visual Basic®, Microsoft® Visual C++ (MSVC), MATLAB®, entre otros, pues el entorno de EXCEL es más accesible y familiar para cualquier usuario que desee implementar o revisar este modelo, sin necesidad de poseer amplios conocimientos de lenguajes de programación.

Se verá en este capítulo, que el algoritmo de solución de este modelo ha sido codificado en el lenguaje VBA, finalmente traducido en macros incorporadas al archivo ejecutable del modelo.

---

<sup>39</sup> Mora, W.; Espinoza, J. *Programación Visual Basic (VBA) para Excel y Análisis Numérico* [en línea]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2005, 76 p. <<http://www.cidse.itcr.ac.cr/cursos-linea/NUMERICO/Excel/VBAExcel-MNumericos.pdf>> [Consulta: 11.05.09]

Se aprecia una vista de las ventanas que muestran la interacción permanente entre EXCEL y VBA, que se hizo imperioso sostener durante el desarrollo del modelo.

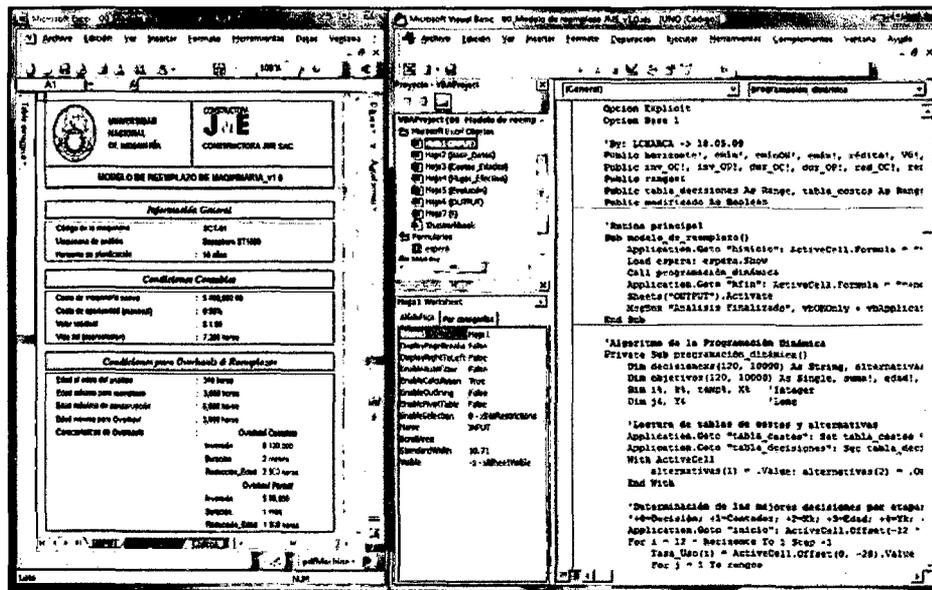


Figura 5.1 Interacción EXCEL y VBA

#### 5.4. DISPONIBILIDAD DE LA MAQUINARIA

Se señaló en el capítulo 2, que la No Disponibilidad de la maquinaria genera un costo, que podría entenderse mejor como aquella pérdida de venta o aquella venta que se deja de realizar por tener la maquinaria inoperativa.

Si bien es cierto, no se aprecia tangiblemente un flujo de dinero negativo por la No Disponibilidad (aparte del ocasionado por las reparaciones de fallas mecánicas y mantenimiento programado, ambos considerados dentro del costo operacional), podría partirse del siguiente razonamiento:

La determinación del valor de venta por hora de operación de la maquinaria, parte primero por la determinación del costo a través de un Análisis de Precios Unitarios, donde se incluye el valor de adquisición de la maquinaria<sup>40</sup> prorrateado entre la vida útil de depreciación, que constituye el costo fijo, más los costos variables por hora, que son aquellos generados por la operación.

<sup>40</sup> En el capítulo 2, se señaló que el valor de adquisición que se considera en la Tesis, es el de la maquinaria puesta en obra, que incluye entre otras cosas, gastos de embarque y desembarque, tasas arancelarias, impuestos, seguros y otros gastos conexos.

La suma del costo fijo y del costo variable, da como resultado el costo total, el cual afectado por utilidades, contingencias, impuestos y reajustes periódicos por la inflación, constituye finalmente el valor de venta. Entonces, por proporcionalidad, la parte de esa venta generada sin que la maquinaria entre en operación, es decir, la "parte fija" de la venta es  $Venta * (CF/CT)$ .

Recuérdese que la venta que se está analizando es por hora. Se alcanza la totalidad de dicha venta si durante toda la hora, la maquinaria trabaja efectivamente, es decir, si se consigue la disponibilidad exigida.

Al no ser esto así y sólo lograr una disponibilidad real  $disp$ , entonces, usando nuevamente la proporcionalidad, la venta real que se obtiene es:

$$Venta * (CF/CT) * disp / disp\_ex$$

Lo que se deja de ganar entonces es:

$$Venta * (CF/CT) - Venta * (CF/CT) * disp / disp\_ex$$

De acuerdo a la nomenclatura utilizada en la ecuación 5.7, se generaliza: para una etapa  $k$  con estado  $Y_k$ , determinándose que el componente por No Disponibilidad del flujo de dinero por hora es:

$$Flujo\_H\_ND_{Y_k} = - \frac{(disp\_ex - disp_{Y_k}) * Venta_{Y_k} * (CF/CT)}{disp\_ex}$$

59

La estimación de la disponibilidad real para cada estado  $Y_k$ , se realiza a través del parámetro denominado **tasa de disminución de disponibilidad**, que mide cada que tiempo (horas), la disponibilidad disminuye en 1%.

### 5.5. COSTOS OPERACIONALES

Cuando se desarrolló la teoría referente a la naturaleza de los costos, capítulo 2, se indicó que el costo operacional se compone de:

- Combustible
- Lubricantes
- Grasas
- Filtros
- Neumáticos
- Repuestos

De acuerdo a esta estructura, se ha incluido una hoja en el ejecutable del modelo, denominada **Base\_Datos**, donde el modelo es alimentado de información que contendrá los siguientes campos columna: código de la maquinaria, ítem (componente del costo operacional), moneda y aquellos periodos (meses) en los que se dispone de esta información.

RESUMEN		ene 07	feb 07	mar 07	abr 07	may 07	jun 07	jul 07	ago 07	sep 07	oct 07	nov 07	dic 07	ene
EST	Costo del Dólar Americano (\$/.)	3.193	3.190	3.186	3.178	3.168	3.170	3.161	3.158	3.136	3.020	3.001	2.981	2
	Horómetro_inicio	31.70	233.50	576.00	777.20	1,090.70	1,361.20	1,664.00	1,962.90	2,266.90	2,620.50	2,911.10	3,153.90	3,36
	Horómetro_fin	233.50	576.00	777.20	1,090.70	1,361.20	1,664.00	1,962.90	2,266.90	2,620.50	2,911.10	3,153.90	3,360.40	3,58
	Horas de Operación	201.80	342.50	201.20	313.50	291.10	262.20	298.90	324.00	333.00	290.60	242.80	206.50	22
	Costo Horario (US\$ / H)	24.76	16.05	26.55	21.33	18.88	29.59	28.45	27.93	62.91	33.43	60.33	41.42	2
	Combustibles	22.00	12.38	14.61	13.39	16.15	21.30	21.64	17.55	15.79	15.57	20.04	15.18	2
	Lubricantes	0.45	0.59	6.10	2.90	0.78	1.04	0.45	2.12	1.01	0.27	3.72	1.32	
	Grasas	0.52	0.28	0.31	0.13	0.29	0.26	0.23	0.28	0.27	0.30	0.21	-	
	Filtros	0.86	2.81	5.53	4.90	0.99	-	3.84	3.48	3.45	-	5.00	4.13	
	Neumáticos	-	-	-	-	0.04	1.44	-	-	-	36.17	14.47	20.17	-
Repuestos	0.94	-	-	-	0.72	5.55	2.29	4.50	6.23	2.63	31.19	20.78		

BASE DE DATOS		ene 07	feb 07	mar 07	abr 07	may 07	jun 07	jul 07	ago 07	sep 07	oct 07	nov 07	dic 07	ene	
JU-01	Horómetro_inicio	-	67.60	126.30	251.70	251.70	270.20	359.10	438.60	536.00	660.60	773.90	874.00	96	
JU-01	Horómetro_fin	67.60	126.30	251.70	251.70	270.20	359.10	438.60	536.00	660.60	773.90	874.00	960.00	1,11	
JU-01	Combustibles	\$/.	1,316.58	694.76	351.55	193.25	444.63	253.89	1,128.27	755.90	929.13	328.68	300.35	572.61	28
JU-01	Lubricantes	\$/.	433.04	320.06	237.36	359.55	153.98	1,244.46	2,175.63	2,723.32	913.20	1,043.50	843.17	1,676.29	2,16
JU-01	Grasas	\$/.	1,620.12	108.57	37.57	-	-	737.74	47.28	17.34	1,204.78	-	54.90	2,492.03	5
JU-01	Filtros	\$/.	34.06	-	309.45	-	94.14	-	942.45	1,258.43	202.48	-	659.24	159.69	7
JU-01	Neumáticos	\$/.	-	-	-	1,272.73	-	-	4,823.82	-	-	-	-	-	
JU-01	Repuestos	\$/.	35.36	28.01	-	5,502.52	7,841.66	481.73	22,430.91	23,743.77	13,690.85	41,422.03	22,504.04	56,773.70	5,93
JU-02	Horómetro_inicio	-	61.58	123.00	307.10	307.10	332.60	419.00	508.50	616.00	718.70	827.60	931.00	1,02	
JU-02	Horómetro_fin	61.58	123.00	307.10	307.10	332.60	419.00	508.50	616.00	718.70	827.60	931.00	1,025.00	1,12	
JU-02	Combustibles	\$/.	503.89	782.80	463.16	345.15	642.19	1,588.26	678.38	1,047.05	1,050.88	1,272.42	1,230.26	519.62	1,90
JU-02	Lubricantes	\$/.	346.35	13.54	1,002.79	683.04	965.15	1,153.11	787.93	1,670.20	681.13	507.81	1,289.88	1,555.29	61
JU-02	Grasas	\$/.	415.20	103.31	219.14	1,318.24	122.48	122.93	1,274.94	141.84	151.30	184.68	6,929.71	429.78	6
JU-02	Filtros	\$/.	-	-	-	127.41	96.49	-	690.06	202.11	290.02	-	2,026.62	84.03	1,33
JU-02	Neumáticos	\$/.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
JU-02	Repuestos	\$/.	-	143.32	-	14,654.67	9,789.48	2,099.28	27,716.13	26,633.66	18,728.54	40,452.36	36,227.82	75,685.35	4,05
JU-03	Horómetro_inicio	-	-	-	158.20	158.20	176.80	264.20	338.00	462.00	568.10	679.80	811.00	92	

Figura 5.2 Vista de la hoja Base\_Datos

Suponiendo que esta base de datos contendrá información de no sólo una sino varias maquinarias, entonces, para cada maquinaria se dispondrá de un grupo de campos fila, como sigue: lectura inicial del horómetro, lectura final del horómetro, costos<sup>41</sup> por combustibles, por lubricantes, por grasas, por filtros, por neumáticos, y por repuestos.

Hacia la parte superior de la base de datos se incluye un resumen del costo operacional horario, de la maquinaria que se desee analizar. La determinación del costo operacional para cada estado  $Y_k$ , se realiza a través de una interpolación a partir de este resumen.

Ahora, supóngase que en cierto periodo de la operación se presentase una situación descrita por los valores indicados:

- Tasa de uso (mensual) : 324 horas
- Disponibilidad exigida : 90%
- Disponibilidad real : 85%
- Costo operacional : 60 US\$/hora

En el caso que se alcanzase una disponibilidad real igual que la disponibilidad exigida, se lograría que la maquinaria trabaje efectivamente 324 horas. Como en el ejemplo esto no es así, entonces el tiempo efectivo que la maquinaria trabajaría es  $324 * 85\% / 90\% = 306 \text{ horas}$ .

El costo operacional en que se incurriría durante todo este periodo es  $306 \text{ horas} * 60 \text{ US\$} / \text{ hora} = \text{US\$} 18,360$ .

Si lo que ahora se desea es calcular el componente operacional del flujo de dinero por hora, éste es  $-\text{US\$} 18,360 / 324 \text{ horas} = -56.67 \text{ US\$} / \text{ hora}$ .

El razonamiento anterior, expresado algebraicamente determina la relación mostrada:

$$\text{Flujo}_{H\_Op} = \frac{((\text{Tasa\_Uso} * \text{disp} / \text{disp\_ex}) * (-COp))}{\text{Tasa\_Uso}}$$

$$\text{Flujo}_{H\_Op} = -\frac{\text{disp} * COp}{\text{disp\_ex}}$$

<sup>41</sup> Los costos operacionales considerados para el modelo, así como el valor de venta por operación, valor de adquisición y venta de la maquinaria, valor residual y costo de inversión por Overhaul, deben estar ya afectados por los impuestos aplicables.

Utilizando la nomenclatura referida en la ecuación 5.7, se establece que para una etapa  $k$  con estado  $Y_k$ , el componente operacional del flujo de dinero por hora es:

$$Flujo\_H\_Op_{Y_k} = -\frac{disp_{Y_k} * COP_{Y_k}}{disp\_ex}$$

5.10

Se deduce, a partir de lo argumentado para el arribo a las ecuaciones 5.9 y 5.10, que el componente venta del flujo de dinero por hora es:

$$Flujo\_H\_V_{Y_k} = \frac{disp_{Y_k} * Venta_{Y_k}}{disp\_ex}$$

5.11

Las ecuaciones 5.9, 5.10 y 5.11 determinan los tres componentes del flujo de dinero por hora. Partiendo de ello, la ecuación 5.7 se explica así:

$$Flujo\_H_{Y_k} = Flujo\_H\_ND_k + Flujo\_H\_Op_k + Flujo\_H\_V_k$$

$$Flujo\_H_{Y_k} = -\frac{(disp\_ex - disp_k) * Venta_k * (CF/CT)}{disp\_ex} - \frac{disp_k * COP_k}{disp\_ex} + \frac{disp_k * Venta_k}{disp\_ex}$$

$$Flujo\_H_{Y_k} = \frac{disp_k * (Venta_k - COP_k) - (disp\_ex - disp_k) * Venta_k * (CF/CT)}{disp\_ex}$$

## 5.6. DEPRECIACIÓN

Haciendo referencia nuevamente al capítulo 2, donde se presentaron cuatro métodos para realizar la depreciación de un activo, el método que se ha escogido es el de la depreciación uniforme.

La revisión del citado capítulo hace que antes de continuar, sea necesario recalcar los siguientes conceptos ahí establecidos:

“Valor residual”, es aquella parte del valor de la maquinaria que se espera recuperar por su venta al final de su vida útil”.

“Valor de salvamento”, es el valor que se obtiene por la venta de un equipo en cualquier momento de su vida útil”.

Sólo para fines de depreciación, se ha incorporado el parámetro **vida útil** (medido en horas), a partir del que se puede establecer la depreciación de la maquinaria en cualquier estado  $Y_k$  en el que se encuentre:

$$\% \text{ depreciación} = \frac{\text{edad}}{\text{vida\_útil}} * 100\%$$

5.12

Se puede inducir al modelo a considerar una depreciación normal o acelerada, dependiendo del valor que se decida asignar a la vida útil.

Partiendo de la ecuación 5.12, se puede establecer el valor de salvamento de la forma señalada a continuación:

$$VS_{Y_k} = VO - \% \text{ depreciación} * (VO - VR)$$

5.13

Donde  $VR$  representa el valor residual.

Las ecuaciones, desde la 5.9 hasta la 5.13, son incorporadas al ejecutable del modelo, a través de una nueva hoja, denominada `Costos_Edades`, que a diferencia de la hoja `Base_Datos`, no es de ingreso de datos, sino es de procesamiento intermedio, donde la totalidad de las celdas se calculan automáticamente.

Los campos columna que componen esta hoja son: rango de edad (estado), edad de inicio del rango (punto cerrado del intervalo), edad de fin del rango (punto abierto del intervalo), costo operacional (US\$/hora), disponibilidad

(%), costo de No Disponibilidad (US\$/hora), depreciación (%), valor de salvamento (US\$), venta (US\$/hora) y flujo de dinero por hora (US\$/hora).

El universo de estados posibles que puede presentar la maquinaria está representado en la totalidad de las filas que constituyen la hoja comentada, vale decir, que cada fila corresponde a un estado y almacena las características principales que lo definen.

CONSTRUCTORA <b>JME</b>		COSTOS DE MAQUINARIA POR EDADES								
Código de la maquinaria : SCT-01										
Maquinaria de análisis : Scooptram ST1030										
Rango	Edad inicio (horas)	Edad fin (horas)	Costo operacional (US\$/Hr)	Disponibilidad (%)	Costo de No Disponibilidad (US\$/Hr)	Depreciación (%)	Valor de salvamento (US\$)	Venta (US\$/Hr)	Factor de Flujo (US\$/Hr)	
01	[ 0	4 >	0.37	87.99%	49.95	0.03%	399,898.89	77.68	77.29	
02	[ 4	8 >	1.12	87.98%	49.95	0.08%	399,666.67	77.68	76.52	
03	[ 8	12 >	1.87	87.86%	49.95	0.14%	399,444.45	77.68	75.75	
04	[12	16 >	2.61	87.94%	49.95	0.19%	399,222.22	77.68	74.98	
05	[16	20 >	3.36	87.93%	49.95	0.25%	399,000.00	77.68	74.21	
06	[20	24 >	4.11	87.91%	49.95	0.31%	398,777.78	77.68	73.44	
07	[24	28 >	4.85	87.90%	49.95	0.36%	398,555.56	77.68	72.68	
08	[28	32 >	5.60	87.88%	49.95	0.42%	398,333.34	77.68	71.91	
09	[32	36 >	6.35	87.86%	49.95	0.47%	398,111.12	77.68	71.14	
10	[36	40 >	7.10	87.85%	49.95	0.53%	397,888.89	77.68	70.37	
11	[40	44 >	7.84	87.83%	49.95	0.58%	397,666.67	77.68	69.61	
12	[44	48 >	8.59	87.82%	49.95	0.64%	397,444.45	77.68	68.84	
13	[48	52 >	9.34	87.80%	49.95	0.69%	397,222.23	77.68	68.07	
14	[52	56 >	10.09	87.78%	49.95	0.75%	397,000.01	77.68	67.31	
15	[56	60 >	10.83	87.77%	49.95	0.81%	396,777.79	77.68	66.54	
16	[60	64 >	11.58	87.75%	49.95	0.86%	396,555.56	77.68	65.77	
17	[64	68 >	12.32	87.74%	49.95	0.92%	396,333.34	77.68	65.01	
18	[68	72 >	13.07	87.72%	49.95	0.97%	396,111.12	77.68	64.24	
19	[72	76 >	13.82	87.70%	49.95	1.03%	395,888.90	77.68	63.48	
20	[76	80 >	14.56	87.69%	49.95	1.08%	395,666.68	77.68	62.71	
21	[80	84 >	15.31	87.67%	49.95	1.14%	395,444.46	77.68	61.95	
22	[84	88 >	16.06	87.66%	49.95	1.19%	395,222.23	77.68	61.18	
23	[88	92 >	16.80	87.64%	49.95	1.25%	395,000.01	77.68	60.42	
24	[92	96 >	17.55	87.62%	49.95	1.31%	394,777.79	77.68	59.65	
25	[96	100 >	18.30	87.61%	49.95	1.36%	394,555.57	77.68	58.89	
26	[100	104 >	19.04	87.60%	49.95	1.42%	394,333.36	77.68	58.12	

Figura 5.3 Vista de la hoja Costos Edades

### 5.7. OVERHAUL

La realización de un Overhaul implica lo siguiente:

- Se realiza una inversión, por la mano de obra y repuestos necesarios para ejecutar la reparación mayor (Overhaul).
- Se deja de obtener una venta, por la No Operación de la maquinaria durante el tiempo que dure el Overhaul.

- La maquinaria se revalúa, aumenta su valor de salvamento debido al mejoramiento de su aptitud para la operación.
- Se reducen los costos operacionales y aumenta la disponibilidad (implica la reducción del costo por No Disponibilidad).

De las características mencionadas, las dos últimas corresponden comparativamente a una maquinaria de menor tiempo de operación (edad), por lo que se podría idealizar que, **un Overhaul es equivalente a una reducción en la edad de la maquinaria**. Durante el desarrollo de esta Tesis, no ha sido posible conseguir información histórica apropiada, que permita diseñar una función que relacione las variables de un Overhaul con la reducción de la edad, pero se puede decir que esta reducción debiera ser:

- Directamente proporcional a la inversión, es decir, mientras más se invierta en el Overhaul entonces más se reduce la edad de la maquinaria, y consecuentemente, es mayor la revaluación de la misma. Esto no siempre puede entenderse así, pero es un punto de referencia.
- No se puede decir lo mismo del tiempo que la maquinaria pase en el taller, puesto que la tarea de reemplazar cierto componente o cierto paquete de componentes, podría ser más complicada que reemplazar otro(s), lo que implica mayor tiempo, pudiendo ser ambos casos igual de beneficiosos en términos de mejoras operacionales. En otro caso, reemplazar cierto componente prioritario para la maquinaria puede tomar un mes, y produce una mejora importantísima; otro componente puede necesitar dos meses para ser reemplazado, no siendo sin embargo tan beneficioso.
- Las dos situaciones descritas podrían compararse y decirse que estrictamente, ninguna garantiza la proporcionalidad, pero, en términos prácticos podría decirse que, si una maquinaria pasa dos meses en un taller, no necesariamente significa que se ha producido una mejora más sustancial que aquella que pasa sólo un mes; en cambio, si en un Overhaul se ha invertido US\$ 100,000, seguramente se ha hecho mejoras más relevantes que en otro Overhaul en el que sólo se hubiera invertido US\$ 50,000.

Ante la mencionada ausencia de información que permitiera modelar una función de la reducción de edad por Overhaul, se ha optado por analizar el impacto de un Overhaul de acuerdo a información que el usuario del ejecutable del modelo debe incorporar, de acuerdo básicamente a su experiencia. Esta información consta de: inversión (US\$), duración (meses) y reducción de la edad (horas).

<b>MODELO DE REEMPLAZO DE MAQUINARIA_v1.0</b>																	
<b>Información General</b>																	
Código de la maquinaria	: SCT-01																
Maquinaria de análisis	: Scooptram ST1030																
Horizonte de planificación	: 10 años																
<b>Condiciones Contables</b>																	
Costo de maquinaria nueva	: \$ 400,000.00																
Costo de oportunidad (mensual)	: 0.95%																
Valor residual	: \$ 1.00																
Vida útil (depreciación)	: 7,200 horas																
<b>Condiciones para Overhauls &amp; Reemplazos</b>																	
Edad al inicio del análisis	: 310 horas																
Edad mínima para reemplazo	: 3,000 horas																
Edad máxima de conservación	: 8,000 horas																
Edad mínima para Overhaul	: 3,000 horas																
Características de Overhauls	: <table border="0" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>Overhaul Completo</b></td> </tr> <tr> <td>Inversión</td> <td>\$ 120,000</td> </tr> <tr> <td>Duración</td> <td>2 meses</td> </tr> <tr> <td>Reducción_Edad</td> <td>2,500 horas</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>Overhaul Parcial</b></td> </tr> <tr> <td>Inversión</td> <td>\$ 80,000</td> </tr> <tr> <td>Duración</td> <td>1 mes</td> </tr> <tr> <td>Reducción_Edad</td> <td>1,800 horas</td> </tr> </table>		<b>Overhaul Completo</b>	Inversión	\$ 120,000	Duración	2 meses	Reducción_Edad	2,500 horas		<b>Overhaul Parcial</b>	Inversión	\$ 80,000	Duración	1 mes	Reducción_Edad	1,800 horas
	<b>Overhaul Completo</b>																
Inversión	\$ 120,000																
Duración	2 meses																
Reducción_Edad	2,500 horas																
	<b>Overhaul Parcial</b>																
Inversión	\$ 80,000																
Duración	1 mes																
Reducción_Edad	1,800 horas																
<b>Parámetros del Análisis</b>																	

Figura 5.4 Data sobre Overhaul en la hoja INPUT

Nótese que al indicar esta reducción en la edad por la ejecución del Overhaul, tácitamente se está señalando el incremento en el valor de la maquinaria, y se puede calcular comparando sus valores de salvamento, correspondientes a los estados en que se encuentre la maquinaria, antes y después de la realización del Overhaul.

En la figura 5.4, se aprecia parte de una nueva hoja incorporada al ejecutable del modelo, hoja denominada **INPUT**, sobre la que se darán más precisiones en lo que sigue de este mismo capítulo. En la vista, los datos han sido diferenciados para Overhaul Completo y Overhaul Parcial.

De acuerdo a esta información, se entiende con claridad la ecuación 5.4, en cuanto a los componentes por Overhaul de la función de transformación ( $\Phi_{oc_k}$  y  $\Phi_{op_k}$ ).

## 5.8. ARCHIVO EJECUTABLE DEL MODELO

Anteriormente en este capítulo se ha mencionado la existencia de algunas hojas que conforman el archivo ejecutable del modelo, desarrollado en EXCEL. A continuación, se hará un recuento de todas las hojas que componen este ejecutable.

### 5.8.1. HOJA INPUT

Esta es una hoja de ingreso de datos. Aquí los datos se han clasificado en los siguientes grupos:

- Información General, se indica el código de la maquinaria; el nombre de la maquinaria y se establece el horizonte de planificación. Ver figura 5.4.
- Condiciones Contables, aquí se especifica valor de adquisición de la maquinaria ( $V_0$ ); la tasa de interés mensual definida por la empresa ( $r$ ); el valor residual ( $VR$ ) y la vida útil (para fines de depreciación). Ver figura 5.4.

- Condiciones para Overhaul & Reemplazo, se ingresa la edad al inicio de la maquinaria al inicio del análisis; la edad mínima para reemplazo; la edad máxima de conservación; la edad mínima para Overhaul; y las características que definen los tipos de Overhaul, de acuerdo a lo indicado en el subtítulo 5.7. Ver figura 5.4.
- Parámetros del análisis, donde se establece el ancho de rangos de edades (define el universo de estados posibles,  $Y_k$ ); el número de rangos, que es automáticamente calculado por el modelo; el ratio Costo Fijo / Costo Total ( $CF/CT$ ); el precio de venta por la operación de la maquinaria (US\$/hora); la disponibilidad exigida por la empresa; la tasa de disminución de la disponibilidad; la variabilidad de la tasa de uso mensual, que no es otra cosa que la indicación de la frecuencia con que se altera la tasa de uso; y finalmente la distribución de la tasa de uso mensual, para todos los años del horizonte de planificación.

<i>Parámetros del Análisis</i>			
Ancho de rango de edades	:	4 horas	
Número de rangos de edades	:	2,001	
Costo Fijo / Costo Total	:	64.31%	
Precio de venta por la operación	:	\$ 77.68 / hora	
Disponibilidad exigida	:	88.00%	
Tasa de disminución de disponibilidad	:	1% cada 250 horas	
Variabilidad de Tasa de Uso	:	Cuatrimestral	
Distribución de Tasa de Uso	:		
		C1	C2 C3
	Año 01	120	135 150
	Año 02	121	136 151
	Año 03	122	137 152
	Año 04	123	138 153
	Año 05	124	139 154
	Año 06	125	140 155
	Año 07	126	141 156
	Año 08	127	142 157
	Año 09	128	143 158
	Año 10	129	144 159

Figura 5.5 Parámetros de Análisis en la hoja INPUT

### 5.8.2. HOJA BASE\_DATOS

Esta es una hoja de ingreso de datos. La data que se ingresará a esta hoja es aquella que permitirá determinar los costos operacionales por hora, de acuerdo a lo indicado en el subtítulo 5.5.

### 5.8.3. HOJA COSTOS\_EDADES

Esta es una hoja de procesamiento intermedio. El modelo usará esta hoja para calcular todas aquellas características que permitan definir plenamente cada uno de los estados posibles  $Y_k$  que puede presentar la maquinaria, sobre la base de lo indicado en el subtítulo 5.6.

### 5.8.4. HOJA FLUJOS\_EFECTIVO

Esta es una hoja de procesamiento intermedio y análisis de resultados. El ordenamiento de esta hoja es de tal forma, que cada fila representa una etapa  $k$  del horizonte de planificación. Los campos columna son agrupados para dos tipos de escenario, que están en paralelo para permitir comparaciones. Cada escenario contiene los siguientes campos columna: decisión,  $X_k$ , edad,  $Y_k$ ,  $F_k$ ,  $T0$  (el valor de  $F_k$  llevado al tiempo base o tiempo 0) y  $T0\_Acum$ , que es donde se acumula etapa por etapa los valores de  $T0$ .

Los escenarios considerados son: escenario óptimo, que es el que determina y recomienda el modelo en función del análisis que realiza con la información ingresada; y el escenario propio, que es donde el usuario que analiza la política de reemplazos, puede configurar una política propia, y contrastar el impacto de establecer una política propia respecto a la política recomendada en el escenario óptimo.

La inclusión del escenario propio se realiza para otorgar cierta flexibilidad a las decisiones, y no ceñirse estrictamente a lo que el modelo determina, que si bien es cierto es la política óptima, aquella que determina el mejor resultado al final del horizonte de planificación, pues también es cierto que opera dentro de un marco enteramente teórico.

Mes		Tasa de Uso	Escenario Propio							Escenario Neutral				
[N]			Decisión	Nk	Edad	NR	Fk(Nk, Yk)	T0	T0 Acum	Decisión	Nk	Edad	NR	Fk(Nk, Yk)
56	151		C	0	1,018	235	6,116	3,231	(28,188)	C	0	2,711	635	4,1
57	128		C	0	1,168	232	6,718	2,884	(26,105)	C	0	2,814	723	1,1
58	128		C	0	1,289	323	6,468	2,560	(23,545)	OP	3	3,025	757	(96,32)
59	128		C	0	1,410	353	5,858	2,286	(21,250)	C	0	1,225	307	6,7
100	128		C	0	1,529	383	5,285	2,052	(19,197)	C	0	1,346	337	6,1
101	143		C	0	1,643	413	5,831	2,266	(16,331)	C	0	1,466	367	6,2
102	143		OC	2	1,761	446	(134,218)	(3,143)	(65,074)	C	0	1,600	400	5,8
103	143		C	0						C	0	1,732	434	5,8
104	143		C	0	0	1	11,053	4,193	(63,942)	C	0	1,864	467	5,8
105	158		C	0	143	36	8,303	3,075	(60,866)	C	0	1,955	493	6,4
106	158		C	0	300	75	8,366	3,283	(37,577)	C	0	2,139	535	6,1
107	158		C	0	456	114	3,078	3,300	(34,277)	C	0	2,281	571	3,8
108	158		C	0	611	153	8,031	2,891	(31,386)	C	0	2,423	606	1,6
109	129		C	0	764	192	6,368	2,271	(48,115)	C	0	2,564	641	2,0
110	129		C	0	889	223	6,604	2,333	(46,782)	C	0	2,678	670	3,2
111	129		C	0	1,012	254	6,717	2,390	(44,432)	C	0	2,791	698	3,6
112	129		C	0	1,136	284	6,780	2,343	(42,088)	C	0	2,904	726	1,4
113	144		C	0	1,258	315	7,461	2,562	(38,526)	OP	3	3,016	754	(87,18)
114	144		C	0	1,384	343	6,678	2,272	(37,254)	C	0	1,216	304	7,5
115	144		C	0	1,529	383	5,346	2,003	(35,251)	C	0	1,352	338	6,6
116	144		C	0	1,669	416	5,330	1,879	(33,272)	C	0	1,487	372	6,1
117	159		C	0	1,786	449	6,530	2,158	(31,113)	C	0	1,621	406	6,5
118	159		C	0	1,942	486	6,466	2,118	(28,989)	C	0	1,768	443	6,5
119	159		C	0	2,087	522	6,337	2,075	(26,919)	C	0	1,915	478	6,4
120	159		C	0	2,231	558	4,705	1,912	(25,407)	C	0	2,060	515	6,4
CERRE	N/A		N/A	N/A	2,373	534	268,143	85,366	53,358	N/A	N/A	2,204	551	277,5

Figura 5.6 Hoja Flujos\_Efectivo

Se logra visualizar en la figura, que hay una etapa del escenario propio que aparece resaltada, en señal de que se presenta un inconveniente con la decisión tomada, debido a que no se está cumpliendo con alguno de los parámetros restrictivos indicados en la hoja INPUT.

En la figura, en la etapa  $k = 102$  se decide realizar un Overhaul Parcial, y la edad que presenta la maquinaria en esa etapa es menor que la edad mínima para permitir un Overhaul, límite indicado en la pestaña INPUT.

### 5.8.5. HOJA EVOLUCIÓN

Esta es una hoja de exposición de resultados. Si bien es cierto, la hoja Flujos\_Efectivo, con la incorporación del escenario propio, permite analizar el efecto en el resultado final, de optar por decisiones alternas a las recomendadas por el modelo, pues en la hoja Evolución, se hace una exposición gráfica que contrasta ambos escenarios.

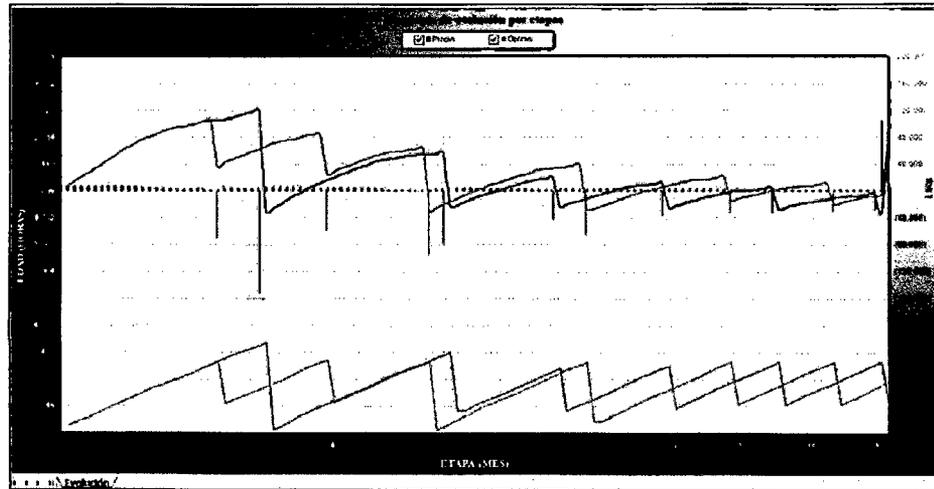


Figura 5.7 Hoja Evolución

El eje X representa las etapas (meses) que comprenden el horizonte de planificación.

El eje Y primario, almacena la información de la edad de la maquinaria (horas).

El eje Y secundario, contiene los resultados de las decisiones adoptadas (US\$).

La parte inferior del gráfico ilustra la evolución por etapas de la edad de la maquinaria.

La parte superior del gráfico refleja los resultados de las decisiones consideradas para cada etapa (en barras), además del resultado acumulado de las decisiones (en líneas continuas). Vale la comparación de esta parte del gráfico con una curva "S".

Una de las intenciones de este gráfico, es permitir el contraste visual entre los escenarios propio y óptimo, sin embargo, se puede analizar cada escenario independientemente del otro, activando o desactivando las casillas de verificación alojadas hacia la parte superior del gráfico de Evolución, debajo del título.

#### 5.8.6. HOJA OUTPUT

Esta es una hoja de exposición de resultados. Aquí se resume las decisiones consideradas en el escenario propio y en el escenario óptimo, además de los resultados a los que se arriba en cada uno.

<b>CONSTRUCTORA</b> <b>JME</b>	<b>MODELO DE REEMPLAZO DE MAQUINARIA_v1.0</b>	
Se muestra el resumen de las Políticas de Reemplazo:		
<b>Escenario Propio</b>		
<b>RESULTADO</b>	: \$ 69,958	
<b>REEMPLAZO</b>	: Reemplazar la maquinaria al inicio de los periodos: 30 y 89.	
<b>OVERHAUL</b>	: Realizar Overhaul_Completo al inicio de las etapas: 57 y 102; y Overhaul_Parcial al inicio de las etapas: 73.	
<b>Escenario Neutral</b>		
<b>RESULTADO</b>	: \$ 83,699	
<b>REEMPLAZO</b>	: Reemplazar la maquinaria al inicio de los periodos: 54.	
<b>OVERHAUL</b>	: Realizar Overhaul_Completo al inicio de las etapas: 77; y Overhaul_Parcial al inicio de las etapas: 23, 39, 98 y 113.	
<b>OUTPUT</b>		

Figura 5.8 Hoja OUTPUT

En cuanto a la ejecución de la macro que realiza el análisis de la programación dinámica, primero se tiene que habilitar este tipo de acciones. Se requiere para ello, verificar que al seguir la siguiente ruta en EXCEL: menú Herramientas / Macro / Seguridad, en la ventana generada, pestaña Nivel de Seguridad, esté seleccionado el nivel medio.

Si así se hubiera configurado, entonces al abrir el archivo ejecutable del modelo, se debe generar una solicitud de confirmación, que pregunta al usuario si desea habilitar o deshabilitar las macros. Debe escogerse que sí.

Abierto el archivo ejecutable, para utilizar la macro existe 3 alternativas:

- Digitar Alt + F8, se generará una ventana donde se debe escoger la macro modelo\_de\_reemplazo, y luego picar en el botón Ejecutar.
- Seguir la ruta: menú Herramientas / Macro / Macros, y se generará la misma ventana indicada en la alternativa anterior. Continuar el procedimiento.

- Activar la hoja INPUT, hacia la parte superior se encontrará, dentro del grupo Información General, una flecha con un texto dentro que dice Analizar. Se debe picar en la flecha, y la macro empezará a ejecutarse.

## 5.9. RESUMEN

En este capítulo, se ha desarrollado la teoría que sustenta el modelo JME, de reemplazo de maquinaria, a través de razonamientos traducidos en formulaciones y ecuaciones. En paralelo, se ha ido explicando cómo se ha plasmado el modelo en el entorno de EXCEL, plataforma escogida para tal, debido a su gran funcionalidad y excelentes características afines con las necesidades del modelo.

Se ha explicado cómo se analiza la decisión de darle continuidad a la maquinaria o de reemplazarla, así como el planteamiento de efectuar un Overhaul.

El producto final de lo explicado en este capítulo, es un archivo ejecutable en EXCEL, que se vale de una macro desarrollada en VBA, incorporada al archivo ejecutable, de manera que permite efectuar las veces que sea necesarias, el análisis del modelo de programación dinámica.

## Capítulo 6

### ANÁLISIS DEL MODELO DESARROLLADO

#### 6.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior, se describió el desarrollo del modelo aplicable a una empresa constructora, ideado básicamente para atender en forma óptima la problemática de los reemplazos y Overhauls de maquinarias como el Scooptram y el Jumbo, que son tradicionales en el campo de la tunelería aplicada a obras civiles y mineras.

Toda hipótesis o idealización, de alguna forma necesita ser demostrada o validada, y un camino para ello, es su aplicación al campo en que se concentra su atención. Por eso, en este capítulo se describirá aquello concerniente a la utilización del modelo implementado para esta Tesis, en una maquinaria con información y datos reales, y sobre esa base, se establecerá un análisis de sensibilidad para determinar aquellas variables que más influyen en el resultado final de las decisiones.

Lógicamente, el horizonte de planificación considerado es de varios años, y confrontar la realidad que se presentaría en ese horizonte de aplicarse lo recomendado como óptimo por este modelo, tomaría igual cantidad de años, que para los propósitos de esta Tesis, escapan de su alcance, lo que no significa de ninguna manera que este estudio no pueda ser rescatado y establecido en una empresa del corte requerido, y validado durante el periodo necesario.

## 6.2. APLICACIÓN DEL MODELO

Anteriormente, se señaló que el modelo desarrollado para esta Tesis, fue ideado y diseñado para ser aplicado a dos de las maquinarias tradicionales de mayor relevancia en proyectos constructivos de túneles, como son el Jumbo y el Scooptram. No obstante y sólo debido a fines explicativos, se limitará el contenido de este capítulo, fundamentalmente a lo que concierne a la aplicación del modelo al Scooptram de código SCT-01, por considerarse que refleja con mayor claridad los resultados que se desea evidenciar.

En tal sentido, se detallan a continuación las variables, los parámetros y demás consideraciones adoptadas para la utilización del modelo:

### 6.2.1. INFORMACIÓN DE ENTRADA

#### A. INFORMACIÓN GENERAL

- Maquinaria analizada, se trata de una cargadora subterránea, fabricada por la prestigiosa empresa internacional Atlas Copco ©, denominada Scooptram, modelo ST-1030, de motor Diesel y capacidad de cuchara de 5 m<sup>3</sup>.
- Código de la maquinaria, se revisaron cuatro Scooptrams, cuyos códigos son SCT-01, SCT-02, SCT-03 y SCT-04. De este grupo, se presentan los resultados de la aplicación del modelo al Scooptram SCT-01.
- Horizonte de planificación, como se detalló en las consideraciones del capítulo 5, el horizonte máximo de planificación es de diez años. Para esta aplicación, se utiliza dicho horizonte máximo.

#### B. CONDICIONES CONTABLES

- Costo de la maquinaria nueva, 400 000 dólares americanos.
- Tasa de interés mensual, 0.96%.
- Valor residual, se considera que este valor es prácticamente nulo, de desecho. Simbólicamente, se usa un valor residual de 01 dólar americano.

- Vida útil para fines de depreciación, puede usarse esta variable para acelerar o retrasar el proceso de depreciación, de acuerdo a las características del análisis que se desee realizar. En este caso, se consideró un valor de 7200 horas, que refleja una lenta velocidad de depreciación.

### C. CONDICIONES PARA OVERHAUL & REEMPLAZO

- Edad al inicio del análisis, 310 horas.
- Edad mínima para reemplazo, 3200 horas
- Edad máxima de conservación, 9000 horas.
- Edad mínima para Overhaul, 2500 horas.
- Características del Overhaul Completo, se considera que este tipo de Overhaul dura en promedio 02 meses, que se invierte en él alrededor de 120000 dólares americanos, y que produce mejoras a la maquinaria estimadas en una reducción de edad de 2300 horas.
- Características del Overhaul Parcial, en este caso, se estima que su ejecución demora sólo un mes con una inversión de 80000 dólares americanos, traduciéndose en mejoras a la maquinaria equiparables a un decremento en su edad de 1531 horas.

### D. PARÁMETROS DE ANÁLISIS

- Ancho de rango de edades, se comprobó que usando un ancho de rango de 04 horas se alcanza una buena precisión en el análisis, similar a como si se realizase con un ancho de 01 hora, pero a mayor velocidad. Por ello, se usa en este caso un ancho de 04 horas.
- Número de rango de edades, este parámetro se auto-calcula, y tomando en cuenta que la edad máxima de conservación es de 9000 horas y el ancho de rango es de 04 horas, entonces:  $1 + (9000/4) = 2251$  rangos de edades.
- Costo Fijo / Costo Total ( $CF/CT$ ), determinado a partir de un análisis de precios unitarios. Se utiliza un valor de 64.31%.

- Precio de venta por la operación, por cada hora efectiva de operación de la maquinaria, se estima una venta de 80.35 dólares americanos.
- Disponibilidad exigida, 92%.
- Tasa de disminución de disponibilidad, se asume una disminución en la disponibilidad real de 1% por cada 300 horas de operación efectiva de la maquinaria.
- Variabilidad de la Tasa de Uso, cada cuatrimestre se modifica la Tasa de Uso mensual de la maquinaria.
- Distribución de la Tasa de Uso Mensual, indicada en la tabla 6.1.

Nº Año	Primer Cuatrimestre	Segundo Cuatrimestre	Tercer Cuatrimestre
01	120	135	150
02	121	136	151
03	122	137	152
04	123	138	153
05	124	139	154
06	125	140	155
07	126	141	156
08	127	142	157
09	128	143	158
10	129	144	159

**Tabla 6.1** Distribución de Tasa de Uso Mensual de variabilidad cuatrimestral

### 6.2.2. COSTOS OPERACIONALES

Comentarios aparte merece este tema, en cuanto a la aplicación del modelo. La información de costos de la que se dispuso, abarca un periodo de 15 meses a ritmo constante de operación, para las 04 maquinarias referidas anteriormente, de códigos SCT-01 al SCT-04. Similar información se obtuvo para 04 Jumbos, de códigos JU-01 al JU-04, complementarios de los anteriores en sus faenas.

La configuración del modelo desarrollado exige, la disponibilidad de una base de datos que incluya costos operacionales que abarquen una amplitud no menor de aquella delimitada por la edad máxima de conservación.

Como tal extensión en la base de datos no fue de por sí disponible, partiendo de los registros del citado periodo de seguimiento a las maquinarias, es que fue imperativo realizar pronósticos. Para ese fin, se utilizó un método cuantitativo de relación causal, específicamente una regresión lineal simple, debido a su mayor ajuste a las curvas características de estos costos.

INFORMACIÓN REAL								
Código	SCT-01							
Item	Edad Inicial [Hrs]	Combustibles [US\$/Hr]	Lubricantes [US\$/Hr]	Grasas [US\$/Hr]	Filtros [US\$/Hr]	Neumáticos [US\$/Hr]	Repuestos [US\$/Hr]	Costo hora [US\$/Hr]
ene 07	31.70	22.00	0.45	0.52	0.86	5.30	0.94	30.05
feb 07	233.50	12.30	0.59	0.28	2.81	5.30	-	21.35
mar 07	578.00	14.61	6.10	0.31	5.53	5.31	-	31.85
abr 07	777.20	13.30	2.90	0.13	4.90	5.32	-	26.65
may 07	1,090.70	16.15	0.79	0.29	0.89	5.34	0.72	24.17
jun 07	1,381.80	21.30	1.04	0.26	-	5.33	5.55	33.48
jul 07	1,664.00	21.64	0.45	0.23	3.84	5.35	2.29	33.80
ago 07	1,962.90	17.55	2.12	0.28	3.48	5.35	4.50	33.29
sep 07	2,288.90	15.79	1.01	0.27	3.45	5.39	6.23	32.14
oct 07	2,620.50	15.57	0.27	0.30	-	5.60	2.83	24.58
nov 07	2,911.10	20.04	3.72	0.21	5.00	5.63	31.19	65.80
dic 07	3,153.90	15.18	1.32	-	4.13	5.67	20.78	47.09
ene 08	3,360.40	21.57	0.51	0.10	1.72	5.73	0.19	29.83
feb 08	3,589.40	11.59	2.18	0.07	4.15	5.82	20.90	44.80
mar 08	3,756.00	21.05	2.34	0.40	2.32	6.02	15.50	47.63

**Tabla 6.2** Costos operacionales reales del Scooptram SCT-01

En la tabla 6.2 se muestra la información real procesada referente a los costos del Scooptram SCT-01, componente por componente. Se abarca un periodo de 15 meses, y un rango de edades que llega hasta alrededor de 3800 horas. Se puede distinguir, que los costos originados por el consumo de combustibles son los más determinantes en el comportamiento del costo operacional, pues son cuantitativamente más importantes en comparación con los otros costos, dejando en segundo orden de relevancia a aquellos derivados de los repuestos. Cabe señalar también, que para el caso de los Jumbos y de acuerdo al estudio realizado, el componente principal del costo operacional es aquel determinado por los repuestos.

Sobre la base de la información mostrada en la tabla anterior, y para suavizar los puntos altos y bajos de la curva de costos operacionales, se construyó una nueva base de datos a través de interpolaciones, para rangos de edad de amplitud igual a 250 horas, y a partir de ello se ajustó el comportamiento de los costos a una curva lineal, mediante regresión simple (de una variable, que

es la edad inicial de la maquinaria). Esto se resume en la tabla que se muestra a continuación:

INFORMACIÓN PRONOSTICADA						REGRESIÓN LINEAL SIMPLE $Y = M \cdot X + B$
Serie	Edad Inicial (X)	Costo hora (Y)	$X \cdot Y$	$X^2$	$Y^2$	
01	250.00	21.86	5,464.53	62,500	477.78	M: 0.006543
02	500.00	29.52	14,761.27	250,000	871.58	B: 21.600659
03	750.00	27.35	20,513.58	562,500	748.10	R: 0.760877
04	1,000.00	24.89	24,888.53	1,000,000	619.44	
05	1,250.00	29.27	36,585.39	1,562,500	856.63	
06	1,500.00	33.62	50,423.55	2,250,000	1,130.02	
07	1,750.00	33.65	58,888.43	3,062,500	1,132.36	
08	2,000.00	33.16	66,310.40	4,000,000	1,099.27	
09	2,250.00	32.27	72,610.98	5,062,500	1,041.45	
10	2,500.00	27.30	68,248.64	6,250,000	745.26	
11	2,750.00	42.94	118,076.48	7,562,500	1,843.58	
12	3,000.00	58.95	176,840.47	9,000,000	3,474.73	
13	3,250.00	39.06	126,933.93	10,562,500	1,525.42	
14	3,500.00	38.96	136,347.63	12,250,000	1,517.61	
15	3,750.00	47.52	178,212.83	14,062,500	2,258.48	

Tabla 6.3. Pronóstico de costos operacionales en función de la edad inicial de maquinaria

La disposición de una función de costos dependiente de la edad de la maquinaria, como la determinada mediante el proceso arriba indicado, hizo posible extender la base de datos de costos hasta el límite deseado, que es justo por encima de la edad máxima de conservación, para los propósitos del modelo desarrollado.

En el anexo A se puede encontrar los ajustes de las curvas de costos operacionales, hechos en forma similar al descrito en esta sección, para el resto de maquinarias analizadas, tanto Jumbos como Scooptrams.

### 6.2.3. RESULTADOS

La macro implementada en el archivo ejecutable del modelo de reemplazo, realizó el análisis de la información descrita en este capítulo en un tiempo poco menor de 2 minutos, utilizándose un computador personal de 3.00 GHz.

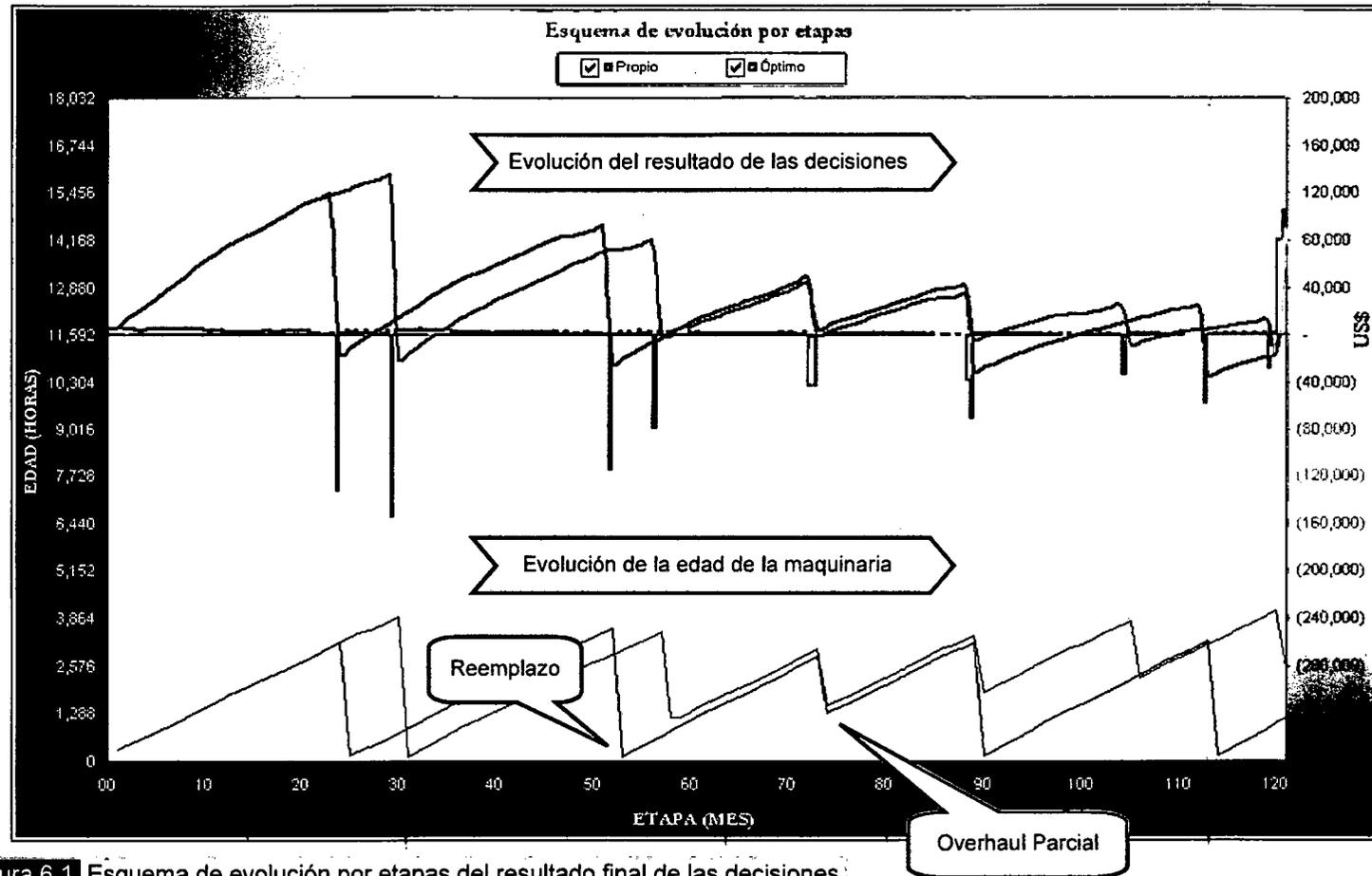


Figura 6.1 Esquema de evolución por etapas del resultado final de las decisiones

La figura anterior representa gráficamente la política de decisiones óptima (calculada por el modelo), en contraste con otra política, que hace las veces de una alternativa de comparación en cuanto a la evolución del resultado de las decisiones.

Para las condiciones planteadas, el modelo recomienda reemplazar la maquinaria 04 veces, al inicio de los periodos 24, 52, 89 y 113, y además, recomienda también la realización de un Overhaul Parcial al inicio de la etapa 73. Estas decisiones se presentan a las edades indicadas en la siguiente tabla:

Periodo [ mes ]	Decisión	Edad [ horas ]
24	Reemplazo	3217
52	Reemplazo	3578
73	Overhaul Parcial	2828
89	Reemplazo	3206
113	Reemplazo	3232
120	Conservación	1036

**Tabla 6.4** Resumen de decisiones recomendadas por el modelo

### 6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Algunos de los parámetros y/o variables considerados para el desarrollo del modelo sobre el que versa esta Tesis, son de naturaleza difícil de medir y hasta de estimar, por lo que en cierta forma requieren de un ligero grado de empirismo. Por citar un ejemplo, la alternativa planteada para simular el efecto del Overhaul, es decir la reducción de edad, tiene una connotación teórica que la hace enteramente válida, pero debe señalarse que la determinación del valor de dicha reducción requiere o bien de una apropiada y amplia base de datos al respecto, o bien de una fuente de experiencia importante.

Por ello, es que se desarrolló un análisis de sensibilidad de las variables y los parámetros (V/P) más relevantes del modelo, para determinar dos aspectos fundamentales: (1) la afectación del resultado final de las decisiones por la variación de alguna V/P, y (2) el rango tolerable de variación de las V/P para que se inaltere el resultado final de las decisiones.

### 6.3.1. TASA DE INTERÉS MENSUAL

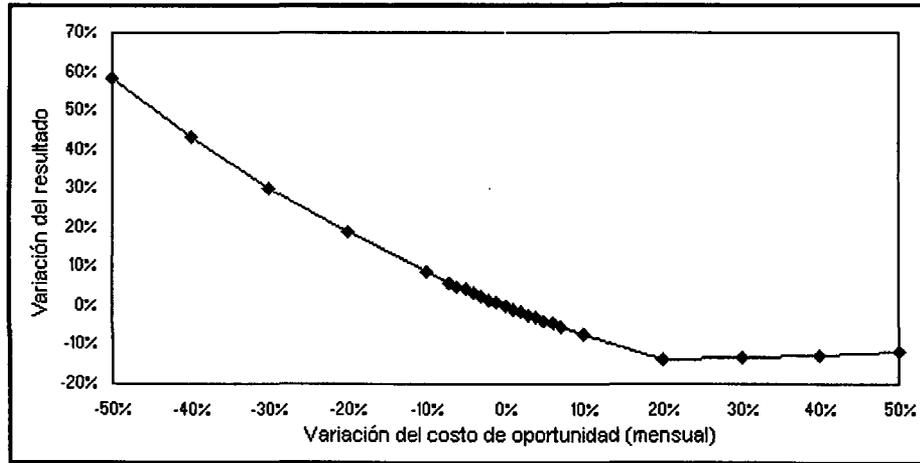


Figura 6.2. Variación del resultado VS variación de la tasa de interés mensual

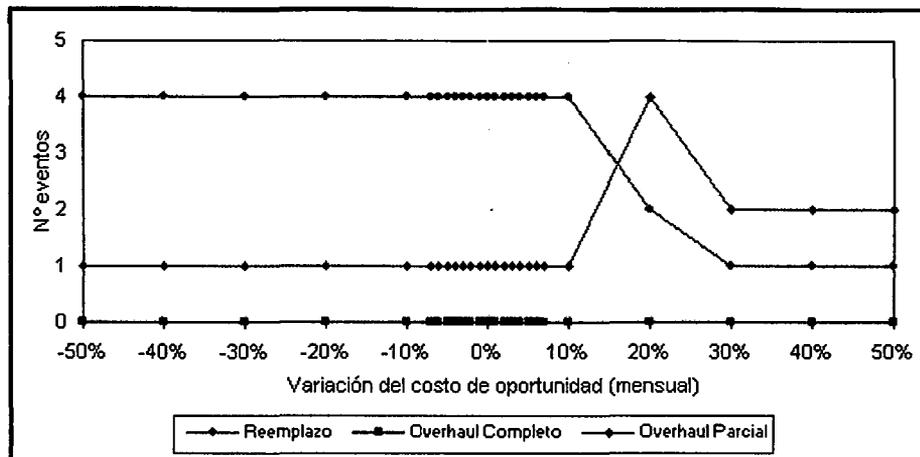


Figura 6.3. Número y tipo de eventos VS variación de la tasa de interés mensual

De acuerdo a los resultados presentados a través de la figura 6.2, se aprecia que conforme se incremente la tasa de interés mensual, será menor el resultado final que se obtenga. Esto se explica en el hecho de que al ser mayor la tasa de interés, será mayor también el factor por el cual deben dividirse los flujos de dinero para ser trasladados a su equivalencia en el tiempo base o tiempo 0, y esto derivará en resultados de menor valor.

### 6.3.2. VIDA ÚTIL DE DEPRECIACIÓN

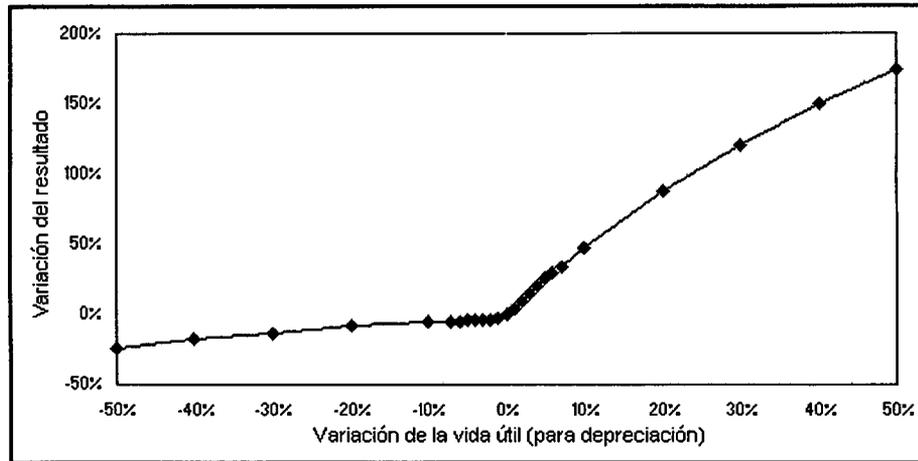


Figura 6.4 Variación del resultado VS variación de la vida útil de depreciación

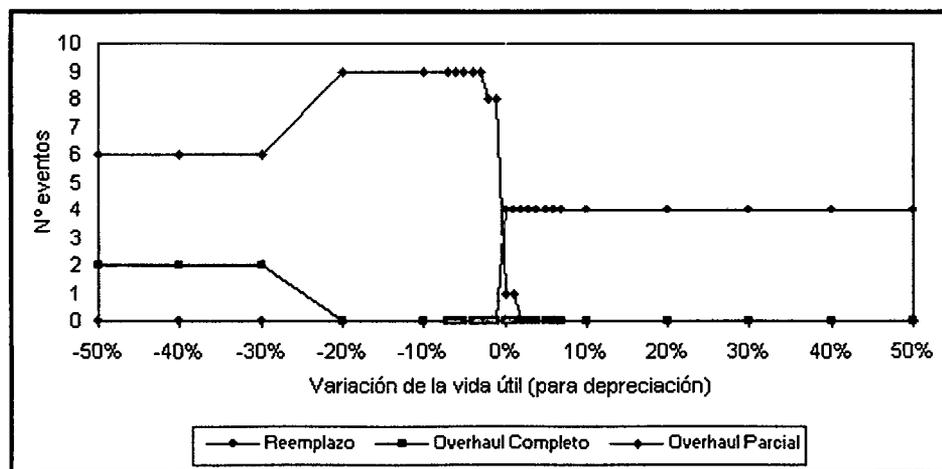


Figura 6.5 Número y tipo de eventos VS variación de la vida útil de depreciación

En la figura 6.4 se visualiza que la tendencia del resultado es creciente conforme aumenta la vida útil de depreciación. Se justifica este comportamiento considerando que al aumentarse la vida útil, la maquinaria se depreciará más lentamente, y será mayor el valor residual que se obtendrá cuando se desee ejecutar un reemplazo. Esta situación hace que los reemplazos sean más atractivos, por lo que mientras más grande sea la vida útil de depreciación, el modelo sugerirá básicamente realizar reemplazos y ya no Overhaults, tal cual se puede ver en la figura 6.5.

### 6.3.3. EDAD MÍNIMA PARA REEMPLAZO

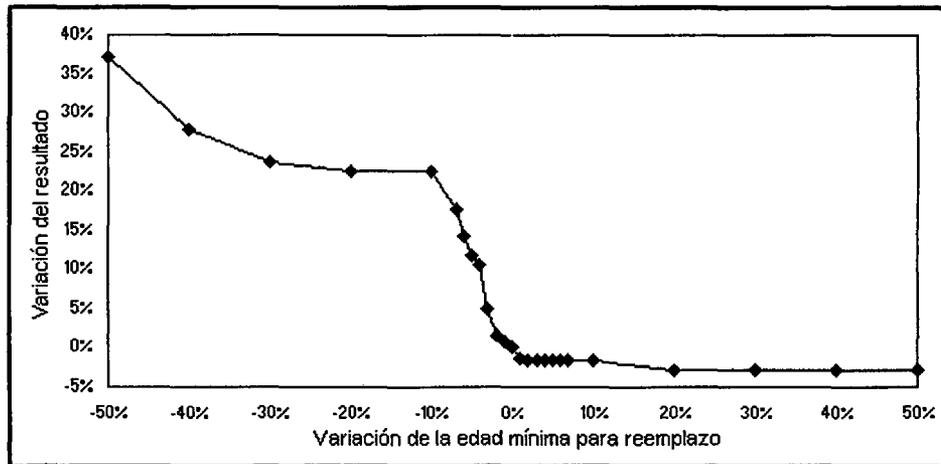


Figura 6.6 Variación del resultado VS variación de la edad mínima para reemplazo

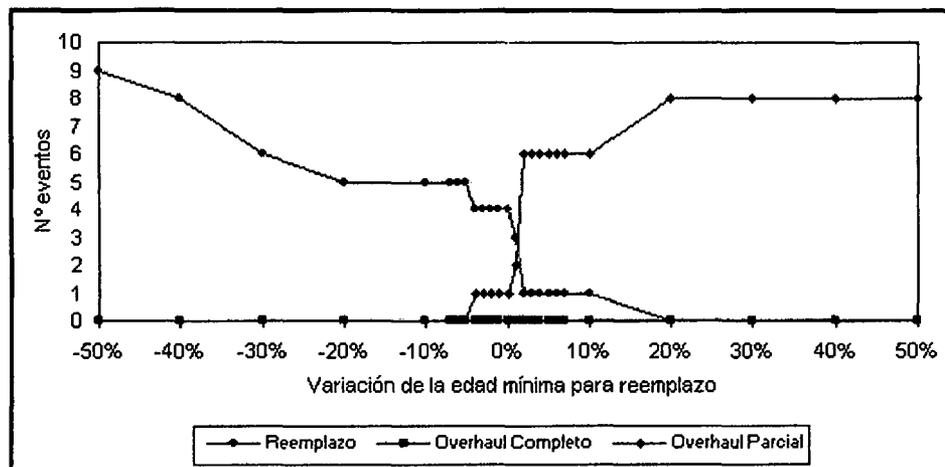


Figura 6.7 Número y tipo de eventos VS variación de la edad mínima para reemplazo

Conforme a lo que se muestra en las figuras 6.7 y 6.6, al rebajar la edad mínima para realizar los reemplazos, el modelo sugiere realizar cada vez más reemplazos, que teóricamente garantizan resultados de mayor valor. En el caso opuesto, al aumentar esta edad mínima, se hace cada vez menos viable y recomendable optar por reemplazar y se opta entonces por aumentar la cantidad de Overhauls.

Debe recordarse que la edad mínima para reemplazo es una limitación impuesta por el modelo para restringir que se adopte como parte de la política óptima, reemplazos a edades muy tempranas, ya que esta fórmula podría

funcionar en condiciones solamente teóricas, dado que en la práctica sería irreal pensar reemplazar la maquinaria cada 500 horas por citar un ejemplo.

#### 6.3.4. EDAD MÁXIMA DE CONSERVACIÓN

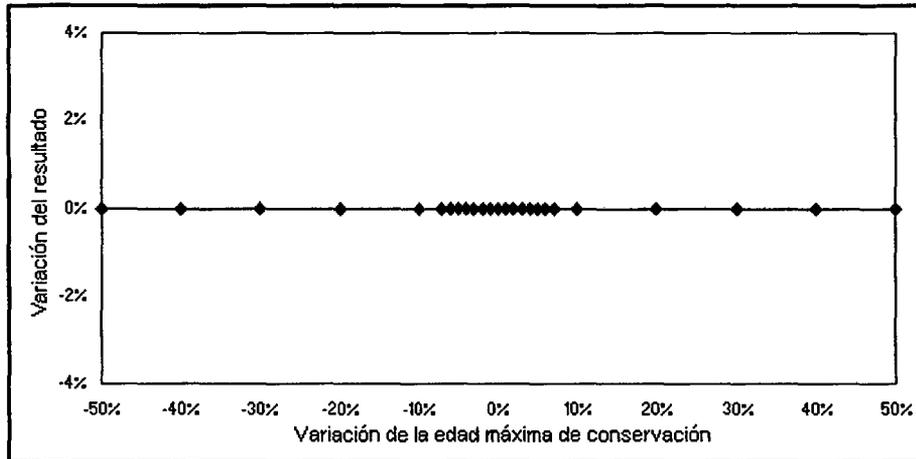


Figura 6.8 Variación del resultado VS variación de la edad máxima de conservación

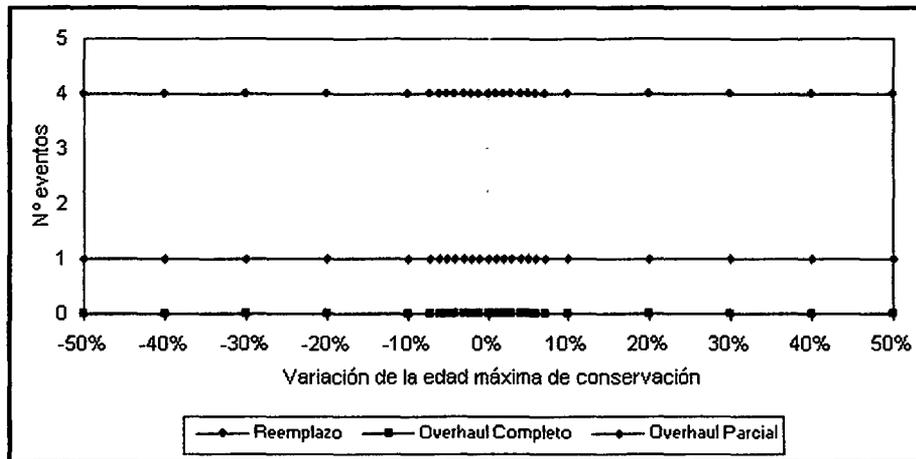
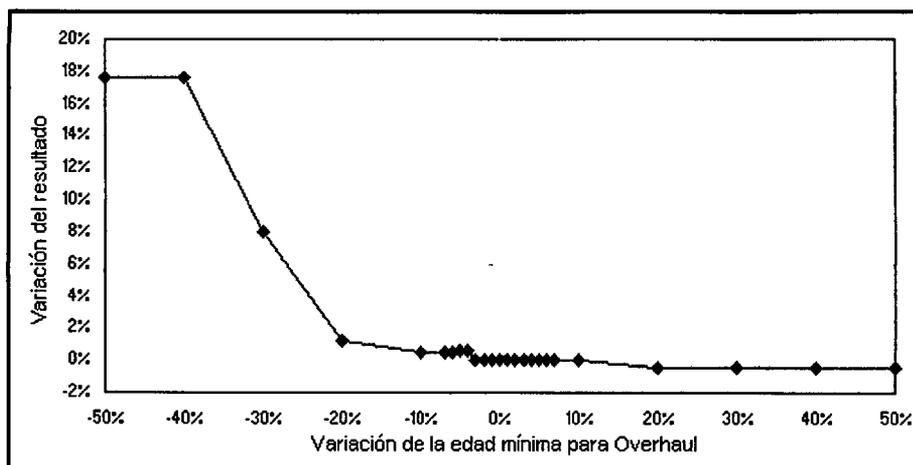


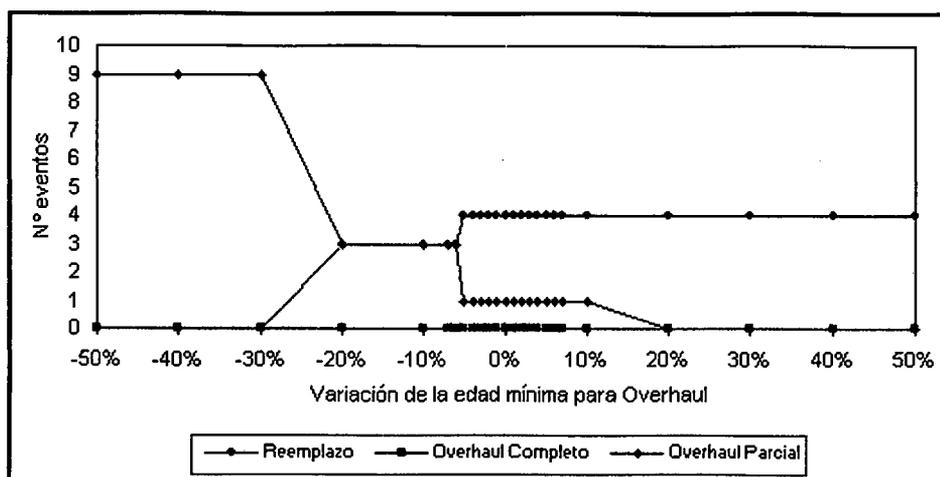
Figura 6.9 Número y tipo de eventos VS variación de la edad máxima de conservación

Las figuras 6.8 y 6.9 son contundentes, y reflejan una clara insensibilidad del modelo ante la variación de la edad máxima de conservación. Esto resulta lógico al pensar que el comportamiento óptimo de la maquinaria no podría ser aquel determinado a altas edades, que es precisamente cuando aparecen con más frecuencia las fallas y cuando más se piensa en reemplazar la maquinaria.

### 6.3.5. EDAD MÍNIMA PARA OVERHAUL



**Figura 6.10** Variación del resultado VS variación de la edad mínima para Overhaul



**Figura 6.11** Número y tipo de eventos VS variación de la edad mínima para Overhaul

En forma similar al comportamiento que se encuentra para el caso de la edad mínima de reemplazo, las figuras 6.11 y 6.10 dan cuenta que al reducir la edad mínima para Overhaul se incrementa el número sugerido de Overhails y aumenta el valor del resultado. Ocurre entonces, el comportamiento esperado al incrementar la edad mínima para Overhaul, pues prácticamente el modelo ya no recomienda optar por Overhails, sino exclusivamente por reemplazos.

Se entiende este comportamiento, dado que teóricamente sería idóneo poner a punto la maquinaria cada vez que se desee, lo cual no quiere decir que sea practicable la ejecución de Overhails a plazos cortos.

### 6.3.6. REDUCCIÓN DE EDAD POR OVERHAUL COMPLETO

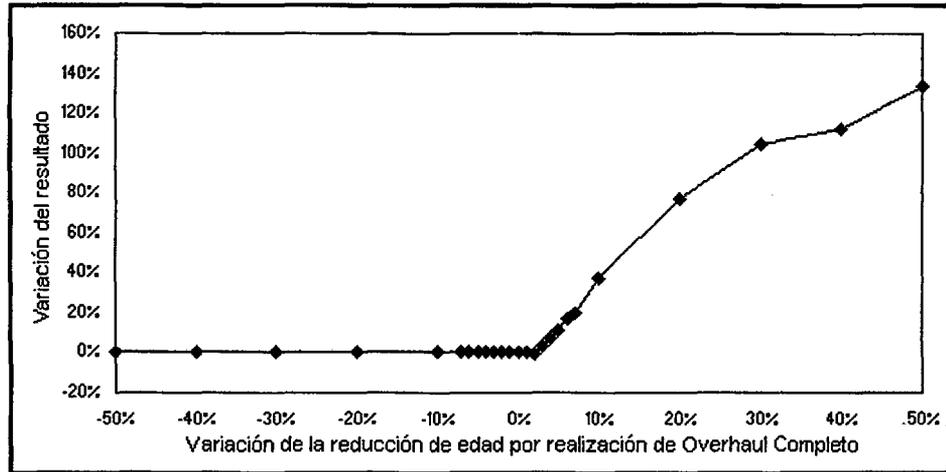


Figura 6.12 Variación del resultado VS variación de reducción de edad por Overhaul Completo

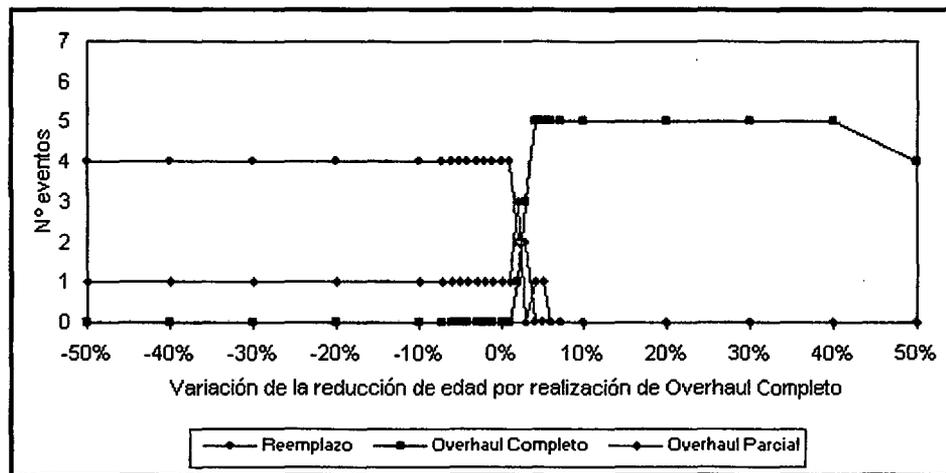


Figura 6.13 Número y tipo de eventos VS variación de reducción de edad por Overhaul Completo

El comportamiento identificado por las figuras 6.12 y 6.13, manifiesta en forma evidente que conforme sea más grande la reducción de edad que se puede producir al ejecutar un Overhaul Completo, será más grande también el resultado económico de las decisiones y será más idóneo realizar Overhaults Completos en lugar de reemplazos. Se entienden las afirmaciones anteriores, considerando que al incrementarse la reducción de edad por Overhaul, se incrementarán en mayor medida las mejoras operacionales de la maquinaria, se

revalorará más y aumentará de mayor forma su disponibilidad real, lo que hacen entonces más atractivos a los Overhauls.

### 6.3.7. REDUCCIÓN DE EDAD POR OVERHAUL PARCIAL

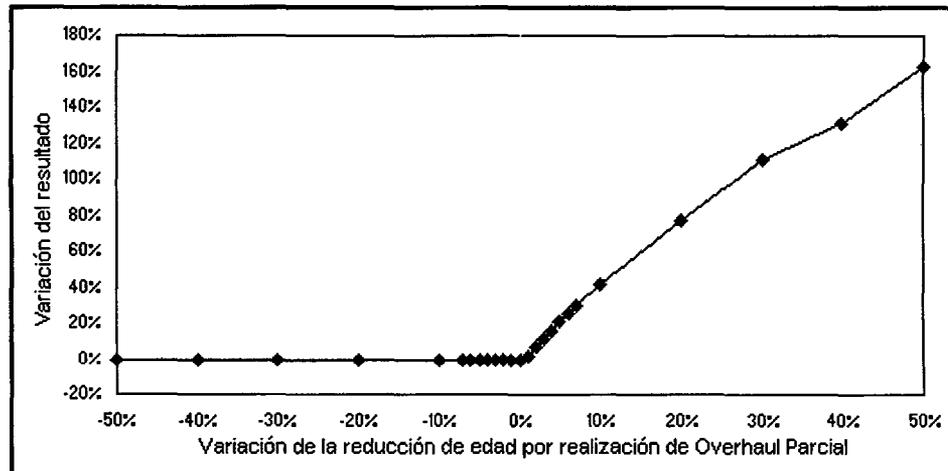


Figura 6.14 Variación del resultado VS variación de reducción de edad por Overhaul Parcial

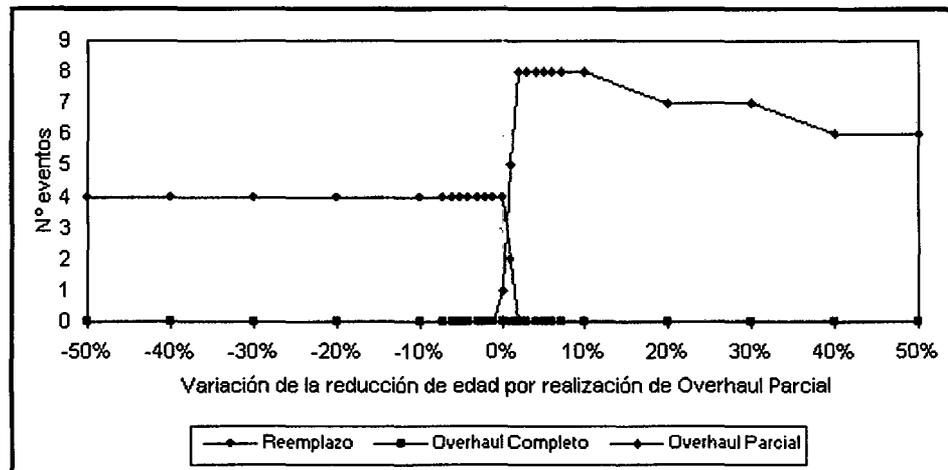


Figura 6.15 Número y tipo de eventos VS variación de reducción de edad por Overhaul Parcial

Tal cual se encontrara para el caso del Overhaul Completo, la reducción de edad por Overhaul Parcial presenta un comportamiento muy parecido, con la salvedad de que la figura 6.15 refleja que si bien es cierto en primera instancia, al incrementar el valor de esta reducción se sugiere aumentar drásticamente el número de Overhauls Parciales, conforme se incrementa aún más esta reducción, el número de Overhauls Parciales sugeridos va decreciendo.

### 6.3.8. RATIO COSTO FIJO / COSTO TOTAL

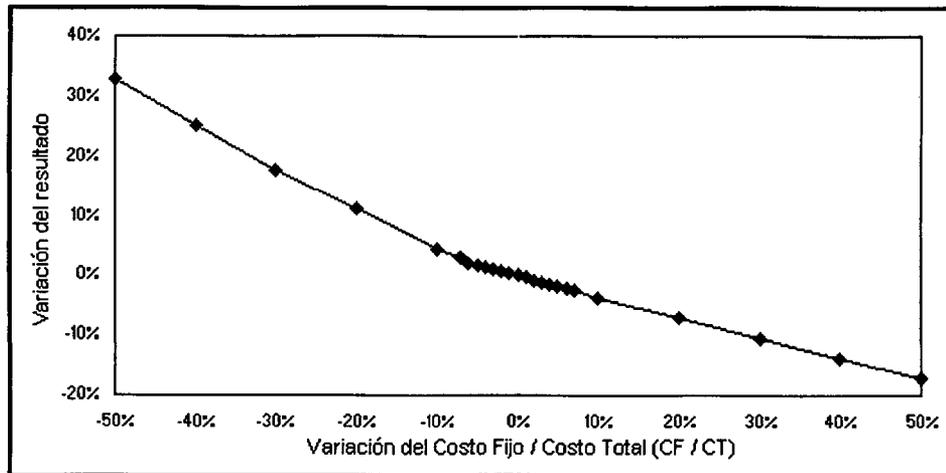


Figura 6.16 Variación del resultado VS variación del ratio Costo Fijo / Costo Total

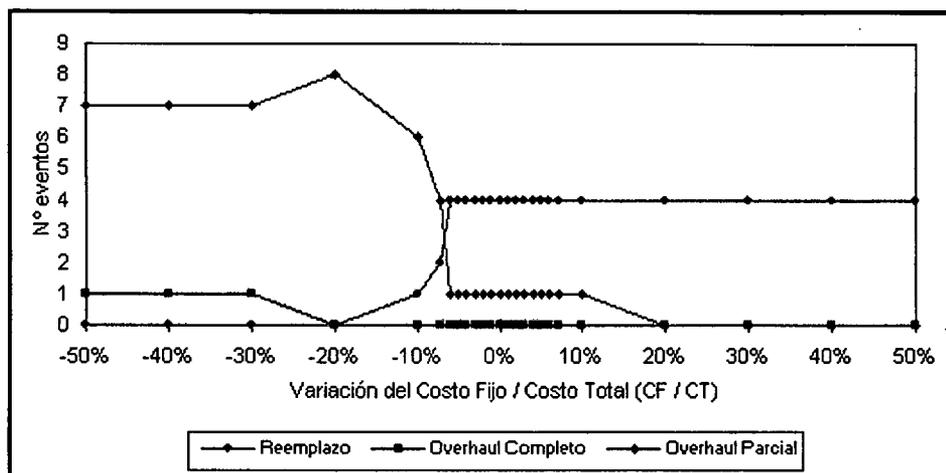


Figura 6.17 Número y tipo de eventos VS variación del ratio Costo Fijo / Costo Total

La figura 6.16 refleja que el incremento en el ratio Costo Fijo / Costo Total, significa un decremento en el resultado de las decisiones. Para entender este comportamiento, se debe recordar el cálculo del costo por No Disponibilidad, resumido por la expresión indicada en la ecuación 5.9. El costo por No Disponibilidad es un flujo negativo que varía en directa proporción con el ratio Costo Fijo / Costo Total, entonces, si aumenta este ratio aumenta el costo por No Disponibilidad y se reduce, consecuentemente, el resultado de las decisiones.

### 6.3.9. DISPONIBILIDAD EXIGIDA

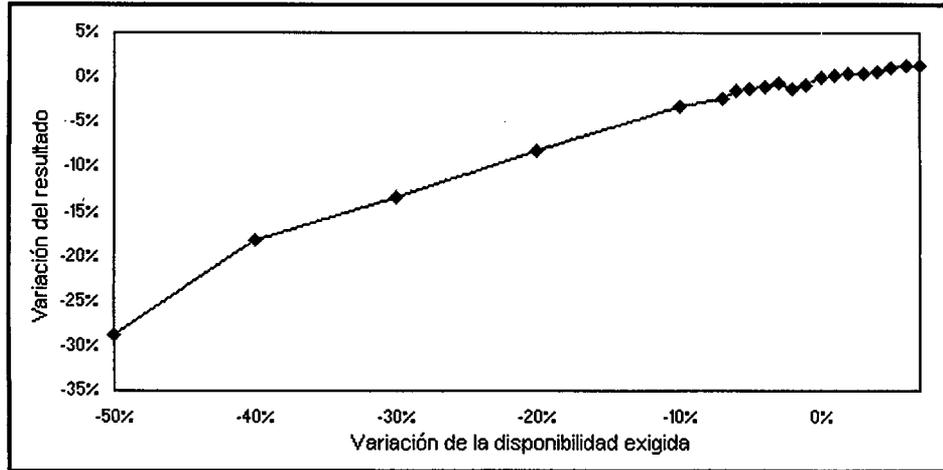


Figura 6.18 Variación del resultado VS variación de la disponibilidad exigida

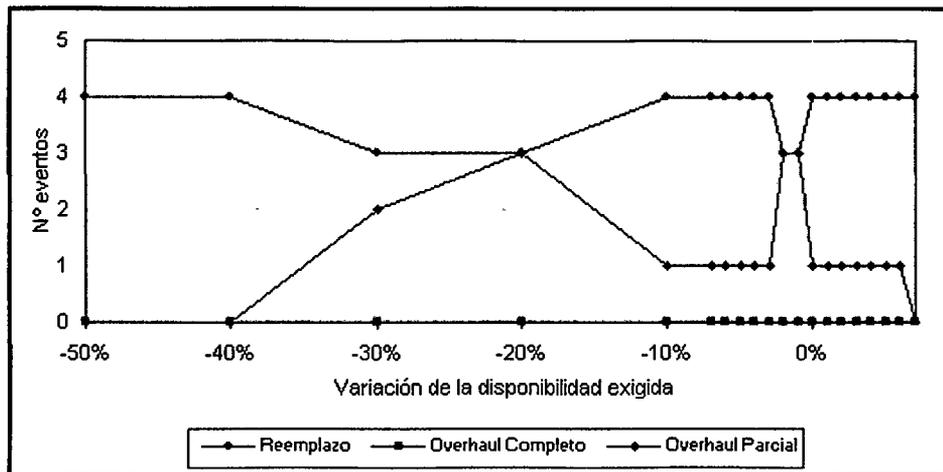


Figura 6.19 Número y tipo de eventos VS variación de la disponibilidad exigida

Al revisar la figura 6.19, lo cierto es que no se pueden obtener conclusiones contundentes. En cambio, la figura 6.18 explica que al incrementar la disponibilidad exigida, se incrementa el resultado final de las decisiones. Se debe recordar que de acuerdo a las consideraciones adoptadas por el modelo, la disponibilidad real inicial que se considera para la maquinaria es igual a la disponibilidad exigida y conforme aumente la edad, se reduce la disponibilidad real utilizando la tasa de disminución de la disponibilidad.

Entonces, al partir de una disponibilidad exigida mayor, se tendrán valores mayores de disponibilidad real, que significarán menores costos por No Disponibilidad, y finalmente, mayores resultados.

### 6.3.10. TASA DE REDUCCIÓN DE DISPONIBILIDAD

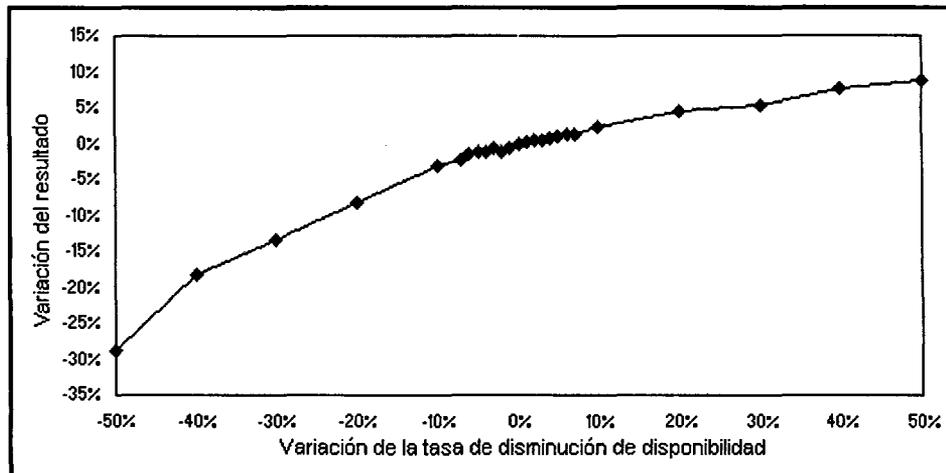


Figura 6.20 Variación del resultado VS variación de la tasa de reducción de disponibilidad

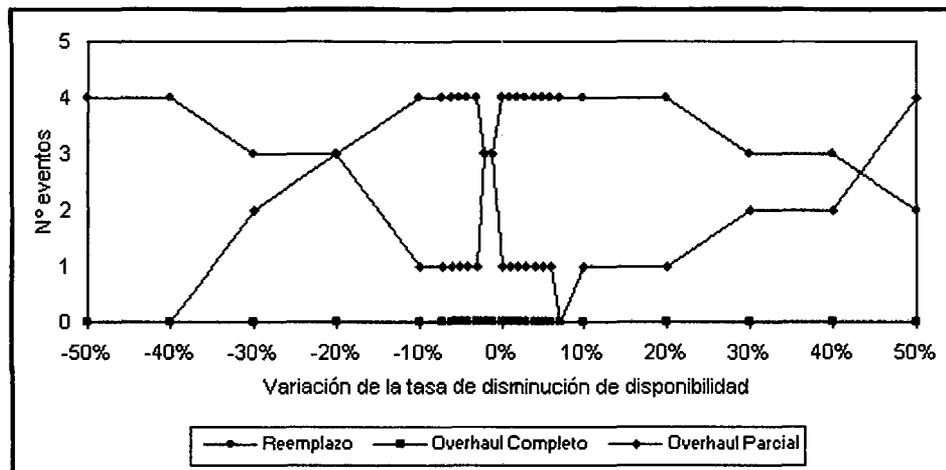


Figura 6.21 Número y tipo de eventos VS variación de la tasa de reducción de disponibilidad

Se debe indicar que el incremento al que se refiere el de la tasa de reducción de disponibilidad, es al de la cantidad de horas que deben transcurrir para reducir la disponibilidad real en 1%. Es decir, si originalmente en la puesta de ejecución del modelo se consideraba que la disponibilidad disminuye 1%

cada 300 horas, un incremento del 20% en este parámetro significa esperar una reducción de 1% en la disponibilidad al transcurrir 360 horas.

Partiendo de la aclaración señalada, se explica entonces que al tener que transcurrir más tiempo para reducir el mismo porcentaje de disponibilidad que en la situación original, entonces se tendrán disponibilidades reales mayores, y se obtendrá el comportamiento reflejado por la figura 6.20, que se explica de la misma forma a la indicada para el caso del parámetro disponibilidad exigida.

Se ha mostrado hasta ahora los resultados del análisis de sensibilidad practicado para cada variable y parámetro, pero ya en este punto, es necesario establecer la comparación del grado de variación del resultado final de las decisiones, por la modificación en las V/P, para determinar cuál de éstas es más propensa de producir modificaciones en la política de decisiones y en su resultado, siendo por ende también aquella V/P que requiere mayor seguimiento y mejor control.

Entonces, se presenta a continuación las figuras 6.22 y 6.23, y en ellas se distingue visualmente las V/P más sensibles, tanto sea por su incremento o por su decremento.

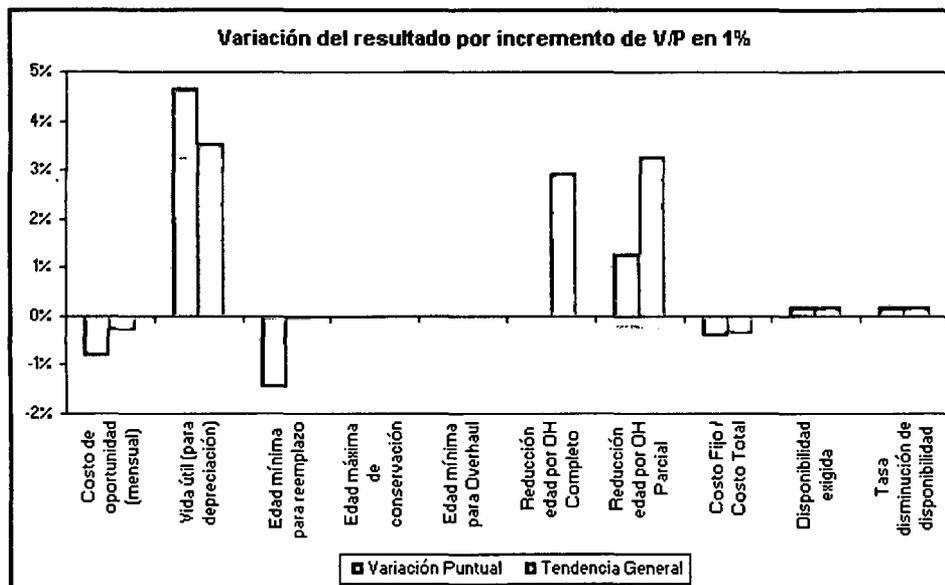


Figura 6.22 Variación del resultado por incremento de V/P en 1%

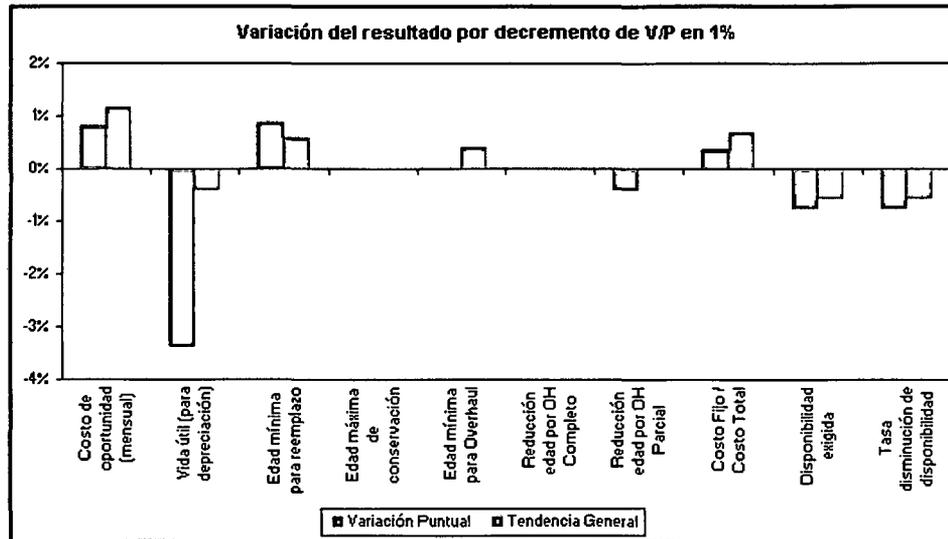
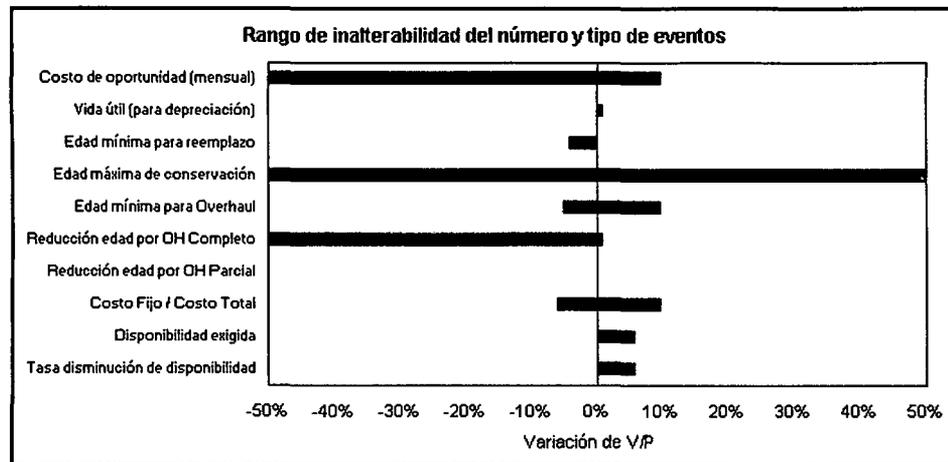


Figura 6.23 Variación del resultado por decremento de V/P en 1%

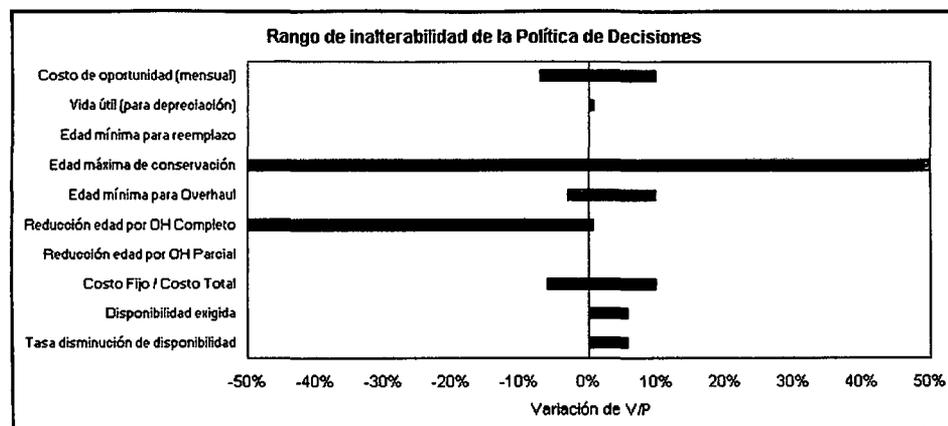
De lo mostrado, se puede interpretar lo siguiente:

- La vida útil para fines de depreciación, cuantitativamente hablando tiene el efecto más relevante en el resultado final de la política de decisiones, cuando se incrementa su valor. Se entiende este comportamiento ya que al acrecentarse la vida útil de depreciación, se retrasa la depreciación de la maquinaria, y así, al producirse los reemplazos se obtienen resultados de mayor magnitud.
- La reducción de edad por la realización de Overhaul, sea éste parcial o completo, también influye determinadamente en el resultado de las decisiones, cuando se incrementa su valor. Se deduce la lógica de esta afirmación partiendo de la idea de que al producirse mayores reducciones de edad de la maquinaria, las mejoras operacionales y el aumento de disponibilidad serán también mayores, que finalmente se traduce en menores costos de operación y resultados de mayor magnitud.
- Continúan en orden de relevancia los decrementos en las siguientes V/P: tasa de interés mensual, ratio Costo Fijo / Costo Total y la edad mínima para reemplazo. Cabe señalar también, que los parámetros disponibilidad exigida y tasa de disminución de disponibilidad presentan una sensibilidad prácticamente equivalente.

Para complementar el estudio de sensibilidad, se estableció los rangos en que puede permitirse variar el valor de las V/P sin producir alteración, primero en número y tipo de eventos recomendado por el modelo, entendiéndose como evento el reemplazo u Overhaul (completo o parcial), y segundo y más importante, en la política general de decisiones. Véase las figuras 6.24 y 6.25.



**Figura 6.24** Rango de inalterabilidad del número y tipo de eventos



**Figura 6.25** Rango de inalterabilidad de la Política de Decisiones

#### 6.4. CONSISTENCIA DE LOS DATOS DE SALIDA

De acuerdo a los resultados de la aplicación del modelo, resumidos en la tabla 6.4, y representado por la figura 6.1, es que se puede inferir que las condiciones planteadas en esta aplicación del modelo, hacen que la tendencia

hacia lo óptimo esté dada por el reemplazo de la maquinaria tan pronto como sea posible, es decir, apenas se supere el límite impuesto por la edad mínima de reemplazo (3200 horas).

No obstante, no puede decirse *a priori* que la política óptima de decisiones siempre será aquella en la que se reemplace apenas sea posible, pues en esta misma tabla de decisiones, se aprecia la recomendación de un Overhaul Parcial al inicio del periodo 73, a las 2828 horas de edad, y esto descarta la presunción de tal configuración de la política óptima de decisiones.

Esta tendencia de las decisiones hacia el reemplazo, se evidencia también en el análisis de sensibilidad de la edad mínima para reemplazo (ver figuras 6.6 y 6.7), pero cabe indicar que la limitación impuesta por esta variable para la realización de los reemplazos, es de incorporación necesaria al modelo, puesto que sería imposible llevar a la práctica reemplazos en espacios de tiempo reducidos.

Las recomendaciones establecidas por la ejecución del modelo, con la información detallada en este capítulo, establecen cierta predisposición de las decisiones hacia los reemplazos en lugar de hacia los Overhails. No obstante, esto obedece a las características particulares de esta puesta en ejecución del modelo, pero de ninguna manera puede generalizarse una recomendación similar para otras maquinarias, ya que cada maquinaria es un mundo distinto, con características distintas.

## 6.5. ANÁLISIS FODA

### FORTALEZAS:

- Facilidad de la ejecución del análisis, partiendo de la determinación de parámetros específicos.
- Rapidez del análisis y seguimiento de la política óptima.
- Diversidad de alternativas de decisión, a diferencia de otros modelos se incluye al Overhaul Parcial y al Overhaul Completo.
- No presenta la rigidez de otros modelos, donde las decisiones se evalúan por año, no siendo necesariamente lo óptimo. El modelo desarrollado permite decisiones por meses.

- Flexibilidad para la decisión, permite contrastar lo que pasaría si se desea adoptar decisiones distintas a las sugeridas por el modelo.
- Facilidad de implementación del modelo.

#### OPORTUNIDADES:

- Mejoramiento de la simulación de los efectos del Overhaul, partiendo del análisis de una amplia base de datos, de largo horizonte, que por lo menos debería contener: un detalle breve de los Overhails realizados, edades a las que se realizaron, costos operaciones antes y después del Overhaul, disponibilidad real antes y después del Overhaul.
- Mejoramiento del modelo a través de la inclusión de factores o ratios de incertidumbre para cada parámetro.

#### DEBILIDADES:

- No inclusión de los efectos de la variabilidad del mercado en cuanto al precio de adquisición y venta de la maquinaria.
- No inclusión de las implicancias de la No Disponibilidad de la maquinaria en el sistema productivo completo.

#### AMENAZAS:

- Incertidumbre en el valor de algunos parámetros, como la reducción de edad por la ejecución de Overhaul o la tasa de disminución de la disponibilidad.
- Ocurrencia de accidentes que imposibiliten a la maquinaria seguir operando, y que motiven el reemplazo obligatorio.
- Aplicación incorrecta del modelo.
- Falta de validación y seguimiento periódico de los parámetros del modelo.
- Asignación equivocada de costos, a una maquinaria en lugar de otra.

## 6.6. RESUMEN

En este capítulo, se ha descrito el procedimiento seguido para la aplicación del modelo, al caso particular de un Scooptram modelo ST-1030, de código SCT-01, elegido entre un grupo de maquinarias también conformado por otros 3 Scooptrams y 4 Jumbos, debido a que los resultados de dicha aplicación, reflejan de una mejor forma la exposición de lo que se desea evidenciar.

En ese camino, se describe la necesidad y forma de abordar la proyección de los costos operacionales a través de un método cuantitativo de relación causal, con la finalidad de cubrir la amplitud necesaria de la base de datos respectiva, establecida por la edad máxima de conservación.

También, se estableció un análisis de sensibilidad de las variables y parámetros, afectos de producir modificaciones en el resultado final de las decisiones, encontrándose como muy relevantes la vida útil de depreciación, y la reducción de edad por la ejecución de Overhaul.

Finalmente, se reflexiona respecto a la política general de decisiones calculada por el modelo, que se ajusta específicamente a las características aquí planteadas.

## **Capítulo 7**

### **CONDICIONES GENERALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO**

#### **7.1. INTRODUCCIÓN**

El establecimiento de la política óptima de decisiones utilizando el modelo de reemplazo desarrollado para esta Tesis, se basa en datos de entrada, que no son más que las consideraciones utilizadas por el modelo para simular el entorno operativo y financiero de la maquinaria.

La bondad de los resultados expresados por el modelo, depende de la calidad de los datos que se ingresen al archivo ejecutable, y el éxito económico de la ejecución de los reemplazos y Overhauls depende del seguimiento y periódico reajuste de las consideraciones empleadas por el modelo, como se explicará en este capítulo.

#### **7.2. ÁMBITO INTERNO**

Las condiciones referidas al ámbito interno, contemplan aquellas que están dentro de la capacidad de la empresa de ser controladas. Para que el modelo pueda ser implementado satisfactoriamente, se debería tomar en consideración los siguientes aspectos:

##### **7.2.1. CONTROL DE COSTOS**

Las características del modelo desarrollado, hacen indispensable para la empresa la disposición de una oficina o área dedicada al control de los costos de las maquinarias. Se puede deducir de lo que hasta ahora se ha explicado en los capítulos anteriores, que un factor determinante de la bondad de la política de

decisiones determinada por el modelo, es la certeza y propiedad de la información de costos con que se alimenta la base de datos usada por el archivo ejecutable.

El control de costos, debe establecerse de acuerdo a los alcances que se indican a continuación:

- El control debe registrarse en una base de datos digital, diariamente, y con los datos debidamente clasificados para cada maquinaria. Se debe garantizar que la información se encuentre actualizada y disponible cada vez que sea requerida.
- Se deben incluir en la base de datos, las lecturas de los horómetros, al inicio y al final de cada turno, verificando su coherencia además de la coincidencia que debe existir entre la lectura final de un turno y la lectura inicial del turno siguiente.
- Debe incluirse una breve descripción de los trabajos realizados por la maquinaria en cada turno, además del frente o frentes donde éstos se ejecutaron, y si fuera posible la producción directa o indirecta realizada por la maquinaria, por ejemplo: metros perforados si fuese un Jumbo, o metros cúbicos evacuados si fuera un Scooptram.
- Los consumos de combustibles, lubricantes, grasas y filtros deben ser identificados con precisión respecto a la maquinaria que los demanda, y deben ser registrados en la base de datos.
- Cada vez que las maquinarias sean sometidas a mantenimiento o reparaciones, debe incluirse en el registro digital una descripción concisa de estas labores, además del detalle de los repuestos o neumáticos que fueran necesarios utilizar, así como la lectura del horómetro.
- Los periodos en que la maquinaria se encuentre en Stand By también deben ser registrados en la base de datos.
- En el caso de ejecutarse algún Overhaul, sea parcial o completo, debe compilarse información sobre los sistemas o componentes modificados, reparados o reemplazados, la lectura del horómetro, la duración del Overhaul y la inversión requerida, disgregada por ítems como: costo de la mano de obra, repuestos, etc.

- El responsable del control de costos, debe ser provisto de las facilidades necesarias para acceder a la información que necesita registrar, de manera eficiente, ya que su función implica la interacción permanente con otras áreas como almacén, equipos, control de gestión, por citar algunas.
- El control de costos debe ser supervisado apropiadamente, y la consistencia de los datos registrados debe ser analizada con una periodicidad que podría ser mensual, ya que si se detectase alguna incompatibilidad, ésta podría ser aclarada de forma más oportuna. La característica fundamental que debe poseer la base de datos es la confiabilidad de su contenido.

### 7.2.2. CAPACITACIÓN

Si bien es cierto el archivo ejecutable del modelo es finalmente una hoja de cálculo con macros incorporadas, y no tiene la sofisticación de un software especializado de cálculo estructural, por citar un ejemplo, es muy importante para la persona encargada de su utilización y de la recomendación de políticas óptimas de reemplazo, el pleno conocimiento del archivo ejecutable y de los criterios para su uso.

Para tal efecto, es necesaria una capacitación específica, que en términos prácticos no debería abarcar más allá de la elaboración y difusión de folletos instructivos o manuales de uso, que lógicamente deben ser lo suficientemente explicativos y contundentes como para familiarizarse con el archivo ejecutable y poder utilizarlo con coherencia y facilidad.

### 7.2.3. APLICACIÓN DE LA POLÍTICA RECOMENDADA

Para la determinación de la política óptima de decisiones utilizando el modelo desarrollado, debe partirse de la elección de un instante de tiempo específico que constituirá el inicio del horizonte de planificación. Entonces, cuando este análisis se plantee y utilizando la información disponible, debe emitirse una recomendación respecto a las decisiones que son más convenientes adoptar durante los próximos diez años, o si se desea, durante un horizonte menor.

La totalidad de los datos de entrada, así como las consideraciones y restricciones adoptadas para la recomendación de la política óptima de decisiones, deben ser claramente registradas, de manera tal que toda esta información se encuentre disponible cuando con posterioridad se desee revisar o hacer seguimiento a la política de decisiones.

Es entendido, que una responsable recomendación de las decisiones que son más convenientes adoptar durante el horizonte planteado, implica la utilización de información adecuada, que provea el soporte necesario para emitir recomendaciones con la seguridad de estar decidiendo consistentemente, y de manera muy cercana a lo verdaderamente óptimo. Si de tal forma se ha procedido inicialmente, al emitir la recomendación de la política óptima de decisiones, ello no significa que durante el transcurso del horizonte de planificación no se vuelva a revisar la política recomendada, ni se le haga seguimiento.

La política de decisiones determinada utilizando el modelo de reemplazo desarrollado, no debe ser letra muerta, sino debe constituir un marco de acción específico conforme al cual debe procederse para realizar los reemplazos o mantenimientos mayores (Overhauls), pero a la vez es preciso validar con cierta periodicidad los datos considerados inicialmente en el archivo ejecutable del modelo, y conforme a ello reajustar las decisiones recomendadas. Tales revisiones o seguimientos podrían hacerse semestral o anualmente.

El modelo permite anticiparse a los reemplazos u Overhauls que debe realizarse a la maquinaria, determinando en forma específica el momento en que se deben ejecutar. Entonces, si de antemano ya se conoce cuando tocará realizar una de estas acciones, una gestión diligente contemplará la puesta en marcha de la logística necesaria para que se ejecute en el momento indicado ya sea el reemplazo o el Overhaul.

### 7.3. ÁMBITO EXTERNO

Estas condiciones, son aquellas que escapan del dominio y facultades de la empresa, y debe repararse en ellas para no caer en el error de pensar que la recomendación inicial de la política de decisiones establecida utilizando el modelo, es suficiente para garantizar un óptimo resultado de la ejecución de Overhauls y reemplazos.

### 7.3.1. VARIABILIDAD DE LAS CONSIDERACIONES INICIALES

Partiendo de los alcances señalados en el ítem 7.2.3, referidos a la aplicación de la política recomendada, debe hacerse hincapié que la declaración inicial respecto a la política de decisiones que es más conveniente adoptar en el transcurso del horizonte de planificación, está enmarcada en un escenario que considera condiciones iniciales, proyecciones y supuestos respecto a lo que se espera encontrar durante el horizonte.

Lógicamente si todo lo inicialmente considerado se conservara estático e inalterable en el tiempo, los resultados de la política de reemplazos serían tal cual se estableció en aquel inicio. Normalmente esto no es así, puesto que la operación de la maquinaria es dinámica en cuanto a sus características, como la tasa de uso de la maquinaria; la dificultad de los trabajos encomendados, que modifica los costos operacionales; la tangible posibilidad de la ocurrencia de un accidente, que en el peor de los casos podría dejar inservible la maquinaria, haciéndose imprescindible en este caso el reemplazo.

Entonces, la cercanía a lo óptimo de la política de decisiones recomendada requiere que las consideraciones iniciales se mantengan medianamente estándar al menos durante el tiempo que dure el horizonte de planificación, pero para sobrellevar el impacto de la variación en estas consideraciones, periódicamente debe revalidarse la política recomendada. Esta periodicidad podría ser semestral o anual.

### 7.3.2. VARIABILIDAD DEL MERCADO

En el ítem anterior se mencionaron algunas consideraciones que en el transcurrir del horizonte de planificación pueden alterarse. A lo anterior se debe agregar ahora, aspectos respecto al mercado que pueden modificar las condiciones iniciales del modelo.

Un listado enumerativo, pero no limitativo, de tales aspectos es el siguiente:

- El costo del dólar americano.
- El costo de los combustibles.
- El costo de oportunidad del capital.

- El precio de venta por la operación.
- El valor residual de las maquinarias así como el costo de adquisición, debido a que la oportunidad que presentara el mercado al momento de la venta o la compra, respectivamente, podría modificar estos valores.
- Ídem a lo anterior, respecto a la inversión necesaria para realizar un Overhaul.
- La vida útil para fines de depreciación, debido a que algunas coyunturas podrían obligar a acelerar o desacelerar el proceso de depreciación.

Una vez más, se recomienda mitigar el impacto de estas variaciones a través de revisiones periódicas de las consideraciones del modelo, para el reajuste de la política recomendada de decisiones.

#### 7.4. ANÁLISIS DE COSTO - BENEFICIO

Respecto al costo de la implementación del modelo, se considera una persona encargada de controlar los costos y registrarlos en una base de datos digital. Durante los diez años, se podría pensar que durante 4 veces se renovará esta persona, por lo que serían necesarias igual cantidad de capacitaciones.

ANÁLISIS DE COSTO - BENEFICIO				
Tasa de interés mensual (r)		0.96%		
<b>COSTO</b>				
Descripción	Unidad	PU [US\$]	Cantidad	Costo Parcial (Tiempo Base)
Capacitación	global	500.00	4	$\sum_{i=1}^4 \frac{Capacitación_i}{(1+r)^{30*(i-1)}} = 1,423.60$
Controlador de Costos	mes	700.00	120	$\sum_{i=1}^{120} \frac{Controlador\_Costos_i}{(1+r)^i} = 49,747.75$
Costo Total (Control de set de 10 maquinarias mayores)				51,171.35
Costo Total Prorrateado (Control de 01 Scooptram)				5,117.13

**Tabla 7.1** Costo de implementación del modelo con horizonte de 10 años

Naturalmente, el controlador de costos no estará encargado de realizar el seguimiento a una sola maquinaria, sino de un set de maquinarias. En el cálculo mostrado en la tabla 7.1, a manera de ejemplo se piensa que estaría a cargo del control de 10 maquinarias mayores.

El beneficio es la diferencia entre el resultado que se alcanzaría adoptando la política óptima y el resultado de seguir una política empírica, que de acuerdo a los datos de entrada descritos en el capítulo 6, podría consistir en realizar Overhaul Completo cada 2500 horas y reemplazos a las 9000 horas.

BENEFICIO	
Descripción	Resultado (Tiempo Base)
Alternativa Óptima	89,362.00
Alternativa Empírica (Overhaul Completo: 2500 hrs + Reemplazo: 9000 hrs)	72,593.00
Beneficio Total (01 Scooptram)	16,769.00

**Tabla 7.2** Beneficio de implementación del modelo con horizonte de 10 años

De acuerdo a la información mostrada en las tablas 7.1 y 7.2, el índice de beneficio/costo es igual a 3.28. En proyectos de tunelería tradicional, el staff de maquinarias es de una cantidad mayor que la del ejemplo, por lo que el índice de beneficio/costo sería mayor aún. De esta forma, se puede concluir que la implementación de este modelo es viable desde el punto de vista económico.

## 7.5. RESUMEN

En este capítulo se han indicado las condiciones generales necesarias para implementar el modelo, tanto en el ámbito interno, que es aquel controlable por la empresa, como en el ámbito externo, referido básicamente a factores de carácter ajeno a la voluntad y dominio de la empresa.

Los principales puntos a considerar en el ámbito interno son el control de costos, la capacitación y la aplicación de la política recomendada. En el caso del ámbito externo, se indica la necesidad de tener en cuenta la variabilidad de las condiciones iniciales así como la variabilidad del mercado.

Se concluye estableciendo un análisis de costo beneficio, cuyo balance es positivo en cuanto a la viabilidad económica de implementar el modelo.

## CONCLUSIONES

### VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS FORMULADA

A la luz del estudio realizado, ha sido posible responder sobre la mayor o menor medida en que influyen las variables consideradas para la solución del problema abordado, determinándose que las variables más relevantes son: edad mínima de reemplazo, reducción de edad por realización de Overhaul, y vida útil de depreciación, tal como puede encontrarse en el capítulo 6 y el anexo B.

Se pudo comprobar también que otras variables que influyen en la determinación de la política óptima de decisiones son: la tasa de interés mensual, el ratio costo fijo / costo total, y la disponibilidad, además de las variables: costos de operación y mantenimiento, costos de inversión, y edad de la maquinaria. Entonces, y conforme a lo expuesto, es que se puede respaldar la hipótesis planteada.

### CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO

El estudio desarrollado, ha permitido incrementar los fundamentos teóricos conocidos respecto al reemplazo de maquinaria utilizada en obras de tunelería, considerando el estado del arte actual, conforme se expone en los capítulos 2, 3 y 4.

El estudio contribuye también a la diversificación de las metodologías para encontrar solución a problemas de la naturaleza abordada, simplificando su análisis a través de la cuantificación e inclusión de variables específicas, tal como se explica en el capítulo 5, y como se aprecia en el archivo ejecutable del modelo.

Se ha demostrado en este estudio la existencia del momento óptimo de reemplazo. En el análisis de un determinado horizonte de planificación, es

posible encontrar uno o varios momentos óptimos, dada la naturaleza secuencial de las decisiones.

Finalmente, el estudio constituye una alternativa de mejora para la empresa, en cuanto al proceso de toma de decisiones referentes al reemplazo de maquinaria, lo que deriva en el mejoramiento de la productividad y en la disminución de los costos operativos.

## APLICACIÓN DEL MODELO

La macro del archivo ejecutable del modelo, realiza el análisis de la información ingresada en un tiempo menor de 2 minutos en promedio, para un ancho de rango de 4 horas, y empleando un procesador de 3.00 GHz. Se ha comprobado, que se debe utilizar este ancho de rango o alguno menor para obtener la política correctamente catalogada como óptima.

Respecto a las decisiones calculadas por el modelo para alcanzar la política óptima, para su análisis es más relevante revisar las edades a las que se sugieren los reemplazos u Overhauls, que la etapa (mes) en que se presenten. De acuerdo a los resultados presentados en el capítulo 6, estos constituyen una muestra de la fidelidad del algoritmo para la resolución del problema estudiado, pues la sugerencia de un Overhaul Parcial en medio de cuatro reemplazos, es prueba de ello.

No es parte de los objetivos de la Tesis, ser concluyentes respecto a una recomendación de políticas de decisiones para los Jumbos y Scooptrams en general, pues como se ha visto en el desarrollo de la exposición de la Tesis, cada maquinaria constituye un universo de análisis distinto, configurado por los diversos parámetros incluidos en el modelo.

## RECOMENDACIONES

Utilizando como referencia la presente Tesis, en estudios posteriores sería muy oportuno considerar la variabilidad del mercado y su impacto en el valor residual y el valor de adquisición de la maquinaria, así como ciertos factores de incertidumbre o variabilidad en los parámetros del modelo.

Del mismo modo, podría investigarse no sólo el reemplazo de las maquinarias por otras nuevas del mismo tipo, sino también por maquinarias alternativas, que cumplan la misma o más funciones dentro del ciclo productivo.

Finalmente, utilizando un mayor espacio temporal, y con la gestión adecuada, sería muy recomendable proveerse de un amplio seguimiento a la realización de Overhauls y a sus efectos, para simular su comportamiento de una manera más cercana a la realidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- **Baldeón, D.** *Optimización de perforación frontal en desarrollo de túneles y galerías* [en línea]. Atlas Copco. XV Simposium de Ingeniería en Minas – SIMIN 2007. Chile, agosto 2007. <[http://www.simin.cl/PDF-Jueves-23-08/Optimizacion\\_de\\_Perforacion\\_Frontal\\_en\\_desarrollo\\_de\\_tuneles\\_y\\_galerias.pdf](http://www.simin.cl/PDF-Jueves-23-08/Optimizacion_de_Perforacion_Frontal_en_desarrollo_de_tuneles_y_galerias.pdf)>
- **Bosch, M.; Varas, S.** Reemplazo de Equipos en un Sistema Productivo Complejo [en línea]. *Revista Ingeniería de Sistemas*, XV (2001): 93-115. <[http://www.dii.uchile.cl/ris/articulos/art\\_reemplaz.pdf](http://www.dii.uchile.cl/ris/articulos/art_reemplaz.pdf)>
- **Bravo, S; Cueto, D.** *La vida útil de un activo y política de reemplazo de activos* [en línea]. ESAN, cuadernos de difusión. [200?]: 133-148. <<http://www.esan.edu.pe/paginas/PDF/Vida.pdf>>
- **Cámara Chilena de la Construcción (Santiago).** Las Depreciaciones del Activo Fijo, Escudo Tributario [en línea]. *Cartilla Tributaria*, 1 (2007). <<http://www.cchc.cl/kwldg/databank/19710.pdf>>
- **Cantillo, V.** Reemplazo económico de los equipos [en línea]. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, 3-4 (1998): 58-63. <[http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria\\_desarrollo/3\\_4/reemplazo\\_economico\\_de\\_los\\_equipos.pdf](http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/3_4/reemplazo_economico_de_los_equipos.pdf)>
- **Chile. Ministerio de Planificación y Cooperación, División de Planificación, Estudios e Inversiones.** *Metodología Proyectos de Reemplazo de Equipos* [en línea]. 1a edición electrónica, 2006. <<http://bip.mideplan.cl/bip-consultas/SEBI/SE2005/metodologias/MetodologiaReemplazoEquipos.doc>>
- **De Las Casas, L.** Reemplazo de Bienes Captales [en línea]. *Revista Desde Adentro*, 25 (2005): 34-36. <<http://www.snmpe.org.pe/wlInformacion/revistas/revista2005/pdf/25/panorama.pdf>>

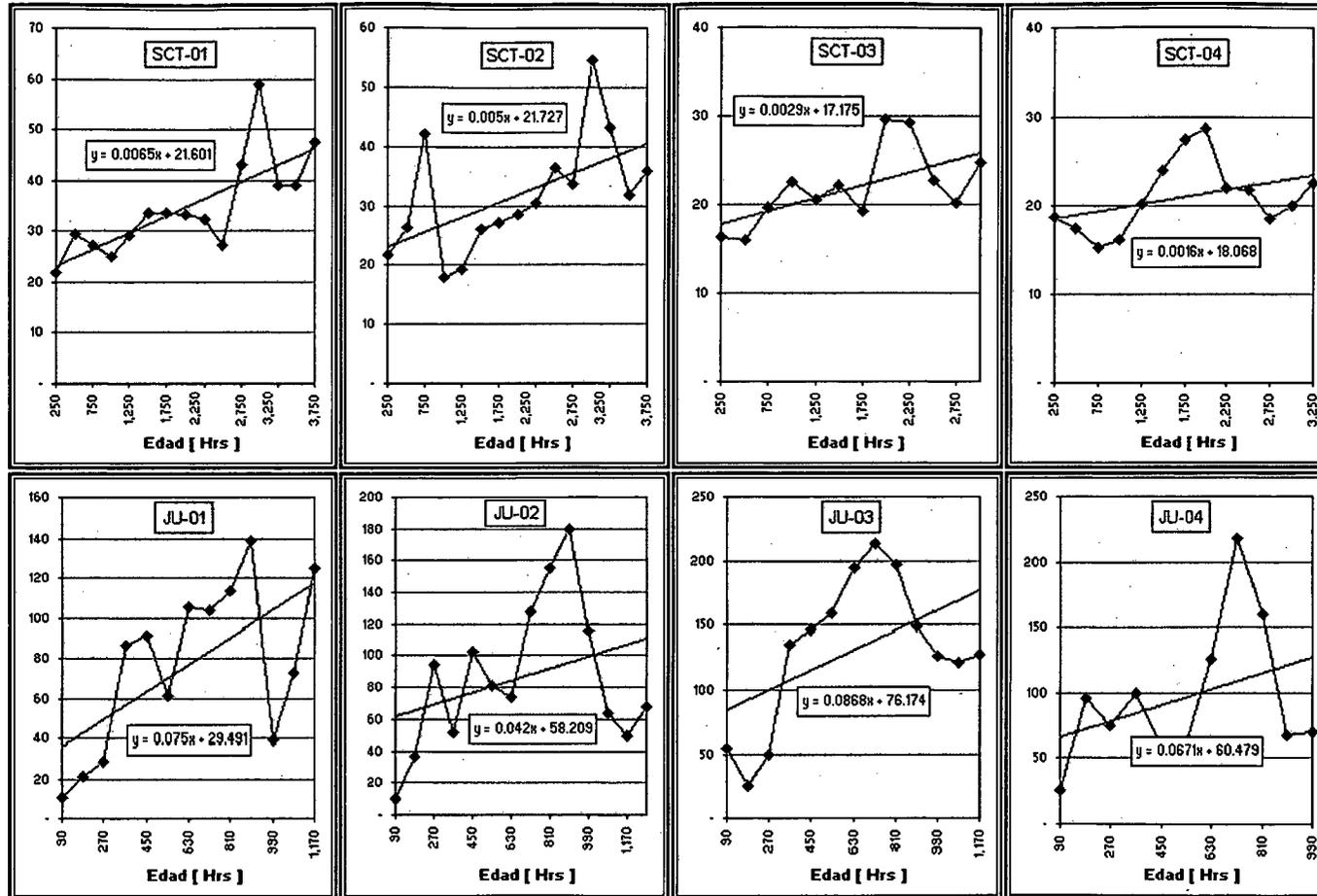
- **Espinosa, F.** *Modelo para el estudio del reemplazo de un equipo productivo* [en línea]. Material de estudio y consulta. Universidad de Talca, [200-], 11 p. <<http://ing.otalca.cl/~fespinos/4-MODELO%20PARA%20EL%20ESTUDIO%20DEL%20REEMPLAZO%20DE%20UN%20EQUIPO.pdf>>
- **Espinoza, J.** Reemplazo de equipos, un enfoque de mantenimiento [en línea]. *Revista Mantenimiento*, 1 (1990). <<http://www.aciem.org/bancoconocimiento/R/Reemplazodeequipos/Remplazodeequipos.asp>>
- **Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Universidad de Chile).** *IN34A-2 Optimización* [en línea]. 2006, 35 p. <[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2006/2/IN34A/2/material\\_docente/objeto/115095](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2006/2/IN34A/2/material_docente/objeto/115095)>
- **Gobierno Vasco. Departamento de Transportes y Obras Públicas.** *Manual de Criterios Técnicos relacionados con el Proyecto, Construcción y Explotación de los Túneles de Carretera* [en línea]. [s.l.], [1995?], p. 80-101. <[http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06\\_met.pdf](http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06_met.pdf)>
- **Goig, M.** *Programación Dinámica* [en línea]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, [2006], 9 p. <<http://www.andrew.cmu.edu/user/mgoic/files/documents/optimization/pdinamica.pdf>>
- **Jaafari, A.; Mateffy, V.K.** Realistic Model for Equipment Replacement. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116 (1990): 514-532.
- **Mora, W.; Espinoza, J.** *Programación Visual Basic (VBA) para Excel y Análisis Numérico* [en línea]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2005, 76 p. <<http://www.cidse.itcr.ac.cr/cursos-linea/NUMERICO/Excel/VBAExcel-MNumericos.pdf>>
- **Palenque, J.** Depreciación & Revalorización. En: *Contabilidad y Decisiones* [en línea]. Cap. 5 <[http://lpz.ucb.edu.bo/publicaciones/libros/contabilidad\\_decisiones/pdf/contdec\\_ap2.pdf](http://lpz.ucb.edu.bo/publicaciones/libros/contabilidad_decisiones/pdf/contdec_ap2.pdf)>
- **Peurifoy, R.** *Métodos, planeamiento y equipos de construcción*. 3a ed. México: Editorial Diana, 1965, 597 p.
- **Proinversión.** *Procedimiento para aplicar metodologías de valuación de activos, empresas y proyectos* [en línea]. Lima, 13 de febrero del 2004.

<[http://www.proinversion.gob.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/CONSULTORIA\\_ABASTECIMIENTO\\_AGUA\\_HUACHIPA/P-04-2004-DE.pdf](http://www.proinversion.gob.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/CONSULTORIA_ABASTECIMIENTO_AGUA_HUACHIPA/P-04-2004-DE.pdf)>

- **Puell, F.** *Capítulo I: Definición, historia y normativa de túneles* [en línea]. Febrero 2008. <[http://www.equipodeprospecciones.com/descargas/modulo\\_excavaciones\\_subterranas/temal\\_historia\\_v\\_2.pdf](http://www.equipodeprospecciones.com/descargas/modulo_excavaciones_subterranas/temal_historia_v_2.pdf)>
- **Ramos, J.** *El equipo y sus costos de operación*. 3a Ed. Lima: Fondo Editorial CAPECO, 2007, 58 p.
- **Real Academia Española.** *Diccionario de la Lengua Española* - Vigésima segunda edición [en línea]. <[http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=túnel](http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=túnel)>
- **Sandoval, J.** *Grandes Pasadizos* [en línea]. Revista D - Semanario de Prensa Libre, 25 de junio 2006, No 103. <<http://www.prensalibre.com/pl/domingo/archivo/revistad/2006/junio06/250606/mundo.shtml>>
- **Taha, H.** *Investigación de Operaciones: Una introducción*. 6a edición, México: Prentice Hall, 1998, 916 p.
- **Viveros, A.; González, G.; Rodríguez, R.** *Aproximación al reemplazo de equipo industrial* [en línea]. Scientia et Technica, 25 (2004): 163-168. <<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/165520163-168.pdf>>

## ANEXOS

**ANEXO A. Curvas ajustadas de costos operacionales (US\$/Hr) para Scooptrams y Jumbos**



## ANEXO B. Cuadros generales de resultados del Análisis de Sensibilidad

Variable / Parámetro (V/P)	Incremento de 1%		Decremento de 1%		Tendencia de incrementos		Tendencia de decrementos	
	Variación del resultado	Orden de relevancia	Variación del resultado	Orden de relevancia	Variación del resultado	Orden de relevancia	Variación del resultado	Orden de relevancia
Costo de oportunidad (mensual)	-0.7850%	4	0.7959%	3	-0.2506%	5	1.1461%	1
Vida útil (para depreciación)	4.6639%	1	-3.3534%	1	3.5255%	1	-0.4001%	5
Edad mínima para reemplazo	-1.4419%	2	0.8779%	2	-0.0317%	8	0.5951%	3
Edad máxima de conservación	0.0000%	7	0.0000%	7	0.0000%	10	0.0000%	7
Edad mínima para Overhaul	0.0000%	7	0.0000%	7	-0.0107%	9	0.3892%	6
Reducción edad por OH Completo	0.0000%	7	0.0000%	7	2.9436%	3	0.0000%	7
Reducción edad por OH Parcial	1.2742%	3	-0.3994%	5	3.2694%	2	0.0000%	7
Costo Fijo / Costo Total	-0.3634%	5	0.3634%	6	-0.3407%	4	0.6622%	2
Disponibilidad exigida	0.1752%	6	-0.7485%	4	0.1874%	6	-0.5360%	4
Tasa disminución de disponibilidad	0.1752%	6	-0.7485%	4	0.1788%	7	-0.5360%	4

Variable / Parámetro (V/P)	Inalterabilidad de N* y tipo de eventos <sup>(*)</sup>		Inalterabilidad de la Política de Decisiones	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Costo de oportunidad (mensual)	-50%	10%	-7%	10%
Vida útil (para depreciación)	0%	1%	0%	1%
Edad mínima para reemplazo	-4%	0%	0%	0%
Edad máxima de conservación	-50%	50%	-50%	50%
Edad mínima para Overhaul	-5%	10%	-3%	10%
Reducción edad por OH Completo	-50%	1%	-50%	1%
Reducción edad por OH Parcial	0%	0%	0%	0%
Costo Fijo / Costo Total	-6%	10%	-6%	10%
Disponibilidad exigida	0%	6%	0%	6%
Tasa disminución de disponibilidad	0%	6%	0%	6%

(\*) Entiéndase por evento: Reemplazo, Overhaul Completo o Parcial.