



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELO DE GESTIÓN PARA CONTRATOS DE MANTENIMIENTO
DE ACTIVOS FIJOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PABLO EDUARDO ROJO LATAPIAT

PROFESORES GUÍAS:

PABLO REY SOSA (ING. INDUSTRIAL)

RODRIGO PASCUAL JIMÉNEZ (ING. MECÁNICA)

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:

GERARDO DÍAZ RODENAS

SANTIAGO DE CHILE

JULIO 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL E
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: PABLO EDUARDO ROJO LATAPIAT
FECHA: 20/08/2007
PROF. GUÍAS: PABLO REY SOSA
RODRIGO PASCUAL JIMÉNEZ

“MODELO DE GESTIÓN PARA CONTRATOS DE MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FIJOS”

Muchas empresas poseen numerosos equipos mecánicos que son ocupados en sus procesos productivos, donde el mantenimiento de ellos es realizado por equipos de técnicos propios llevando también los costos y la derivación de las capacidades y habilidades. Otras firmas, consideran la estrategia de externalizar ciertos procesos, relacionados o no, con el negocio que está abocada la empresa, delegando a terceras entidades la realización de estas. La externalización es normada por medio de contratos que clarifican deberes y obligaciones de las partes. En Chile la externalización u outsourcing en mantenimiento de activos fijos es una de las actividades estratégicas más recurridas, además de ser una de las mejor evaluadas (Menendez [11]).

Las fallas de los equipos son hechos aleatorios por lo que no pueden ser previstos y que afectan la producción de la empresa. Estas son modeladas probabilísticamente en relación a la política de mantenimiento, aquí mantenimiento perfecto. El tiempo en que los equipos están no operativos siendo intervenidos también afectan la producción. Desde la perspectiva del proveedor del servicio juegan a favor la cantidad de intervenciones correctivas y preventivas que realice, marginalizando por cada una de ellas, juega en contra, por concepto de multa, el tiempo excesivo en que los equipos no son devueltos operativos al cliente. Estas constituyen los beneficios para el cliente y desutilidad para el proveedor.

En esta memoria se determinarán los precios que caracterizan a los contratos, tanto de la intervención preventiva como de la correctiva. Esto se logrará mediante la teoría de juegos como un problema principal-agente, donde el principal es el cliente, con alto poder de negociación y el proveedor será el agente con escaso poder en relación a una estrategia, sea esta: mantenimiento correctivo, preventivo (intervención por edad y por bloque de tiempo).

*A MIS PADRES, SERES QUERIDOS
Y A LOS AUSENTES...*

AGRADECIMIENTOS

Han pasado varios años y muchas horas, muchas intenciones se volvieron realidad, otras quedaron pendientes y otras; sencillamente no se realizaron. Mi mundo y yo hemos cambiado tanto desde el primer día en la universidad hasta este último. Mucho queda para pensar y reflexionar en silencio.

Esta memoria no es un fruto que germinó solo por el trabajo del suscriptor, sino que gracias a muchas personas que de alguna forma se involucraron en este proceso que aquí finaliza. A todas ellas mi más sincera gratitud y eterna deuda.

Agradezco a tan distinguido cuerpo docente que me guió, me aconsejó, advirtió mis errores y con gran gentileza los corrigieron. Sin duda, ayudaron a gestar un camino más recto y transitable del que pudiera haber construido por mí mismo.

A mi padre y amigo, por la inapreciable ayuda en lo técnico y en lo humano, por su infinita disposición para atender mis dudas; su colaboración fue invaluable.

A mi madre, por su apoyo en este largo proceso; por su preocupación, por su dedicación y abnegación, por proporcionarme el medio apropiado para llegar a este punto.

A quien confió en mí teniéndome en la más alta consideración. Lamentando su ausencia, gracias Proserpina.

Al personal del aeródromo de La Florida por dedicarme su tiempo y resolver mis inquietudes y dudas.

Finalmente, todos quienes en forma directa o indirecta ayudaron a la constitución de esta memoria.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Alcances	3
1.2.1. Formulación de Stackelberg	4
1.2.2. Dos modelos	4
1.3. Metodología	4
2. Planteamiento del problema	7
3. Marco conceptual	11
4. Antecedentes generales	13
4.1. Introducción	13
4.2. Mantenimiento, una perspectiva general	13
4.3. Outsourcing	15
4.3.1. Ventajas del outsourcing	15
4.3.2. Desventajas del outsourcing	17

4.4.	Contratos	21
4.4.1.	Teoría de contratos	22
4.5.	Posición frente al riesgo	24
4.6.	Beneficios	25
4.6.1.	Ingresos	25
4.6.2.	Multa	26
4.6.3.	Costos	26
4.6.4.	Beneficio para la DGAC	27
4.6.5.	Beneficio para la proveedor	27
4.7.	Multas	27
4.8.	Multa existente	28
4.9.	Multa propuesta	28
5.	Estrategias de mantenimiento	30
5.1.	Introducción	30
5.2.	Modelos de mantenimiento correctivo	30
5.3.	Modelos de mantenimiento preventivo	31
5.3.1.	Política de reemplazo periódico	32
5.3.2.	Política de intervención en bloques de tiempo (block replacement)	32
5.3.3.	Política de intervención por edad (age replacement)	33
6.	Proceso de conteo de fallas	35
6.1.	Introducción	35
6.2.	Tipo de reparación	35
6.2.1.	Mantenimiento perfecto	35

6.2.2.	Reparación mínima	36
6.2.3.	Reparación imperfecta	36
6.3.	Procesos de conteo	37
6.4.	Conclusiones	38
7.	Estrategias de mantenimiento preventivo	39
7.1.	Distribución de $N(t)$	40
7.2.	Intervención por bloque de tiempo (block replacement)	41
7.2.1.	Introducción	41
7.2.2.	Deducción del modelo	42
7.2.3.	Proceso de conteo n_c	42
7.2.4.	Determinación de multa tipo 1	43
7.2.5.	Determinación de multa tipo 2	44
7.2.6.	Expresión analítica de los beneficios	44
7.2.7.	Conclusiones	45
7.3.	Intervención por edad (age replacement)	46
7.3.1.	Introducción	46
7.3.2.	Deducción del modelo	46
7.3.3.	Determinación del valor esperado de falla	46
7.3.4.	Proceso de conteo de n_p	47
7.3.5.	Ocurrencia esperada de multa 1	47
7.3.6.	Ocurrencia esperada de multa 2	48
7.3.7.	Beneficios para los agentes	49
7.3.8.	Conclusiones	50

8. Estudio de caso	51
8.1. Situación actual	52
8.2. Etapas de externalización	53
8.3. Estimación de los parámetros de la distribución de Weibull	57
8.3.1. Test de Kolmogorov-Smirnov	60
8.4. El VOR-DME	60
8.5. Ingresos	61
8.6. Costos	62
8.7. Beneficios residuales	62
8.8. Variables de decisión	62
8.9. Desarrollo de caso (intervención por bloque)	63
8.9.1. Introducción	63
8.9.2. Expresión analítica de los beneficios	63
8.10. Resultados numéricos	66
8.10.1. Beneficio para el principal	66
8.10.2. Beneficio para el agente	68
8.11. Solución problema principal-agente	70
8.11.1. Discriminación perfecta	71
8.11.2. DAGC competitiva	71
8.11.3. Máximo presupuesto	72
8.12. Análisis de sensibilidad	73
8.12.1. Duración del contrato l	73
8.12.2. Variación de T_s	76
8.13. Conclusiones	79

8.14. Desarrollo de caso (intervención por edad)	80
8.14.1. Proceso de conteo de n_p	81
8.14.2. Proceso de conteo de n_c	81
8.14.3. Determinación de multa 1	82
8.14.4. Determinación de multa 2	82
8.14.5. Beneficios para los agentes	83
8.15. Desarrollo numérico del caso	84
8.16. Beneficio para las partes	85
8.16.1. Beneficio para la DGAC	85
8.16.2. Beneficio para el proveedor	87
8.17. Solución problema principal-agente	90
8.17.1. Discriminación perfecta	90
8.17.2. DGAC competitiva	91
8.17.3. Situación de máximo presupuesto	91
8.18. Análisis de sensibilidad	92
8.18.1. Duración del contrato l	92
8.18.2. Variación de T_p	95
8.19. Conclusión	99
9. Extensiones de los modelos	102
9.1. Adversidad frente al riesgo	102
9.2. Múltiples equipos	103
9.3. Solución bajo un juego de Nash	105
9.4. Cartera de contratos	106

Índice de figuras

4.1. Posibles políticas bajo las cuales una firma puede desarrollar sus procesos de mantenimiento.	14
4.2. Multa “1 por 1000” que aplica actualmente la DGAC. En el gráfico el factor de multa es unitario ($\alpha = 1$) y el tiempo característico es $\tau + \theta = 0,5$	28
4.3. Sistemas de multas propuesta, que es la adición de un factor constante y la multa “1 por 1000”. La multa propuesta tiene un factor de multa $\delta = 2$ y su tiempo característico es $\tau = 0,3$	29
6.1. La figura muestra la relación entre el tipo de mantenimiento y el proceso de conteo que lo modela.	37
7.1. La figura muestra la aproximada relación entre las ocurrencias de fallas y el tiempo bajo mantenimiento perfecto. La curva representa a una distribución de Weibull de parámetros $\beta = 3$, $\eta = 1$ y $\gamma = 0$	41
8.1. Recta que ajusta los valores de la tabla (8.1).	58
8.2. Función de intensidad $\lambda(t)$ del VOR-DME.	59
8.3. (a) Función de distribución de probabilidades del tiempo entre fallas; (b) Probabilidad de falla y confiabilidad del equipo dado los parámetros obtenidos.	59
8.4. Función de densidad de probabilidad de las intervenciones correctivas obtenida desde la teoría de renovación.	65

8.5. Función de densidad acumulada de las intervenciones correctivas en un intervalo de largo T_s	65
8.6. Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.	67
8.7. (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual la DAGC es una empresa competitiva.	68
8.8. Función de beneficios esperados para el proveedor en función de los precios.	69
8.9. En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0	69
8.10. La figura muestra la frontera en la cual el proveedor es una firma competitiva.	70
8.11. Variación de los beneficios del cliente y sus beneficios residuales. Es notorio el incremento de los beneficios respecto a l	74
8.12. Variación de los beneficios del proveedor respecto a los escenarios de DGAC competitivo y máximo presupuesto en relación a la variación de l	75
8.13. Variación de los beneficios del cliente en la medida que varía el periodo entre intervenciones preventivas.	77
8.14. La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor en relación con la variación de T_s : (a) resolución del problema principal-agente bajo DGAC competitiva, (b) resolución bajo máximo presupuesto.	78
8.15. Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.	86
8.16. (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual la DAGC es una empresa competitiva.	87
8.17. Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.	88
8.18. (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual el proveedor es una firma competitiva.	89

8.19. La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para la DAGC.	93
8.20. La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor bajo los escenarios de DGAC competitiva y máximo presupuesto.	94
8.21. La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para la DGAC con discriminación perfecta.	96
8.22. La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor en relación con la variación de T_p : (a) resolución del problema principal-agente bajo DGAC competitiva, (b) resolución bajo máximo presupuesto.	98
10.1. Variación de los beneficios esperados para la DGAC en relación a: (i) mantenimiento preventivo con intervención por edad, (ii) mantenimiento preventivo con intervención por bloque y (iii) mantenimiento correctivo.	111
10.2. Curva de beneficios esperados para el cliente en función de la duración del contrato bajo intervenciones por edad, por bloque y mantenimiento in-house.	112

Notación

Símbolo	Descripción	Unidad
A_0	Rechazo de contratos	
A_1	Contrato 1	
c_c	Costo unitario de mantenimiento correctivo	UM
c_p	Costo preventivo de mantenimiento preventivo	UM
f	fdp de falla de un equipo	
F	fpa de falla de un equipo	
G	fpa de retorno del equipo	
g	fdp de tiempo de reparación del equipo	
H	Función de Heaviside	
l	Duración del contrato	T
M	Cantidad de equipos que posee una empresa	
m	Cantidad de fallas en el intervalo $[\tau, +\infty)$	
N	Cantidad de mantenciones correctivas	
n_c	Número de fallas	
n_s	Número de máximos de intervenciones preventivas	
\tilde{n}	Número de fallas en el intervalo $[\tau + \theta, +\infty)$	
p_c	Precio unitario de mantenimiento correctivo bajo contrato A_1	UM
p_p	Precio unitario de mantenimiento preventivo bajo contrato A_1	UM
P_k	Probabilidad condicional de k equipos defectuosos en cola	
\hat{P}_k	Probabilidad de k equipos defectuosos en cola	
R	fpa de confiabilidad	
T_s	Tiempo entre mantenciones preventivas	T
t	Tiempo calendario	T
y_k	Tiempo de espera de la k -ésima mantención	T
x_k^i	Instante en que comienza la k -ésima mantención	T
x_k^f	Instante en que finaliza la k -ésima mantención	T
\mathbb{E}	Función esperanza	
u	Utilidad	
U_0	Beneficios residual	

Símbolo	Descripción	Unidad
A^*	Contrato óptimo	
\bar{T}	Esperanza de f	T
σ	Variación estándar	T
μ	Tasa de reposición	
λ	Función de intensidad	
B_1	Región de aceptación	
B_0	Region de rechazo	
I_j	Estructura de ingresos del actor j	UM
J_j	Estructura de costos del actor j	UM
M_j	Estructura de multa del actor j	UM
π_j	Beneficios del actor j	UM
δ	Factor de multa de la multa tipo 1	UM
α	Factor de multa de la multa tipo 2	UM/T
τ	Tiempo característico de multa tipo 1	T
θ	Tiempo característico de multa tipo 2	T
Φ	Distribución normal estándar	
β	Parámetro de forma	
η	Parámetro de escala	
ω	Ingresos	UM/T
r	Parámetro de Arrow-Pratt	
T_s^*	T_s óptimo tal que maximiza los beneficios	T
DGAC	Dirección General de Aeronáutica Civil	
VOR	Very omni range	
SEI	Servicio extinción de incendios	
DAP	Dirección de aeropuestos	
OEM	Original equipment manufacturer	
MTTR	Tiempo medio de reparación	
MTBF	Tiempo medio entre fallas	
FFAA	Fuerza Aérea	
BR	Block replacement	
AR	Age replacement	

Capítulo 1

Introducción

Los procesos involucrados en el quehacer de la empresa son muy numerosos, y no todos están relacionados a los procesos productivos de la firma. En efecto, existen muchas actividades que se realizan día a día que son necesarias para su buen funcionamiento. Técnicamente la empresa no tiene por qué realizar todas estas tareas.

Antes de la década del 60 las empresas optaban por la estrategia de realizar la gran mayoría de las tareas productivas o no, incluso en la actualidad siguen considerando esta alternativa como estrategia llamada lock-in. Hace unas décadas atrás, las empresas comenzaron a entregar a terceros la tutela sobre tareas que antiguamente realizaban ellas mediadas por contratos dependiendo de los intereses de las partes, a este proceso se le conoce como outsourcing. En estos Contratos se representan las estructuras de ingresos, de costos y de multa, las que finalmente se traducirán en los beneficios de para las partes.

Hitt [7] define al outsourcing como el proceso por el cual una empresa compra, a otra externa, una actividad que entrega valor.

Las empresas contratantes enfrentan una serie de ventajas por la implementación de la estrategia del outsourcing en sus procesos, pero también puede conllevar una serie de debilidades. Teóricamente, una empresa puede externalizar cualquier proceso existiendo la tendencia hacia la constitución de la empresa virtual¹.

Respecto al outsourcing en mantenimiento, los beneficios del contrato para las partes son

¹Aquella empresa que externaliza todos sus procesos

fuertemente dependientes de la política de mantenimiento sobre un conjunto de activos fijos productivos. La política de mantenimiento afecta la vida del equipo y finalmente la disponibilidad que tenga el cliente del uso del activo.

El modelo que se trata en esta memoria, considera al demandante del servicio como un agente con alto poder de negociación, como es el caso de una empresa de importantes dimensiones y escasa en el mercado, frente a los proveedores que se consideran de escaso poder de negociación y abundantes.

En ciertas circunstancias, las empresas cuando evalúan un proyecto no solo observan que los ingresos sean mayores a los egresos sino a las repercusiones que conlleva desde la perspectiva estratégica. Por lo que los resultados no solo deben ser mirados de las perspectivas del análisis técnico-económico sino también de la estratégica, de cómo beneficia a la firma realizar la externalización.

La política de mantenimiento que se evaluará es mantenimiento preventivo con intervenciones perfectas enmarcándose dentro de la teoría de renovación bajo dos subpolíticas:

- Intervención por bloque (block replacement) que establece ex-ante las fechas y la cantidad de intervenciones preventivas.
- Intervención por edad (age replacement) que define una intervención preventiva a T_p unidades de tiempo desde la última intervención, sea preventiva o correctiva.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Representar y resolver un modelo de contratos de mantención bajo una determinada política de mantenimiento y aplicarlo a un caso real.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la función de distribución que describe el tiempo entre fallas del equipo, respecto al caso real y al activo de interés.
- Representar analíticamente la expresión que describe el proceso de conteo de las intervenciones correctivas.
- Representar analíticamente la expresión que describe el proceso de conteo de las intervenciones preventivas (aplicable en el caso de intervención por edad o age replacement).
- Determinar la cantidad esperada y el valor de las multas durante la vigencia del contrato.
- Resolución del problema principal-agente obteniendo los precios que caracterizan el contrato y los beneficios esperados.
- Jerarquizar desde la perspectiva del análisis económico los resultados de las distintas políticas de mantenimiento.

1.2. Alcances

Esta memoria considera el caso donde un cliente evalúa la posibilidad de externalizar el proceso de mantenimiento sobre un determinado activo fijo o seguir realizándolo el mismo, frente a un proveedor quien ofrece realizar el servicio mediado por un contrato, por lo que los actores económicos de este proceso de negociación escogerán – en forma independiente – entre realizar o no el proyecto.

Se considera un desarrollo matemático para determinar las elecciones de las partes, basado en la literatura de servicio de mantenimiento, teoría de juegos, teoría de contratos y gestión de operaciones. Esto permitirá determinar la estrategia óptima desde la perspectiva económica. Se menciona que el análisis estratégico podría condicionar la elección de la estrategia óptima.

Se toma como estudio de caso a la institución DGAC² como demandante del servicio.

²Dirección General de Aeronáutica Civil.

1.2.1. Formulación de Stackelberg

Se usa un juego de Stackelberg donde la firma demandante (DGAC) es el *principal* o *líder* y el proveedor del servicio el *agente* o *seguidor*, que se formulará como un problema de optimización con restricciones donde las variables de decisión son los precios que caracterizan el contrato. El líder del juego decide cual es la estrategia a considerar, lo que traerá distintas formulaciones al problema principal-agente. Se considera este tipo de juego dada la concentración del poder de negociación por parte de la DGAC.

Existen otras formas de resolución como es el caso de un juego de Nash el cual distribuyen en partes equitativas los excedentes del proyecto; este juego no se concidera en esta memoria pues el juego de Stackelberg reporta beneficios esperados mayores para el principal.

1.2.2. Dos modelos

Ante la política de mantenimiento – mantención perfecta – se evalúan dos distintos modelos como suerte de subpolítica; a saber, intervención en bloque de tiempo (block replacement) y Intervención por edad (age replacement).

Se considerara el resultado del problema principal-agente para cada uno de los siguientes modelos.

Todo el desarrollo de la memoria está fundado en numerosas simplificaciones por lo que se podrán tener en cuenta muchas extensiones. No pretende ser otra cosa, que el punto de partida a la construcción de modelos más complejos que recojan casos más reales.

1.3. Metodología

El desarrollo de esta memoria se basa en tres áreas teóricas relacionadas con la ingeniería: la teoría de contratos, gestión de mantenimiento e investigación de operaciones, las que se aplican a un caso real tomado de la aeronáutica chilena.

Como criterio de evaluación se tendrá la función de beneficios de los agentes económicos que corresponde a la diferencia entre todos los ingresos y todos los egresos. Para tal efecto, se considera

que tanto el cliente como el proveedor del servicio son agentes neutros al riesgo.

Los beneficios del proyecto son el resultado de un conjunto de escenarios entre los cuales se cuenta: la política y subpolítica de mantenimiento, el comportamiento de las fallas del equipo, el tipo de juego a que se enfrenta tanto el principal como el agente, a la aplicación de las multas, y finalmente, a la resolución del problema principal-agente que recoge, junto a los beneficios de la mantención in-house (beneficios residuales) y evalúa, por cual de las alternativas escoger: aceptar el contrato (elección A_1) o no (elección A_0). Lo anterior se resume como un problema de optimización lineal en virtud de la consideración de agentes económicos neutros al riesgo.

La política de mantenimiento es mantención preventiva y la calidad de las intervenciones, tanto preventivas y correctivas, son perfectas. Se evaluarán dos subpolíticas de mantenimiento, a saber, block replacement y age replacement. Es de esperar que tanto la política como la subpolítica de mantenimiento afecten la vida del equipo y esto, la ocurrencia de fallas y los beneficios del proyecto.

Dado que la subpolítica de intervención por bloque (block replacement), las mantenciones preventivas son conocidas en cantidad y fecha de aplicación ex-ante, solo es necesario conocer el proceso de conteo de las intervenciones correctivas mediante teoría de renovación. Cosa distinta ocurre con la subpolítica de age replacement, en la cual hay que determinar tanto el proceso de conteo de las intervenciones correctivas como preventivas, esto también mediante la teoría de renovación.

Las bases administrativas de un contrato pueden incluir multas; Asgharizadeh [1] incluye una multa que comienza a ser efectiva en un plazo fijado por el cliente y crece en un factor constante en la medida que pasa el tiempo. Esta multa recibe el nombre en el caso de la DGAC de "uno por mil", pues el factor constante corresponde al 0,1 % del valor total del proyecto. En esta memoria se aplica una segunda multa que se hace efectiva en un determinado tiempo fijado por las bases administrativas del contrato con un pago invariante en el tiempo. Cada multa depende de la ocurrencia de intervenciones como también de la efectividad que tenga el proveedor del servicio en entregar el equipo en estado operativo.

Para el buen fin de las etapas anteriores es necesario determinar la distribución de probabilidades del tiempo entre fallas. Esta se determina a partir del activo VOR-DME ubicada en la localidad de Tongoy dependiente del aeródromo de La Florida que a su vez depende de la DGAC de Chile. Esta distribución es recogida de la bitácora de mantenimiento del equipo en un tiempo determinado

y verificada su veracidad estadística mediante un test apropiado, aquí Kolmogorov-Smirnov.

Un importante componente de los beneficios son los ingresos, los que son encuestados al aeródromo de La Florida, y junto con los costos de realizar mantenimiento in-house se tienen los beneficios residuales.

Desde la perspectiva de la solución, Salanié [18] define el caso de la discriminación perfecta, donde bajo información perfecta el líder es capaz de configurar un contrato para un seguidor. Otras formas que caracterizan la solución del problema principal-agente entregadas por la DGAC son las siguientes:

- DGAC como firma competitiva: el principal impone que sus beneficios esperados son nulos.
- Máximo presupuesto: la DGAC coloca una cota máxima al presupuesto del proyecto.

Por lo tanto, los precios y los beneficios obtenidos estarán entre las tres situaciones anteriormente descritas.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

El problema consiste en modelar la relación contractual entre un agente económico del alto poder de negociación, llamado principal o líder según Salanié [18] y Fisher [6], que demanda el servicio de mantenimiento sobre equipos productivos a oferentes del servicio de escaso poder de negociación que ofrecen el servicio requerido. La importancia de realizar mantenimiento sobre los equipos productivos se justifica desde la perspectiva de la producción. El problema se centra en las estrategias de la empresa conocida como outsourcing, que se define en cuanto a sus obligaciones y derechos entre las partes por medio de un contrato. El outsourcing recibe otros nombres entre los cuales están: subcontratación, desintegración vertical y externalización. Como estrategia presta numerosas ventajas entre las que se destacan:

- Permite que la empresa se focalice en su negocio (*core business*) que es la actividad donde la entidad debe ser hábil.
- Permite flexibilizar los costos.
- Permite el acceso a tecnología de punta y el acceso a personal experto, ya que aprovecha el *core business* del proveedor.
- Transforma los costos fijos en variables, debido a que la empresa contratante no requiere responsabilizarse de los costos fijos derivados de los activos fijos necesarios para la tarea externalizada, en este caso mantenimiento.
- Distribuye y delega los riesgos del negocio.

Una empresa cualquiera cuyo *core business* está alejada de las prestaciones a terceros de mantenimiento como es el caso de la industria de la minería, salmonicultura, manufactura, por ejemplo, tienen la opción de no gastar tiempo, energía, habilidades ni recursos en maximizar los beneficios de la función mantenimiento. Mediante una externalización apropiada se puede redireccionar sus energías y recursos a lo que debe ser el centro de su preocupación que es el *core business*. Las empresas involucradas deben poseer ciertas habilidades como la suficiente flexibilidad para complementarse entre sí. Pueden además crear alianzas estratégicas. Como consecuencia, el desarrollo de la memoria es llevado a un caso existente en el mercado, donde existe un alto poder de negociación frente a otros de menor poder. Este es el caso de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de Chile, institución fiscal encargada de vigilar la normativa aeronáutica del Estado de Chile. La DGAC es una institución con un fuerte carácter técnico, la cual posee una gran cantidad activos fijos de la más variada naturaleza (infraestructural, mecánico, electrónico, eléctrico, etc.) donde se aplica el outsourcing de mantenimiento en parte de sus activos, mientras que, en otros no. Como tarea, esta memoria estudiará el caso particular de un equipo electrónico de radio ayuda, llamado VOR-DME, ubicado en la localidad de Tongoy y dependiente del aeródromo de La Florida en la ciudad de La Serena cuya mantención es realizada por un equipo de técnicos capacitados y de basta experiencia. El modo de falla del VOR-DME es la descalibración.

La relación entre las partes – DGAC y un proveedor – se realiza por medio de un contrato que es influenciado por el poder de negociación de los actores económicos participantes.

El principal, quién es el demandante del servicio de mantenimiento es capaz de realizar mantenimiento in-house. Considerando el equipo de elevada complejidad tecnológica, el principal recurre a los servicios del proveedor por intervenciones preventivas, programadas o no con anterioridad (según corresponda al modelo de intervención por bloque o edad), y correctivas de ocurrencia imprevista. El mantenimiento transado por el contrato es perfecto, esto quiere decir que después de cada intervención el equipo es dejado como nuevo.

Los seguidores o agentes poseen una cartera de contratos, donde un contrato se le denomina A_j con $j \in \{1, \dots, k\}$, siendo k la cantidad de contratos (aquí $k = 1$). Estos contratos especifican distintas obligaciones y derechos para las partes. Para el principal, desde la perspectiva del análisis económico, es rentable el negocio cuando los beneficios esperados del contrato en cuestión son mayores a un cierto beneficio residual U_0 , de no ser así se considera la no externalización del servicio (elección A_0), que corresponde a la decisión de no realizar el contrato, esto es: seguir con

el mantenimiento in-house; mientras que para el agente es rentable cuando es mayor a su beneficio residual igualado por simplicidad a cero.

Según Pascual [13] y Rousand [17] la ocurrencia de fallas puede ser modelado por un proceso estocástico, en particular como un proceso de conteo. El tiempo entre fallas puede ser representado por distintas distribuciones entre las que se encuentran: exponencial, Weibull, normal entre otras. La distribución será descrita en el capítulo (8) y el proceso estocástico será fijado a partir de datos reales mediante una curva de ajuste, evaluando la veracidad de esta mediante un test estadístico.

Como consecuencia, no se sabe a ciencia cierta cuándo serán las intervenciones correctivas (y eventualmente, las intervenciones preventivas, según la política de mantenimiento de intervención por edad). Siguiendo lo anterior, tampoco hay conocimiento de la magnitud de los retornos de modo que se opera con la esperanza de los beneficios.

Ya que los tiempos de reparación son aleatorios, los contratos consideran multas en beneficio del principal por los tiempos excesivos de retraso en que el proveedor demora en retorna el equipo operativo. Los tiempos de reposición también serán modelados estocásticamente.

Con la esperanza de los beneficios las partes pueden evaluar la viabilidad de concretar el proyecto mediante la resolución del problema principal-agente, que modela y determina los precios del contrato del proceso de negociación de la DGAC y el proveedor del servicio.

Considerando como líder o principal a la DGAC como un actor con alto poder de negociación respecto al proveedor del servicio de escaso poder, la solución del diseño del contrato será siguiendo una estrategia Stackelberg como lo muestra Cruz y Chen [5] donde la jugada del seguidor está en función de la jugada del líder.

Cruz y Chen lo define como sigue: Dado un juego de dos personas, donde el jugador $i \in \{1, 2\}$ desea minimizar su función de costos $J_i(u_1, u_2)$ escogiendo u_1 y u_2 de conjuntos de estrategias admisibles U_1 y U_2 . Un conjunto (u_1^*, u_2^*) es llamado una estrategia de Stackelberg con el jugador 2 como líder y jugador 1 como seguidor, si para cualquier u_1 en U_1 y u_2 en U_2 se cumple que

$$J_2(u_1^*, u_2^*) \leq J_2(u_1^0(u_2), u_2) \quad (2.1)$$

Donde

$$J_1(u_1^o(u_2), u_2) = \min_{\{u_1\}} J_1(u_1, u_2) \quad (2.2)$$

y

$$u_1^* = u_1^o(u_2^*) \quad (2.3)$$

Aquí el jugador 2 anuncia su objetivo primero y el objetivo del jugador 1 es minimizar sus costos. En esta memoria el problema es análogo con la salvedad que se quiere maximizar los beneficios esperados.

Otros problemas típicos de la teoría de contrato como el riesgo moral o la sección adversa que quedarán fuera del alcance de este trabajo.

En resumen, se determinará el contrato óptimo para el principal y el agente, para lo cual será necesario representar los contratos en forma analítica. Esta representación dejaría en claro los beneficios monetarios del contrato para las partes. El contrato posee elementos como por ejemplo: la cantidad de fallas que serán modeladas a través de un proceso estocástico, la ocurrencia de multas, el poder de negociación de las partes, entre otras. Se considera la función de beneficio como el margen entre ingresos y costos.

Capítulo 3

Marco conceptual

El problema se enmarca dentro de las posibilidades estratégicas del outsourcing de tareas, cuando a un agente económico le es posible o rentable realizarla. La subcontratación es una vía para alcanzar mayores utilidades o de focalizarse más en su negocio.

El problema de gestión de contratos es rico en desafíos ingenieriles y matemáticos, además de los propios de economía tales como la capacidad de negociación, cantidad de clientes o proveedores de servicio en el mercado entre otras.

La construcción analítica de los contratos no solo depende de lo que especifiquen estos, sino que también de las características de los equipos sobre el cual se realizará mantenimiento; por lo tanto, las cláusulas de los contratos como las características de los equipos se incluyen en un modelo matemático.

La resolución del problema se enmarca dentro de la organización industrial o microeconomía pero involucra otras disciplinas. Las fallas de un equipo no son un dato determinístico ni tampoco la cantidad de tiempo que los proveedores deben invertir en las intervenciones. Aún cuando se realice mantenimiento preventivo – paradas establecidas en fechas y en cantidad con anterioridad – existe una probabilidad no nula de que ocurran fallas, por lo que puede ser necesario realizar mantenimiento correctivo. Si se desea solo mantenimiento correctivo se interviene la máquina cuando falla, si se considera mantenimiento preventivo se efectúa una cierta cantidad de estas intervenciones incluyendo las correctivas sobre el equipo. Realizar intervenciones preventivas es conveniente pues típicamente son más económicas e implican una cantidad de tiempo detenido menor y

prolonga la vida del equipo. De la calidad del mantenimiento preventivo depende la factibilidad de fallas entre preventivas.

Los enunciados de las bases administrativas de los contratos también son objeto de intervención de probabilidades. En efecto, si las cláusulas enuncian multas por exceso de tiempo de intervención, se representan como unas variables aleatorias que están relacionadas con la cantidad de talleres que posea el proveedor, la tasa de reposición y la cantidad de equipos a los que hay que realizarle mantenimiento. Para ello hay que considerar teoría de cola.

Capítulo 4

Antecedentes generales

4.1. Introducción

A continuación se describen algunas generalidades que se considerarán en el desarrollo de la memoria relacionadas con el mantenimiento, ventajas del outsourcing, contratos, entre otros.

En el desarrollo del texto, algunas de estas serán tocadas con mayor profundidad.

4.2. Mantenimiento, una perspectiva general

Según Pascual [13] y Rojas [14] el mantenimiento por el proceso en el cual se logra que un equipo permanezca confiable y operativo. Es posible definir las siguientes políticas de mantenimiento.

- Mantenimiento preventivo. Corresponde a paradas de los equipos antes que estos fallen pretendiendo disminuir la ocurrencia de futuras fallas. Aplicable preferentemente equipos críticos.
- Mantenimiento proactivo. Cuando el equipo no está en producción; la intervención en este estado disminuye la ocurrencia de fallas.

- **Mantenimiento predictivo.** Llamado también basado en la condición, pretende pesquisar evidencias incipientes de fallas en el equipo.
- **Mantenimiento oportunista.** Aprovecha las paradas de mantención para realizar intervenciones preventivas sobre otros componentes del equipo.
- **Trabajos programados.** Corresponde a paradas de mayor envergadura y que son aprovechadas para realizar mantenciones.

Esquemáticamente las políticas de mantenimiento se representan en la siguiente figura

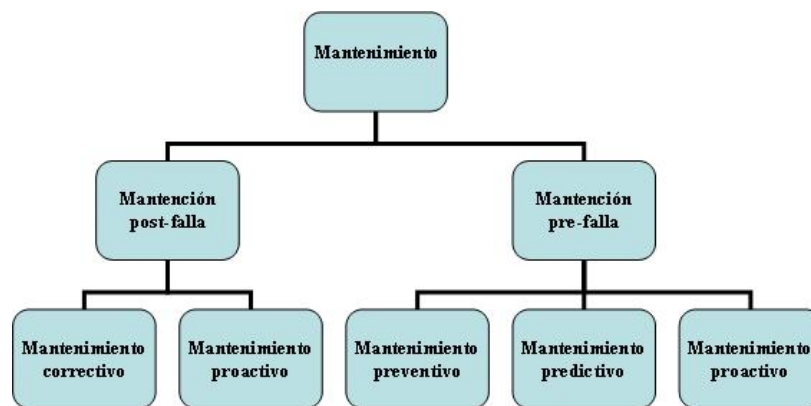


Figura 4.1: Posibles políticas bajo las cuales una firma puede desarrollar sus procesos de mantenimiento.

Además es posible definir mantenimientos estratégicos como sigue:

- **Mantenimiento basado en la confiabilidad o RBM¹.** Originaria de la industria aeronáutica y nuclear de la década del 60. Esta estrategia pretende generar un programa de mantenimiento preventivo aumentando la seguridad, disponibilidad, calidad de la producción y disminución de los costos de mantenimiento.
- **Mantenimiento basado en la condición o CBM².** Observa el estado operacional del equipo basados en el análisis de las vibraciones, ruidos y otras. Estas inspecciones son realizadas principalmente por los operadores del equipo. Esta estrategia pretende minimizar las fallas, costos y aumentar la disponibilidad.

¹Reability centered maintenance.

²Condition based maintenance.

- Mantenimiento basado en la productividad total, también conocida como TPM³. Esta estrategia permite mejorar la efectividad total de los equipos, mediante la visión de la empresa como un todo incluyendo al personal de producción en las tareas de mantenimiento. Pascual [13] señala que se debe promover el mejoramiento de la relación operario-máquina desde la productividad al mínimo costo.
- Mantenimiento basado en la calidad total o TQM⁴. Basado en el constante mejoramiento de los procesos productivos y la dirección de la alta gerencia de la firma. Permite establecer estándares de calidad, programa de mejoramiento continuo, definición de los atributos de calidad, etc.

En el desarrollo de la memoria se evaluará la estrategia de mantenimiento basado en la confiabilidad mediante la política de mantenimiento preventivo.

4.3. Outsourcing

Según Hitt [7] define el outsourcing como el proceso por el cual una empresa compra, a otra externa, una actividad que entrega valor. Esta estrategia posee una serie de ventajas que pueden ser aprovechadas por la firma, pero que también debe asumir desventajas.

Esta se enmarca dentro de las posibles estrategias que posee una firma para realizar sus procesos, productivos o no. La externalización o subcontratación, como también es conocida, implica ciertas habilidades que debe poseer la empresa como la suficiente flexibilidad para que este proceso se pueda llevar a cabo y ser sostenible en el tiempo.

4.3.1. Ventajas del outsourcing

Estas son:

- **Permite tener un enfoque estratégico:**

Muchas de las empresas cuando realizan proceso de externalización han decidido liberarse

³Total productivity maintenance.

⁴Total quality maintenance.

de tareas que no guardan necesariamente relación con su negocio. Esta es la acción por la cual deciden delegar a una empresa proveedora la ejecución de uno o varios procesos. Debe estar tutelado por un profundo análisis de sus administradores estratégicos.

La liberación de este tiempo y recursos permite focalizarse a las tareas que son realmente de provecho para la firma.

- **Ahorro de Costos:**

Aún cuando los beneficios del outsourcing están alineados hacia lo estratégico. Existe una fuerte relación hacia los ahorros, mejor control y flexibilidad en los costos.

- **Los costos pasan a ser variables:**

Se debe a que el contratante del servicio ya no realiza los costos asociados a los activos fijos propios de la actividad delegada.

- **Mejor asignación de recursos:**

Básicamente al externalizar una función se logra la liberación de recursos tanto tangibles como humanos, asignándolos hacia tareas más productivas alineadas en relación al *core business* de la compañía.

Muchas firmas poseen áreas que no le son propias al negocio de la empresa. La subcontratación permite que la empresa pueda evitar gastos como son: los relativos a la remuneración, compra de maquinarias, suministros, entre otros.

- **Acceso a recurso humano experto:**

Es improbable que una empresa posea en su planilla a los mejores trabajadores en todas sus áreas. Pero esta se esmerará en tener a los mejores trabajadores en áreas relativas a la producción para competir con las otras firmas de la industria. Mientras que la empresa proveedora de servicio realiza esfuerzos para tener los mejores profesionales en su área para competir con las otras empresas proveedoras.

Por otro lado, contratar a estos trabajadores solo para las ocasiones requeridas por la empresa puede salir muy caro, en relación con la externalización que es más económica y que permite contar con el recurso humano a disposición de la empresa por mayor tiempo.

- **Acceso a mejores prácticas:**

Las empresas proveedoras cuentan con trabajadores capacitados, y es en sí misma una organización especializada en prestar el servicio por el que fue contratada, y lucha con las

restantes firmas competidoras para tener los mejores estándares. Por ello, la firma contratante puede y tiene acceso a mejores prácticas.

- **Permite orientación hacia el cliente:**

Las empresas pueden descuidar la atención y la orientación de sus productos o servicios cuando están preocupadas de tareas o conflictos internos, los cuales no necesariamente son parte de su *core business*. Como es lógico pensar, una empresa que descuida a sus clientes no satisface completamente sus requerimientos, perdiendo competitividad en la industria.

La liberación de estas tareas mediante la subcontratación permite ocupar los recursos y el tiempo en la orientación hacia el cliente, percibiendo mejor sus necesidades y ganando competitividad.

- **Acceso a tecnología de punta:**

Las empresas contratistas compiten entre ellas para ofrecer el mejor servicio. Una de esas formas de competencia y seguramente factor clave de éxito en la industria es el liderazgo tecnológico.

- **Se comparten riesgos:**

Cuando las tareas externalizadas son sensibles a la producción, como es el caso de una máquina productiva, el riesgo sobre las fallas complejas de difícil resolución, las mermas sobre la producción, pueden ser disminuidas por un contrato que prevenga la excesiva demora en la reinstauración de la operatividad del equipo.

- **Alianzas estratégicos favorables a la empresa:**

Las empresas que demandan el outsourcing pueden formar alianzas estratégicas con las empresas contratantes y aprovechar sus habilidades y competencias centrales. En ese sentido, es muy importante que las empresas que realizan un proceso de tercerización se apoyen y potencien sus habilidades para enfrentar las competencias dentro del mercado.

4.3.2. Desventajas del outsourcing

Al igual que muchos tópicos de la administración estratégica no hay una receta única y las variables exógenas que pueden afectar una compañía son innumerables.

El siguiente listado no quiere demostrar que el outsourcing sea negativo, pero que si requiere un real interés de parte de los administradores estratégicos de la firma mandante, de estudiar las ventajas de subcontratar y de informarse correctamente de la experiencia, recursos y capacidades de la empresa que contratará.

Existen dificultades muy sutiles en la subcontratación como: la respuesta que vayan a tener los clientes, los verdaderos recursos que posee el proveedor como galpones o talleres, estados de los caminos o ubicación y distancia de las bodegas, que pueden ser datos relevantes al momento de contratar en un sector rural o fuera del país (Weidenbaun [20]).

■ **Dependencia del proveedor**

Es posible que la firma bajo el proceso de externalización pierda la capacidad de hacer la tarea subcontratada por sí misma y obligue a contratar periodo tras periodo a un actor cualquiera que realice la tarea. Si bien es cierto, que no tiene porque ser siempre la misma compañía que realiza la tarea, pero esta está en un pie ventajoso respecto al resto de los proveedores, lo que implicaría una tendencia a la continuidad.

Las razones son:

1. Conocería mejor que ninguna otra empresa los procesos internos de la firma contratante de modo tal que se cuente con una buena cadena productiva.
2. Tendría una buena relación de comunicación entre los trabajadores y administradores de la compañía contratante y la proveedora.
3. La tendencia del outsourcing es a relaciones más estrechas entre las compañías.

De modo que establecer otra relación contractual con otra firma proveedora involucraría tiempo hasta que ambas logren una relación óptima.

La dependencia sería más evidente si la firma proveedora es un agente monopólico o varios agentes oligopólicos coludidos, en especial cuando la firma demandante del servicio no tiene una real capacidad de negociación.

■ **El proveedor externo no conoce el negocio en la forma deseada**

Es posible que el proveedor del negocio no tenga la experticia que busca la empresa demandante, y que no cumpla con sus expectativas. Puede que la firma proveedora no tenga

la trayectoria deseada. La firma que desea tercerizar debe tener las mejores referencias de la empresa proveedora del servicio.

Además que la forma en que la empresa contratada realiza sus procedimientos interfiera con los procesos de la cadena productiva que primitivamente tenía el mandante. Desde esta perspectiva la firma debe ser lo suficientemente flexible y estructurada en sus procedimientos para poder adaptarse a la incorporación de la empresa proveedora.

■ **Pérdida del control de la información**

Al externalizar una función, la información proveniente de esta se deja de recibir con igual eficacia que antes. Los trabajadores y los administradores estratégicos dejan de ganar experiencia debido al cese de su trabajo. Lo que puede significar a la compañía una desventaja en la toma de decisiones y capacidades. Por lo que existe una merma en el capital intelectual⁵ (Hitt [7]) de la firma respecto a otras empresas, lo que afectará el prestigio en el entorno laboral.

■ **El daño motivacional a la fuerza laboral**

El proceso de outsourcing debe ser llevado con cuidado pues este puede afectar a los trabajadores con sobrecargas de trabajo, ansiedad y estrés entre otras. Incluso el miedo a lo que el cambio significa, pues en cierto sentido el "no cambio" se traduce en un cierto grado de tranquilidad, también influye el miedo de perder la fuente laboral. Estas pueden afectar los procesos productivos como la fidelidad hacia la empresa.

Este punto debe ser tratado con suficiente sutileza de modo que el outsourcing sea visto como una oportunidad que favorezca a la comunidad y no ser visto como una amenaza.

■ **Perdida de fuentes de entrenamiento del personal**

La delegación de funciones a otra empresa por medio de una externalización, lleva consigo el cese de entrenamiento en la tarea en cuestión. Es posible que tal externalización no afecte el nivel de entrenamiento de los trabajadores de una empresa de transporte de materias primas o de producto final, pero si tendría implicancia en una empresa manufacturera si subcontrata un eslabón de su cadena productiva.

Es trabajo de los administradores estratégicos desarrollar un contrato adecuado y un outsourcing, tal que no se pierda el entrenamiento entre los trabajadores, sino que, este siga

⁵La suma de todo lo que saben todos lo que forman parte de la empresa

aumentando o capacitándolos en otras áreas.

- **Costos imprevistos**

Cuando no se ha realizado un proceso apropiado en la evaluación del proyecto de subcontratación y se ha efectuado en forma descuidada, o simplemente se dejaron de lado, en forma inconciente o conciente, algún antecedente o característica importante de la empresa proveedora. De esta forma, pueden surgir costos inesperados o complicaciones (Weidenbaun [20]). Las razones pueden ser muy variadas, por ejemplo, que le proveedor entregue servicios a otras empresas las que estén solicitando sus requerimientos en el mismo momento que la firma demandante lo solicite.

Otras situaciones algo más extremas pueden ser el outsourcing a empresas que están en el exterior del país, donde se desconocen muchas veces detalles que logran ser de gran importancia como el estado de las carreteras que pudieran retrasar las entregas, impuestos aduaneros, etcétera.

Una de las formas para que la empresa se proteja de estas eventualidades es la gestión de un contrato apropiado.

- **Posibles fugas de información estratégica**

La externalización puede ser una interacción muy estrecha entre las partes, de modo que cierta información de carácter estratégico, como puede ser: volúmenes de producción, niveles de contratación, entre otros, sea conocida. Tal información puede ser considerada estratégica para los planes a corto y largo plazo de la firma.

- **Posible rechazo de los trabajadores**

Esto se justifica desde la perspectiva que una empresa que realiza una subcontratación es posible que deba despedir trabajadores, favoreciendo el *down sizing* ya que no realizará la tarea que está tercerizando. La planta de trabajadores, con la intención de preservar sus fuentes laborales, puede obstaculizar el correcto funcionamiento del outsourcing, lo que puede traer grandes trabas y problemas a la empresa.

- **Roces con la cultura organizacional**

La externalización requiere ciertas habilidades de las firmas participantes como la flexibilidad, la capacidad de adaptarse a la presencia y la forma de realizar los procesos de la contraparte. Roces en esta perspectiva pueden obstaculizar las tareas externalizadas de modo de

restar eficiencia, e incluso estropearla.

- **Razones políticas, climas y otras**

El outsourcing no solo se enmarca bajo las fronteras de un país, en el desarrollo de este informe se ha comentado casos donde empresas subcontratan servicios en otras latitudes.

Los ejemplos donde las razones políticas importan desde la perspectiva de la tercerización son muchos. La condición política reinante en China condiciona la naturaleza de la subcontratación, de la misma forma los vaivenes e inestabilidades en otras regiones del planeta.

Otras situaciones imponderables pueden surgir de la naturaleza como: un terremoto, inundaciones relativamente frecuentes en ciertas partes del sur del país. Además de tifones y huracanes propios de otras latitudes.

Las proyecciones de los ahorros de la subcontratación pueden ser considerados como una subestimación de los reales, ya que esta estrategia tiene la virtud de transparentar muchos costos, que hasta el momento de la externalización propiamente tal, se desconocían.

Dado que la externalización está dentro del marco del análisis estratégico, la posibilidad de la delegación de la tarea a un tercero puede ser deseada por parte de los administradores estratégicos, aún cuando esta signifique mayores ahorros a la firma.

4.4. Contratos

Un contrato, en términos generales, es definido como un acuerdo privado, oral o escrito, entre partes que se obligan sobre una materia o cosa determinada, aquí subcontratación, y al cumplimiento pueden ser compelidas. Es un acuerdo de voluntades que genera derechos y obligaciones para las partes. Por ello, se señala que habrá contrato cuando varias partes se ponen de acuerdo sobre una manifestación de voluntad destinada a reglar sus derechos. En términos legales, un contrato es un acto jurídico bilateral o multilateral, porque intervienen dos o más personas, y que tiene por finalidad crear derechos y obligaciones. También se denomina contrato, al documento que recoge las condiciones de dicho acto jurídico. Las partes en un contrato son personas físicas o jurídicas. En un contrato hay dos polos o extremos de la relación jurídica obligacional, cada polo puede estar constituido por más de una persona, revistiendo la calidad de parte.

4.4.1. Teoría de contratos

Desde la perspectiva de la teoría de contratos; se pueden definir contratos completos e incompletos. Según Salanié [18], los contratos completos son aquellos que incorporan dentro de sus parámetros todos aquellos que pueden cambiar e influir en los beneficios de las partes, mientras que los contratos incompletos son aquellos que no contemplan alguna de las variables; los contratos en la realidad son casi siempre incompletos debido a que no se tiene información exacta de los eventos a futuro, dejando en manos de los administradores todas aquellas situaciones que no se contemplan en el contrato. En el desarrollo de la memoria solo se considerará contratos completos.

Existen numerosas complicaciones dentro de la teoría de contratos, entre estas está el problema de la información. Según Fisher [6] se tiene:

- Información simétrica: En este modelo la información es verificable para las partes.
- Riesgo moral: La información no es verificable, esta información puede o no estar incluida en el contrato. Una vez que el contrato se ha firmado el agente puede variar el parámetro en cuestión. Un ejemplo típico es el esfuerzo que realiza el agente en cumplir lo estipulado por el contrato.
- Selección adversa: Propio cuando el agente conoce mejor sus características que el principal antes de la firma del contrato.

Las anteriores implican variaciones en la forma de resolver el problema principal-agente.

Desde una perspectiva corporativa, los contratos que la DGAC considera en la actualidad son:

En relación a la duración:

- Por trabajo: Se contrata a un proveedor para que realice un único trabajo. La relación con él comienza desde la firma del contrato hasta la recepción final de la obra. La Jefatura de la DGAC asegura que es aquí donde se obtiene el menor compromiso de parte del proveedor, debido a lo escaso de la relación y los bajos montos que representan las multas.
- Anuales: La mayoría de las relaciones contractuales que establece la DGAC con los proveedores son acotados al año, debido al presupuesto anual que maneja el aeródromo o unidad.

- Bianules. La actual política de la institución es reservar los contratos bianuales a aquellos servicios de bajo requerimiento tecnológico.

Desde la perspectiva de los precios los contratos son:

- Por trabajo: El proveedor del servicio cobra a la institución un único precio global al cliente.
- Por partida: Cuando un proyecto engloba a otros proyectos de menor envergadura, el precio que el proveedor cobra a la DGAC es un precio global por cada partida o proyecto menor.
- Por precio unitario: El proveedor cobra a la institución por cada vez que realiza el trabajo por el cual fue contratado.

En esta memoria, el contrato a especificar corresponde a “precio unitario”, sin desmedro de la potencial situación que la DGAC pueda considerar evaluar otro, o escoger entre la conveniencia de dos de ellos.

El contrato estipula la obligación de parte del proveedor de entregar servicio de mantenimiento preventivo. Este contrato está sujeto a multas que son ejecutadas en desmedro del proveedor.

Los valores que caracterizan al contrato, como la duración, periodo entre preventivas, tiempo de aplicación de las multas, etc. Están expuestas en las bases administrativas.

Definición del contrato a estudiar

Será llamado A_1 y queda expresado como sigue:

Contrato A_1 : El proveedor entrega servicio de mantenimiento preventivo al poseedor del equipo (DGAC) por un periodo comprendido entre $[0, l]$, bajo reparación perfecta.

El proveedor asume las siguientes multas:

- El proveedor pagará una cantidad δ al cliente cuando este demora más de τ unidades de tiempo en retornar el equipo en condiciones operativas. A esta se la llamará multa tipo 1.

- El proveedor pagará una cantidad α amplificada por $(y - \tau - \theta)$, siendo y el tiempo en que el equipo no está operativo. Esta multa se hace efectiva a partir de $\tau + \theta$, y será llamada multa tipo 2.

El cliente debe escoger – si desea celebrar el contrato – entre las estrategias de intervención por edad (age replacement) o intervención por bloque (block replacement). La medida para decidir entre estas dos son los beneficios esperados del proyecto.

4.5. Posición frente al riesgo

Desde una perspectiva económica un proyecto que conlleve un cierto margen de beneficios no implica que sea aceptado por parte de los administradores estratégicos. De esta forma, se pueden establecer posturas frente al riesgo en relación a los márgenes de los beneficios de un proyecto, definiendo agentes económicos neutros, adversos y proclives al riesgo.

Estableciendo como u la función de utilidad del agente económico que describe el nivel de bienestar, dado un cierto nivel de retorno esperado. Se define a r (índice de Arrow-Pratt) como sigue

$$r = -\frac{u''}{u'} \quad (4.1)$$

Se cumple que

- Si $r > 0$ el agente es adverso al riesgo.
- Si $r = 0$ el agente es neutro al riesgo.
- Si $r < 0$ el agente es proclive al riesgo.

Al considerar agentes neutros al riesgo implica que la solución del índice de Arrow-Pratt define funciones lineales. Este es el caso de la presente memoria.

La realidad económica muestra que se debe considerar una cierta función de utilidad⁶ como una aproximación a casos reales y no solo como un simple ejercicio matemático.

⁶Llamada también función de utilidad de Bernoulli.

4.6. Beneficios

En virtud de la sección anterior se definen los beneficios de las partes como una solución particular al índice de Arrow-Pratt según Kreps [9] y Mas-Colell [10], correspondientes a agentes económicos neutros al riesgo.

4.6.1. Ingresos

Los ingresos que recibe la DGAC por el VOR-DME es por medio del servicio de radio-ayuda prestado a las aeronaves que por la ruta circulan. El tráfico aéreo es una variable estacional, en especial para esta región donde la industria turística es importante. Como consecuencia, los ingresos ω son variables en el tiempo, y será denotado como $\omega(t)$.

El VOR-DME queda inactivo mientras es reparado, sufriendo una merma en los ingresos por no disponibilidad del equipo.

Por lo que los ingresos por el uso del VOR-DME serán

$$I_p = \int_0^l \omega(t)dt - \sum_{j=1}^{n_c} \int_{x_j^i}^{x_j^i+y_j} \omega(t)dt \quad (4.2)$$

Por simplicidad, que no afecta el desarrollo conceptual de la memoria, se asume a ω constante, además asumiendo como despreciable la suma de los tiempos de intervención con respecto al tiempo operativo, se obtiene que

$$I_p = \omega l \quad (4.3)$$

Por parte del proveedor los ingresos están determinados debido a la ocurrencia de cada una de las intervenciones por el precio unitario. Su expresión es

$$I_f = E(n_p)p_p + E(n_c)p_c \quad (4.4)$$

En el caso de intervención por bloque (block replacement), donde se conocen la totalidad de las intervenciones preventivas durante la vigencia del contrato, se reemplaza $E(n_p)$ por n_s .

4.6.2. Multa

Los ingresos por concepto de multa que percibe el principal provienen de dos: multa tipo 1 y multa tipo 2. El valor esperado para la multa tipo 1 – que es propuesta en esta memoria – posee la siguiente forma

$$E(\text{multa}_1) = \delta \sum_{j=1}^{n_c} H_{x_j^i + \tau}(x_j^i + y_j) \quad (4.5)$$

Donde H es una función tal que

$$H_{x_j^i + \tau} = \begin{cases} 1 & ; \text{si } x_j^i + y_j \geq x_j^i + \tau \\ 0 & ; \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.6)$$

Mientras que la multa tipo 2, expuesta por Asgharizadeh [1] y Asgharizadeh y Murthy [2], ocupada por la DGAC posee la siguiente forma

$$E(\text{multa}_2) = \alpha \sum_{j=1}^{n_c} \text{máx} \{0, y_j - \tau - \theta\} \quad (4.7)$$

Por lo que los ingresos por multas son

$$M_p = \delta \sum_{j=1}^{n_c} H_{x_j^i + \tau}(x_j^i + y_j) + \alpha \sum_{j=1}^{n_c} \text{máx} \{0, y_j - \tau - \theta\} \quad (4.8)$$

Los costos de multa para el seguidor cumplen que: $M_f = -M_p$

4.6.3. Costos

Los costos que percibe el principal corresponden a las intervenciones, tanto las correctivas como preventivas, por sus precios unitarios. Esto es

$$J_p = E(n_p)p_p + E(n_c)p_c \quad (4.9)$$

De conocerse en forma determinista las intervenciones preventivas se reemplaza $E(n_p)$ por n_s

Para el seguidor los costos del contrato son

$$J_f = E(n_p)c_p + E(n_c)c_c \quad (4.10)$$

En resumen a lo anterior se pueden configurar el valor esperado de los beneficios para las partes.

4.6.4. Beneficio para la DGAC

Corresponde a la relación lineal entre I_p , M_p y J_p en virtud de la naturaleza de neutralidad frente al riesgo, se tiene que

$$E(\pi_p) = I_p + M_p - J_p \quad (4.11)$$

4.6.5. Beneficio para la proveedor

Los beneficios esperados para el proveedor son una relación lineal entre I_f , M_f y J_f . Su expresión es

$$E(\pi_f) = I_f - M_f - J_f \quad (4.12)$$

Si se considerara que los agentes económicos poseen una postura distinta frente al riesgo (proclive o adverso) las ecuaciones anteriores serán no lineales en los precios.

4.7. Multas

Hasta la fecha la DGAC solo cuenta, si lo desea, con una multa creciente en el tiempo que, a juicio de la jefatura de La Florida, no logra comprometer eficazmente al proveedor del servicio. En ocasiones, las empresas proveedoras prefieren pagar la multa antes que responder por el trabajo por el cual fueron contratados, tal situación se puede ver saneada en parte por la prolongación

en el tiempo de contrato, ya que la suma que multas puede llegar a cifras de importancia para el proveedor.

4.8. Multa existente

La multa existente corresponde a la aplicación de un factor de castigo – definido aquí como α – el cual se incrementa proporcionalmente en el margen entre el tiempo que está efectivamente detenido el equipo y, menos el tiempo en que la multa comienza a ser efectiva, denotado como $\tau + \theta$. El valor monetario de la multa tipo 2 de la j -ésima falla es $\alpha \max\{0, y_j - \tau - \theta\}$, mientras que el valor esperado total de las multas está definido por la ecuación (4.7).

Su expresión gráfica es

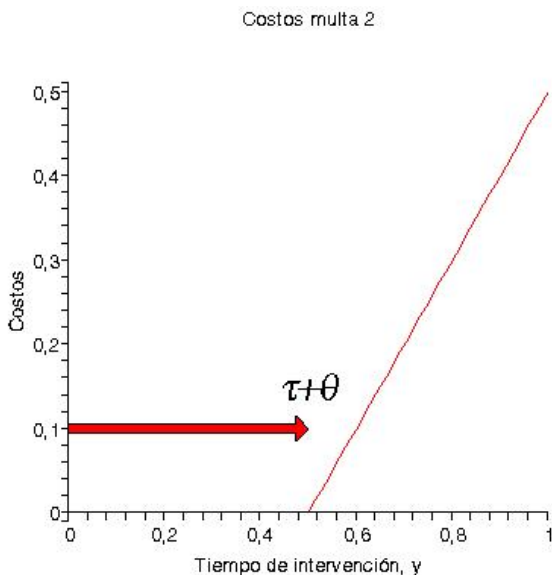


Figura 4.2: Multa “1 por 1000” que aplica actualmente la DGAC. En el gráfico el factor de multa es unitario ($\alpha = 1$) y el tiempo característico es $\tau + \theta = 0,5$.

4.9. Multa propuesta

La incorporación de otra multa, permite aumentar el compromiso del proveedor. La multa propuesta es invariante en el tiempo, pero el factor de castigo δ es mayor a la multa existente y se

aplicaría en un tiempo menor a la multa citada. El cobro de la multa se ejecuta cuando el tiempo donde el equipo no está operativo es mayor a un tiempo característico especificado en las bases administrativas del contrato llamado τ . El valor monetario de la multa tipo 1 de la j -ésima falla es $\delta H_{x_j^i + \tau}(x_j^i + y_j)$ y el valor esperado total está dado por la ecuación (4.5).

El gráfico siguiente muestra la suma de las multas en función del tiempo de intervención y

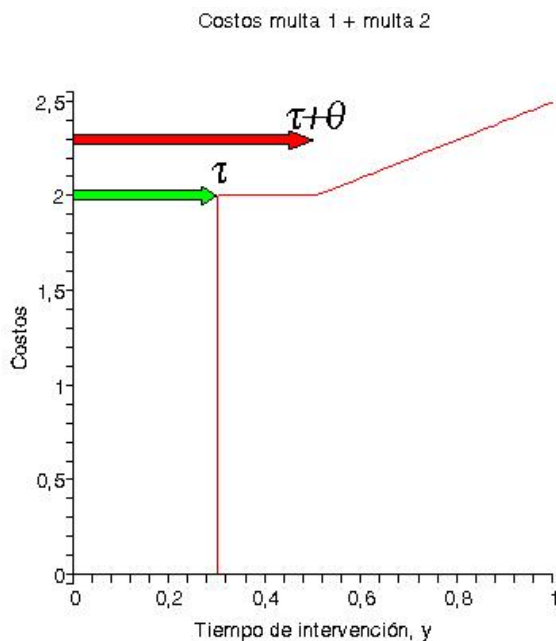


Figura 4.3: Sistemas de multas propuesta, que es la adición de un factor constante y la multa “1 por 1000”. La multa propuesta tiene un factor de multa $\delta = 2$ y su tiempo característico es $\tau = 0,3$.

Las multas permiten comprometer al proveedor en la probidad del servicio y puede ser un análisis importante para este. Si fuese el caso que el agente tuviese una cartera numerosa de clientes, el tiempo y no correspondería solamente al tiempo de intervención, sino que, el eventual tiempo de espera en una cola de servicio, lo que aumenta el valor esperado de los egresos por concepto de multa para el proveedor. Este podría ser tal que, el proveedor poseería un valor máximo de clientes a servir.

Capítulo 5

Estrategias de mantenimiento

5.1. Introducción

El presente capítulo detalla dos tipos de mantenimiento, a saber: mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo.

Mientras que el mantenimiento correctivo involucra la intervención del equipo una vez que este ha fallado, el mantenimiento preventivo cuenta con intervenciones preventivas que buscan minimizar la cantidad de fallas, aumentando la disponibilidad del equipo, disminuyendo los costos entre otros.

Las intervenciones, tanto preventivas como correctivas, constan en la reparación o reemplazo de un equipo nuevo u operativo.

5.2. Modelos de mantenimiento correctivo

Esta estrategia de mantenimiento es no planeada, está basada en acciones de emergencia que busca solucionar las fallas sobre el equipo.

Desde esta perspectiva, se pueden configurar dos tipos de acciones; a saber: reemplazo y reparación.

- Reparación: El componente – o el equipo – que ha fallado se repara hasta que llegue a una calidad deseada o sea nuevamente operativa.
- Reemplazo: El componente – o el equipo – es reemplazado por uno nuevo o usado operacional.

La determinación de cual de las acciones expuestas se realice depende de varias consideraciones como: el tipo de falla, tipo de equipo, política de mantenimiento, edad del equipo, etc.

5.3. Modelos de mantenimiento preventivo

Tiene por objetivo mantener el equipo en forma operativa el mayor tiempo posible aminorando la ocurrencia de fallas. Para el buen funcionamiento de esta política es necesario tener un modelo de fallas y de costos.

El mantenimiento preventivo posee las siguientes virtudes:

- Prolonga la vida del equipo.
- Aumenta la disponibilidad.
- Disminuye los tiempos muertos y de parada.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento debido a la programación de actividades.
- Permite una mejor administración de los costos de inventario por concepto de repuestos.
- Menores costos de reparación.

A continuación se presentan tres tipos de políticas de mantenimiento preventivo.

5.3.1. Política de reemplazo periódico

Bajo esta política el equipo – o componente – es reemplazado en plazos determinados en un horizonte de tiempo, realizando además todas aquellas intervenciones correctivas tipo intervenciones mínimas entre periodos de reemplazo.

Asumiendo que los tiempos de reemplazo son $\{T_s, 2T_s, \dots\}$; y c_p y c_c , los costos de reemplazo y las intervenciones correctivas mínimas, respectivamente.

Se cumple que el costo por unidad de tiempo de esta política es

$$j(T_s) = \frac{1}{T_s} (c_p + c_c E(n_c)) \quad (5.1)$$

El costo de un periodo de largo T_s (tiempo entre reemplazos) es $J(T_s) = T_s j(T_s)$.

Esta política posee las siguientes ventajas:

- Disminución de las fallas en el equipo.
- Se conoce con anticipación las fechas de los reemplazos, lo que permite a la organización la coordinación de la firma disminuyendo los costos a raíz de eventos imprevistos.

Posee además las siguientes desventajas: no aprovecha completamente la vida del equipo, es una alternativa alta en costos económicos,

5.3.2. Política de intervención en bloques de tiempo (block replacement)

Un equipo es sometido a mantenimiento preventivo en intervalos de tiempo conocidos y determinados con anticipación, siendo este tiempo T_s , realizando sobre este mantenimiento correctivo cada vez que el equipo falle. El tiempo entre preventivas es invariante y no se ve afectada por la ocurrencia de fallas del equipo.

Tomando el periodo entre dos intervenciones preventivas constante, estas ocurrirán en $T_s, 2T_s, 3T_s$, etc. Los costos de cada intervención preventiva es c_p , mientras que los costos correctivos son c_c .

Los costos por unidad de tiempo son

$$j(T_s) = \frac{1}{T_s} (c_p + c_c E(n_c)) \quad (5.2)$$

Esta política posee los siguientes beneficios:

- Disminución de la cantidad de fallas del equipo.
- Paradas de maquinaria planeadas y en coordinación con los departamentos de producción, lo que implica para la firma costos menores.
- Puede ser aplicable a equipos críticos de alta disponibilidad.

Posee las siguientes desventajas:

- No se aprovecha del todo la vida útil del equipo.
- Posible exceso de intervenciones preventivas.
- Partes reemplazadas innecesariamente.

5.3.3. Política de intervención por edad (age replacement)

Corresponde a la realización de una intervención preventiva a T_p unidades de tiempo después de la última intervención sea preventiva o correctiva, o el origen del intervalo de tiempo a consideración (por ejemplo: origen del contrato). En esta política, a diferencia de las anteriores, la cantidad de intervenciones preventivas es incierta.

Los costos totales de esta política serán

$$J(l) = (c_p E(n_p) + c_c E(n_c)) \quad (5.3)$$

Cuando el tiempo de interés (l) es grande el costo por unidad de tiempo es

$$j(T_p) = \frac{c_p R(T_p) + c_c (1 - R(T_p))}{\int_0^{T_p} t f(t) dt + T_p (1 - F(T_p))} \quad (5.4)$$

Esta política posee los siguientes beneficios:

- Aprovecha completamente la edad del equipo.
- No sobreexplota los recursos.

Su desventaja es: no permite planificar con un margen de horizonte tan amplio – respecto a las anteriores – la administración de las paradas de los equipos.

En los tres modelos anteriores, n_c y n_p son determinadas mediante modelos matemáticos determinadas por la calidad del tipo de reparación.

Capítulo 6

Proceso de conteo de fallas

6.1. Introducción

Para determinar políticas y estrategias sobre la función de mantenimiento es necesario modelar los procesos de reparaciones y la ocurrencia de las fallas mediante conceptos que denoten la calidad de las reparaciones, la política de aplicación de las intervenciones, etc.

De esta sección surgirán los modelos matemáticos – procesos de conteo – que permiten estimar la cantidad de eventos en un determinado horizonte de tiempo. Sin estos, no sería posible desarrollar los modelos que serán desarrollados en el curso de la memoria.

6.2. Tipo de reparación

La caracterización de la secuencia de fallas depende del tipo de mantenimiento a que sea objeto el equipo. La confiabilidad posterior a la intervención depende directamente del tipo de reparación.

6.2.1. Mantenimiento perfecto

Cuando se hace una intervención, sea esta preventiva o correctiva, el equipo o componente es dejado como nuevo. Este tipo de mantenimiento asume

- Todas las fallas son probabilísticamente iguales y de idéntica distribución.
- Las fallas son independientes.
- Las fallas son detectadas inmediatamente.
- El tiempo medio de reparación es comparativamente pequeño respecto al tiempo medio entre falla.

Las fallas del equipo describen en el eje temporal intervalos entre fallas independientes entre sí.

6.2.2. Reparación mínima

Si la falla ocurre, el equipo es rectificado bajo reparación mínima. Este modelo asume

- Las fallas son detectadas inmediatamente.
- El tiempo de reparación es pequeño respecto al tiempo medio entre falla.

La confiabilidad del equipo después de una reparación es idéntica a antes de que fallara. Se dice que la reparación es “tan malo como obsoleto”.

6.2.3. Reparación imperfecta

Se tiene que bajo mantenimiento perfecto el equipo es dejado como nuevo después de una intervención, sea esta preventiva o correctiva. Por lo tanto, la confiabilidad del equipo es la de uno nuevo. Por otro lado, la reparación mínima deja la confiabilidad del equipo igual al momento previo a la falla. En este sentido Rousand [17] coloca a estas como dos situaciones extremas.

Por lo tanto, la reparación imperfecta está entre las dos anteriores.

6.3. Procesos de conteo

Respecto a lo anunciado anteriormente, el tipo de mantenimiento determina un cierto proceso de conteo por el cual se pueden estimar la cantidad de fallas.

Los procesos de conteos que caracterizan a las intervenciones son los siguientes

- Procesos homogéneos de Poisson (HPP).
- Procesos de renovación.
- Procesos de Poisson no homogéneos (NHPP).
- Procesos de reparación imperfecta.

En el desarrollo de la memoria se considera los procesos de renovación dentro del marco de mantenimiento perfecto, esto quiere decir que bajo las intervenciones preventivas y correctivas el equipo es “dejado como nuevo”. Según Rousand [17] los procesos homogéneos de Poisson también son definidos como mantenimiento perfecto, este es el caso de Asgharizadeh [1], bajo la política de mantenimiento correctivo,

Los procesos no homogéneos de Poisson se enmarcan dentro de la reparación mínima, donde las intervenciones restituyen la calidad del equipo justo antes de la falla, esto es enunciado como “tan malo como obsoleto”. Los procesos de reparación imperfecta corresponden a reparación normal.

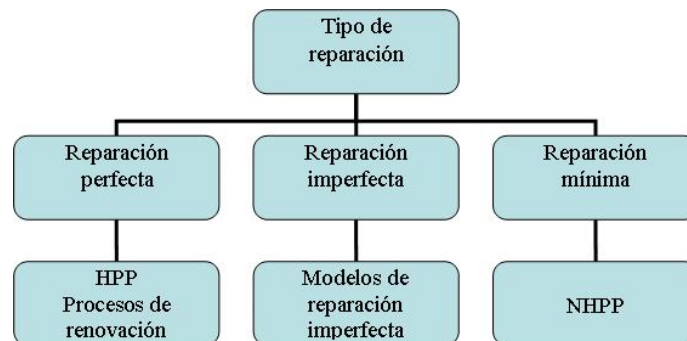


Figura 6.1: La figura muestra la relación entre el tipo de mantenimiento y el proceso de conteo que lo modela.

La consideración de cada uno de los procesos de conteo enunciados anteriormente conlleva a expresiones matemáticas distintas, las que permitirán estimar la cantidad de fallas de los equipos y determinar indicadores significativos para las partes tales como disponibilidad, costos, ingresos, beneficios, etc.

6.4. Conclusiones

Lo expuesto demuestra el fuerte carácter matemático de los procesos de mantenimiento, dependiendo las estimaciones de la estrategia y políticas escogidas por las necesidades o las capacidades de las partes.

Una criterización del tipo de mantención que será objeto la firma, permite definir un proceso de conteo apropiado. En el marco del desarrollo de esta memoria esto es gravitante para las partes, pues se estiman ex-ante la ocurrencia esperada de las fallas y multas (y eventualmente, de las intervenciones preventivas). Una sobreestimación significaría al cliente el posible rechazo del contrato conservando para sí la realización de la función de mantenimiento, mientras que la subestimación podría significar, como resultado final del ejercicio, desutilidades de considerable magnitud. Desde la perspectiva del proveedor, una sobreestimación o subestimación podría significar prepararse en mala forma para satisfacer las necesidades del cliente. Esto se ejemplificaría en la compra de activos o contrataciones innecesarias.

Capítulo 7

Estrategias de mantenimiento preventivo

Como se ha comentado el mantenimiento preventivo es una estrategia que posee notables características. Desde la perspectiva la memoria se evaluará dos subpolíticas presentes en la institución donde se obtiene el estudio de caso. Estas son:

- Intervención por bloque de tiempo (block replacement): Realiza intervenciones preventivas cada T_s unidades de tiempo, reparando las fallas del equipo que se suscitan entre intervenciones preventivas.
- Intervención por edad (age replacement): El proveedor realiza servicio de mantenimiento preventivo a T_p unidades de tiempo desde la última intervención, sea esta correctiva o preventiva. El proveedor restituye las posibles fallas que pueda tener el equipo.

Este capítulo pretende entregar la determinación de los procesos de conteo de las subpolíticas mencionadas, dentro del marco del mantenimiento perfecto; esto es, después de cada intervención el equipo es restituido “como nuevo”, por lo que la confiabilidad es propia de un equipo nuevo. Según Cohen [4], Ross [16] y Rousand [17] este tipo de mantenimiento se modela dentro de la teoría de renovación.

La teoría de renovación predice que el proceso de conteo está dado por la siguiente expresión

$$F^{*n}(t) \approx \Phi\left(\frac{t - n\bar{T}}{s\sqrt{n}}\right) \quad (7.1)$$

Donde $F^{*n}(t)$ corresponde a la n -ésima convolución consigo misma y Φ es la función normal estandarizada. La expresión anterior se hereda desde la teoría de los grandes números. La deducción analítica $F^{*n}(t)$ puede ser muy complicada y por ello se operará con el segundo miembro de (7.1).

7.1. Distribución de $N(t)$

Bajo la ley de los grande números se tiene

$$\frac{N(t)}{t} \longrightarrow \frac{1}{\bar{T}} \quad (7.2)$$

Para valores grandes de t se tiene que $N(t) = t/\bar{T}$, lo que entrega una relación lineal entre el tiempo y el valor esperado de las ocurrencias de las correctivas.

La probabilidad de tener más de n eventos correctivos es

$$P(N(t) \geq n) = F^{*n}(t) \quad (7.3)$$

La teoría de renovación muestra que

$$P(N(t) = n) = P(N(t) \geq n) - P(N(t) \geq n + 1) \quad (7.4)$$

Lo que es equivalente a $P(N(t) = n) = F^{*n}(t) - F^{*(n+1)}(t)$. Despejando la expresión anterior se llega a

$$P(N(t) = n) = \Phi\left(\frac{t - n\bar{T}}{s\sqrt{n}}\right) - \Phi\left(\frac{t - (n+1)\bar{T}}{s\sqrt{n+1}}\right) \quad (7.5)$$

Donde \bar{T} y s son la media y la desviación estándar de f , respectivamente. Esta expresión entrega la probabilidad de que ocurran exactamente n fallas en un margen de tiempo $[0, t]$. Finalmente el valor esperado de los eventos correctivos será

$$E(N(t)) = \sum_{n=1}^{+\infty} P(N(t) \geq n) = \sum_{n=1}^{+\infty} F^{*n}(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} nP(n) \quad (7.6)$$

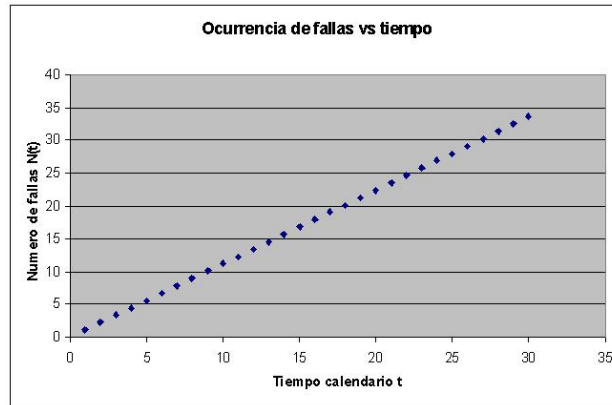


Figura 7.1: La figura muestra la aproximada relación entre las ocurrencias de fallas y el tiempo bajo mantenimiento perfecto. La curva representa a una distribución de Weibull de parámetros $\beta = 3$, $\eta = 1$ y $\gamma = 0$.

7.2. Intervención por bloque de tiempo (block replacement)

7.2.1. Introducción

Esta subpolítica corresponde a una aplicación particular del mantenimiento preventivo y aplicado en la institución patrocinante de la memoria en ciertos activos fijos de altísima disponibilidad y performance.

Consiste en la aplicación de intervenciones preventivas en tiempos conocidos durante el periodo de interés. Asumiendo que todos ellos son iguales y nombrándolos como T_s , las fechas donde se aplica las intervenciones preventivas son $\{T_s, 2T_s, 3T_s, \dots\}$.

Este modelo tiene como características el conocimiento de la cantidad y fecha de las intervenciones preventivas lo que permite ciertos beneficios administrativos y económicos.

Naturalmente existe la posibilidad de la ocurrencia de fallas en el equipo durante preventivas las que son modeladas según el proceso de conteo que corresponda, en este caso particular definido

por la teoría de renovación.

7.2.2. Deducción del modelo

Definido el tiempo entre intervenciones preventivas como T_s estipuladas por el proveedor del equipo o por el mismo cliente. Se conoce la cantidad de intervalos en los cuales se realiza el mantenimiento preventivo definido por

$$n_s = \left\lfloor \frac{l}{T_s} \right\rfloor \quad (7.7)$$

Si $l - n_s T_s > 0$ existirá un intervalo en la cual ya no quedan por hacer intervenciones preventivas, pero si el proveedor del servicio debe realizar eventualmente mantenimiento correctivo ante fallas del equipo en $t \in (n_s T_s, l]$. Aclarado lo anterior, el análisis de la ocurrencia de las fallas se reduce a un intervalo de renovación de largo T_s definido entre el origen del contrato y la primera intervención preventiva, entre dos preventivas consecutivas, y eventualmente, entre la n_s -ésima y el fin del contrato.

Se asume que la ocurrencia de eventos correctivos en un intervalo de renovación es independiente del intervalo.

7.2.3. Proceso de conteo n_c

Como se observo en la sección anterior la ocurrencia de los eventos correctivos está dada por la ecuación (7.5).

Donde

$$\bar{T} = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (7.8)$$

y

$$\sigma^2 = \eta^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \bar{T}^2 \quad (7.9)$$

Las expresiones anteriores son el valor esperado y la varianza de la función de probabilidades del tiempo entre fallas tipo Weibull y $s = \sqrt{\sigma^2}$ es la desviación estándar. Mientras que la cantidad de intervenciones preventivas está dada por (7.7).

7.2.4. Determinación de multa tipo 1

La expresión que describe la cantidad esperada de multa es

$$E(\text{multa}_1 | m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} H_{y_j + \tau}(x_j^i + y_j) \quad (7.10)$$

Es una propuesta al modelo de Asgharizadeh [1]. Esta cantidad afectará los beneficios de las partes ya sea como ingreso para el líder y como egreso para el agente. Considerando que todas las fallas se distribuyen idénticamente y son independientes. Se obtiene

$$E(\text{multa}_1 | m, n_c) = m \quad (7.11)$$

Levantando la determinación sobre m se obtiene

$$E(\text{multa}_1 | n_c) = n_c G(\tau) \quad (7.12)$$

Por lo tanto, levantando la determinación sobre la variable n_c es

$$E(\text{multa}_1) = G(\tau) E(n_c) \quad (7.13)$$

Esta expresión es semejante a la formula de Wald que señala que

$$E\left(\sum_{j=1}^{N(t)} y\right) = E(y)E(N(t)) \quad (7.14)$$

7.2.5. Determinación de multa tipo 2

Corresponde a un modelo de multa que es presentado en Asgharizadeh [1] y que existe en la licitación pública normada por ley. Su representación en este modelo es el siguiente.

$$E(\text{multa}_2|\tilde{n}, m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} \text{máx} \{0, y_j - \tau - \theta\} \quad (7.15)$$

Se tiene que la esperanza del tiempo de intervención y_i de la i -ésima falla tal que $y_i > \tau + \theta$ es

$$E(y_i) = \frac{1}{\mu} e^{-\mu(\tau+\theta)} \quad (7.16)$$

Considerando que todos los tiempos de intervención son iid¹.

$$E(\text{multa}_2|\tilde{n}, m, n_c) = \tilde{n} \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} \quad (7.17)$$

Levantando la determinación de \tilde{n} se tiene que

$$E(\text{multa}_2|m, n_c) = m \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) \quad (7.18)$$

Finalmente se concluye

$$E(\text{multa}_2) = \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) G(\tau) E(n_c) \quad (7.19)$$

Es posible reconocer la formula de Wald en la expresión anterior.

7.2.6. Expresión analítica de los beneficios

Con el resultado de las secciones anteriores se puede construir las expresiones para los beneficios esperados del contrato

¹Independiente e idénticas distribuidas.

Beneficio para la DGAC

Ordenando y reagrupando términos en forma conveniente se obtiene que

$$E(\pi_p) = \omega l + \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) G(\tau) + \delta G(\tau) - p_c \right) E(n_c) - n_s p_p \quad (7.20)$$

Beneficios para el proveedor

Realizando lo propio respecto al proveedor

$$E(\pi_f) = n_s(p_p - c_p) + E(n_c)(p_c - c_c) - \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) + \delta \right) G(\tau) E(n_c) \quad (7.21)$$

Donde $E(n_c)$ está dada por la ecuación (7.6). Las expresiones anteriores son lineales en los precios, esto se debe a la suposición de la neutralidad frente al riesgo de los actores de la negociación.

7.2.7. Conclusiones

Como resultado final de esta sección se tienen dos expresiones lineales en los precios, que definen los beneficios esperados para las partes. Como se observa, dependen únicamente de la determinación de el valor esperado de las fallas del equipo, denotado como $E(n_c)$. Este se deduce de la teoría de renovación en el marco del mantenimiento preventivo e intervenciones perfectas.

Como es de esperarse, la disminución de las intervenciones preventivas tiene como consecuencia el aumento de las fallas del equipo. El resultado de este trade-off será definido en el capítulo pertinente cuando se analice un contrato bajo esta subpolítica de mantenimiento con los datos que proporciona sus bases administrativas.

7.3. Intervención por edad (age replacement)

7.3.1. Introducción

Esta es una de las variantes que se pueden definir dentro del mantenimiento preventivo. Esta subpolítica define un tiempo máximo en que el equipo no es intervenido llamado T_p , una vez cumplido este tiempo se debe intervenir el equipo. Por extensión de lo anterior, no solo la cantidad de fallas son eventos estocásticos sino que también las intervenciones preventivas teniendo un mínimo de cero y un máximo de n_s .

Como consecuencia es necesario definir dos tipos de procesos de conteo, una para las intervenciones preventivas y para las fallas.

7.3.2. Deducción del modelo

Este modelo debe recoger el hecho fundamental de que la cantidad de intervenciones preventivas (las que se realizan a T_p unidades de tiempo desde la última intervención sea esta correctiva o preventiva) son eventos estocásticos, de ocurrencia mínima nula y máxima n_s . Por lo tanto, el proceso de conteo que describe la ocurrencia de fallas del equipo debe recoger esta nueva consideración.

7.3.3. Determinación del valor esperado de falla

La duración del contrato es fijada por el cliente al igual que el tiempo en el cual hay que realizar una intervención preventiva, a estas se le llama:

- l , duración del contrato.
- T_p , Tiempo donde corresponde aplicar una intervención preventiva, se contabiliza desde la última intervención, sea esta preventiva o correctiva.

Por lo tanto, la cantidad máxima de intervenciones preventivas son: $n_s = \lfloor l/T_p \rfloor$, por lo que $n_p = \{0, \dots, n_s\}$. Además se cumple que $l - n_s T_p \geq 0$.

Ante el evento de:

- 0 preventivas. Se pueden tener al menos n_s correctivas en l .
- 1 preventiva. Se pueden tener al menos $n_s - 1$ en $l - T_p$.
- 2 preventivas. Se pueden tener al menos $n_s - 2$ en $l - 2T_p$.
- 3 preventivas. Se pueden tener al menos $n_s - 2$ en $l - 3T_p$.
- $n_s - 1$ preventivas. Se pueden tener al menos 1 en $l - (n_s - 1)T_p$.
- n_s preventivas. Se pueden tener al menos 0 en $l - n_s T_p$.

Por lo tanto, la cantidad de intervenciones correctivas estará dado por

$$E(n_c|n_p) = \frac{l - n_p T_p}{\bar{T}} \quad (7.22)$$

7.3.4. Proceso de conteo de n_p

La probabilidad de las intervenciones preventivas se obtiene mediante probabilidades totales, dada por

$$P(n_p) = \binom{n_s}{n_p} R^{n_p} (1 - R)^{n_s - n_p} \quad (7.23)$$

Por lo que la esperanza será

$$E(n_p) = \sum_{n_p=0}^{n_s} n_p P(n_p) \quad (7.24)$$

7.3.5. Ocurrencia esperada de multa 1

La expresión que caracteriza a la multa tipo 1 es

$$E(\text{multa}_1|m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} H_{y_j+\tau}(x_j^i + y_j) \quad (7.25)$$

Considerando que los tiempos de intervención son iid se tiene

$$E(\text{multa}_1|n_c) = n_c G(\tau) \quad (7.26)$$

Levantando la determinación sobre las intervenciones correctivas se obtiene.

$$E(\text{multa}_1) = G(\tau)E(n_c) \quad (7.27)$$

Donde $G(\tau) = e^{-\mu\tau}$ corresponde a la probabilidad de que el tiempo de intervención sea mayor que τ .

7.3.6. Ocurrencia esperada de multa 2

La expresión analítica que define a esta multa es tomada de Asgharizadeh [1]

$$E(\text{multa}_2|\tilde{n}, m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} \text{máx} \{0, y_j - \tau - \theta\} \quad (7.28)$$

Considerando a los tiempos de intervención y_j independiente e idénticamente distribuidas, se tiene

$$\begin{aligned} E(\text{multa}_2|n, m, \tilde{n}) &= \tilde{n} \int_{\tau+\theta}^{+\infty} (y - \tau - \theta)\mu e^{-\mu y} dy \\ &= \tilde{n} e^{-2\mu(\tau+\theta)} \left(\frac{\mu(\tau + \theta) + 1}{\mu} \right) \end{aligned} \quad (7.29)$$

Tomando la esperanza sobre \tilde{n} .

$$E(\text{multa}_2|n_c, m) = mG(\tau + \theta)e^{-2\mu(\tau+\theta)} \left(\frac{\mu(\tau + \theta) + 1}{\mu} \right) \quad (7.30)$$

Posteriormente sobre m

$$E(\text{multa}_2|n_c) = n_c G(\tau + \theta) G(\tau) e^{-2\mu(\tau+\theta)} \left(\frac{\mu(\tau + \theta) + 1}{\mu} \right) \quad (7.31)$$

Luego la esperanza de la ocurrencia de la multa 2 es

$$E(\text{multa}_2) = E(n_c) G(\tau + \theta) G(\tau) e^{-2\mu(\tau+\theta)} \left(\frac{\mu(\tau + \theta) + 1}{\mu} \right) \quad (7.32)$$

Donde $G(\tau + \theta) = e^{-\mu(\tau+\theta)}$ es la probabilidad de que el tiempo de intervención $y \geq \tau + \theta$.

7.3.7. Beneficios para los agentes

Los valores esperados para los beneficios de los agentes económicos son como sigue

Beneficios para el principal

Mediante el resultado de las secciones anteriores y la ecuación (4.11) el valor esperado de los beneficios son

$$E(\pi_p) = \omega l + \delta E(\text{multa}_1) + \alpha E(\text{multa}_2) - p_p E(n_p) - p_c E(n_c) \quad (7.33)$$

Reemplazando los valores se obtiene

$$E(\pi_p) = \omega l + \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) G(\tau) + \delta G(\tau) - p_c \right) E(n_c) - E(n_p) p_p \quad (7.34)$$

Beneficios para el seguidor

Por medio de la ecuación (4.12), la marginalización esperada de las intervenciones correctivas y preventivas, y el valor esperado de las multas, se concluye que los beneficios son

$$E(\pi_f) = (p_p - c_c) E(n_p) + (p_c - c_c) E(n_c) - \delta E(\text{multa}_1) - \alpha E(\text{multa}_2) \quad (7.35)$$

Sustituyendo

$$E(\pi_f) = E(n_p)(p_p - c_p) + E(n_c)(p_c - c_c) - \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) + \delta \right) G(\tau) E(n_c) \quad (7.36)$$

La diferencia en la forma de los beneficios para las partes con respecto al modelo de intervención por bloque, es que estas expresiones incluyen el valor esperado de las intervenciones preventivas por constituir estas un evento estocástico.

7.3.8. Conclusiones

Como consecuencia de esta subpolítica se obtiene dos expresiones lineales, semejantes en forma a las obtenidas bajo el modelo de intervenciones por bloque (block replacement) pero conceptualmente distinta, ya que están constituidas por dos procesos de conteo, a saber: intervenciones preventivas y fallas del equipo.

La determinación de un T_p permuta la cantidad de intervenciones preventivas por intervenciones correctivas debido a su repercusión en la confiabilidad del equipo, será necesario determinar la correcta T_p^* tal que maximice los beneficios esperados para el principal.

Determinar cual estrategia subordina a otra se dejará para más adelante en el desarrollo de la memoria, cuando se evalúen los contratos mediante los datos que son explicitados en las bases administrativas.

Capítulo 8

Estudio de caso

La Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile es una institución de carácter estatal, dependiente del Ministerio de Defensa del Gobierno de Chile por medio de la comandancia de la Fuerza Aérea de Chile. Esta encargada de la fiscalización y vigilancia de las buenas prácticas aeronáuticas del espacio aéreo chileno.

Fundada en el año 1930, está presente a lo largo del todo el territorio nacional incluyendo Isla de Pascua y Antártica. Posee una importancia estratégica para el desarrollo político-económico de la nación.

En particular el aeródromo de La Florida está localizado en la cuarta región en la ciudad de La Serena, fue fundado en el año 1949 y corresponde al principal aeródromo de la región.

Como caso particular se analizará la propuesta de externalización del servicio de mantenimiento del servicio de radio-ayuda VOR-DME que posee el mencionado aeródromo. En la actualidad, esta tarea es realizada por funcionarios propios asentados en las dependencias del aeródromo, que corresponde a una dotación de cinco electrónicos los cuales además realizan otras tareas.

La DGAC por ser una entidad pública administra presupuestos anuales de modo que no pueden configurar contratos por periodos superiores a un año¹, tal escenario posibilita que la DGAC no sea una entidad eficiente. A juicio del propio personal consultado, sería mucho más eficiente la celebración de contratos por plazos superiores al año y la delegación a terceros de tareas que

¹En casos excepcionales y sobre servicios de bajo necesidades tecnológicas tales como gasfitería o semejante, los contratos se podrían extender a un máximo de dos años.

escapan al quehacer aeronáutico, superaría la problemática de los tiempos muertos del personal que por la naturaleza de los flujos aéreos, a momentos escasos, son frecuentes. Favoreciendo una mejor asignación de recursos y el *down-sizing* en la institución.

Tal ejemplo se ve en otros países, ya que en ellos se han externalizado no solo tareas fuera del ámbito aeronáutico (como el mantenimiento) sino que propios y medulares de este, como lo son: el servicio de extinción de incendios (SEI), operación de control de tránsito aéreo, entre otros.

Tal evento ya ha dado síntomas; hace pocos años se han externalizado servicios como el transporte, aseo, mantenimiento de jardines, administración de terminales aéreos, casino, por mencionar algunos. Pocas décadas atrás tales tareas eran realizadas exclusivamente por la DGAC. Lo que se espera para el futuro cercano es la continua tendencia hacia la externalización tal como ocurre en otros países y en organismos estatales semejantes.

8.1. Situación actual

En este aeródromo operan aviación privada y comercial, instituciones públicas y estatales como CONAF y Carabineros de Chile, además del club aéreo de la ciudad. Es la base de operaciones de logística de transporte aéreo de importantes empresas mineras. El constituye un recurso estratégico para importantes industrias como la mencionada minería y el turismo, entre otras.

Actualmente se evalúa la posibilidad de trasladar el aeródromo hacia las cercanías de Tongoy, a 40 kilómetros al sur de Coquimbo, construyendo un aeropuerto² el que permita el arribo de importaciones y la salida materias primas y productos manufacturados de industrias de la zona.

La DGAC nace fuertemente ligada a la Fuerza Aérea de Chile, pero con el pasar de los años y mediante los cambios políticos que han ocurrido, va tendiendo hacia una institución de carácter civil, en la actualidad depende de la comandancia de la FFAA de Chile. Hace un par de décadas la DGAC realizaba todas las funciones relacionadas o no con su *core business*, con el pasar de los años, muchas de las tareas fueron externalizadas como es el caso del transporte, casino y aseo entre otros. En la actualidad, otras tareas íntimas en el quehacer aeronáutico son externalizadas como la administración de los terminales aéreos, este es el caso de La Florida, por lo que en la actualidad este aeródromo está dividido en una parte administrativa dependiente de la DGAC y

²Desde el lenguaje aeronáutico un aeródromo es idéntico a un aeropuerto salvo que el último posee aduana.

una parte concesionada a privados que corresponde al citado terminal aéreo.

En algunos países desarrollados el servicio aeronáutico externaliza aún más funciones íntimas con el quehacer aeronáutico como lo son:

- El servicio de control de tránsito aéreo³.
- Servicio de extinción de incendios (SEI).

La tendencia de los cambios políticos muestra un camino muy probable hacia el *down-sizing* de la institución prescindiendo cada vez más de funcionarios y tareas que carecen valor productivo.

Aquí cae la externalización del activo fijo en cuestión.

8.2. Etapas de externalización

Dado que la DAGC es un organismo fiscal sujeto a la restricción presupuestaria de un presupuesto anual aprobado por el gobierno central, está imposibilitada de formular contratos con proveedores privados por periodos mayores a un año. Solo en casos puntuales, un contrato se puede prolongar a un periodo máximo de dos años y en servicio de bajo requerimiento tecnológico.

Los tipos de externalización con que cuenta la DAGC son tres.

- Libre. Donde cualquier entidad inscrita en el portal de Chilecompra⁴ puede postular al proyecto.
- Invitación a privados. Donde la DGAC puede invitar al menos 3 empresas inscritas en Chilecompra a participar en un proceso de externalización.
- Asignación directa. En casos muy excepcionales y referentes típicamente a repuestos altamente tecnológicos como es el caso de los camiones de emergencia del SEI.

³Los que en Chile fueron en un comienzo funcionarios de la Fuerza Aérea y en la actualidad técnicos civiles preparados en la escuela de aeronáutica.

⁴Sistema de licitación pública que busca la probidad y transparencia en estas materias.

El caso que se hace referencia en esta memoria corresponde a la invitación a privados o asignación directa, básicamente por la complejidad del activo fijo.

Las etapas de la externalización son agobiantes y burocráticas. Desde la perspectiva de la DGAC son:

- Verificación de existencia de fondos.
- Confección de bases administrativas.
- Confección de especificaciones técnicas.
- Oficio de solicitud de presupuesto.
- Resolución de nombramiento de comisión de apertura y estudio de presupuesto.
- Informe de adjudicación.
- Comunicación a contratista adjudicados y no adjudicados.
- Convenio de trato directo formado por jefe de unidad – en este caso jefe de aeródromo – y contratista.
- Resolución de adjudicación y nombramiento de inspector fiscal.
- Acta entrega terreno.
- Protocolización de transcripción de contratista ante notario y entrega de una boleta de garantía de un 5 % en un determinado banco a nombre la DAGC, esta tiene por objeto proteger a la DAGC de deficiencias en el trabajo realizado entre el término de estos y la recepción final, cobrables cuando el proveedor no responde.
- Cancelación de estado de pago con retención del 10 % hasta completar la retención estipulada en base.
- Informe técnico de inspector fiscal anunciando termino de la obra.
- Nombramiento de comisión de recepción provisional.
- Devolución de las retenciones (10 %).

- Resolución de nombramiento de comisión de recepción definitiva y recepción definitiva.
- Acta de recepción definitiva.
- Redacción de fin de contrato.
- Resolución que aprueba la liquidación del contrato y acta de recepción.
- Protocolización del liquidación de contrato notarialmente.
- Devolución del 5 % de boleta de garantía.

En ocasiones, se puede exigir una boleta en el estado temprano de la licitación conocida como “de seriedad”, la que pretende generar un desincentivo a la no variación de parte del proveedor del contrato firmado, evitaría que este se “bajara” de la propuesta, argumente errores de costo para cobrar un mayor precio y aumentar su beneficio. Por otro lado, la ley faculta a la DGAC a cobrar una multa conocida como “uno por mil”, correspondiente a pagar la milésima (0,1 %) parte del valor total del proyecto por día de atraso, aplicable cuando el proveedor no realiza el trabajo en una cantidad de días definidos en las bases administrativas de la licitación.

Este tipo de sistema posee vicios, entre los cuales se encuentra.

- La postergación de numerosos aeródromos, ya que la DAP⁵ o la DGAC – según sea el caso – debe asignar los recursos a las necesidades más urgentes, postergando en muchos casos, trabajos necesarios en otros aeródromos.
- Postergación de necesidades. Muchos trabajos pueden ser postergados por ser considerados de poca magnitud, para ser agrupados en partidas de trabajo y formar un proyecto mayor.
- Administración de recursos ineficiente. Dado que la tendencia en la administración pública es ocupar todo el presupuesto anual de un determinado ítem, el remanente de este recurso puede ser ocupado en trabajos de poco impacto.
- Contratistas no comprometidos. La observación de la jefatura del aeródromo de La Florida es que no existe un gran compromiso de parte de los proveedores, debido a que los contratos son

⁵Dirección de aeropuertos, dependiente del Ministerio de Obras Públicas; está encargado del mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria.

por un determinado trabajo y que la boleta de garantía del 5 %, por el escaso valor económico que representa, no constituye un real incentivo a responder por parte del contratistas ante trabajos defectuosos.

- Derivación de recursos y habilidades a actividades que están fuera de *core business*.

8.3. Estimación de los parámetros de la distribución de Weibull

Se recurrió a las bitácoras de mantenimiento de VOR-DME que registra el historial de falla de los últimos años. El modo de falla es la descalibración del equipo.

La tabla obtenida es la siguiente

Cuadro 8.1: Historial de fallas del VOR-DME de los últimos 2 años.

i	t_i [días]	$F(i)$
1	19	0,077
2	25	0,154
3	28	0,231
4	36	0,308
5	38	0,385
6	57	0,462
7	68	0,538
8	72	0,615
9	80	0,692
10	87	0,769
11	103	0,846
12	113	0,923

Aplicando el método de Allen Plait para determinar los parámetros de la distribución de Weibull, donde se tiene que la probabilidad acumulada es

$$F(i) = \frac{i}{n + 1} \quad (8.1)$$

Donde i corresponden a la i -ésima observación y n a la cantidad total de observaciones. Tomando la resolución gráfica tal que

$$x = \ln t \quad y \quad y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} \quad (8.2)$$

Imponiendo $\gamma = 0$, se tiene que

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8.3)$$

Por lo que

$$\begin{aligned} \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} &= \beta \ln t - \beta \ln \eta \\ y &= ax - b \end{aligned}$$

Graficando los valores de la tabla (8.1) se obtiene mediante una recta de ajuste por el métodos de mínimos cuadrados los parámetros de la distribución de Weibull.

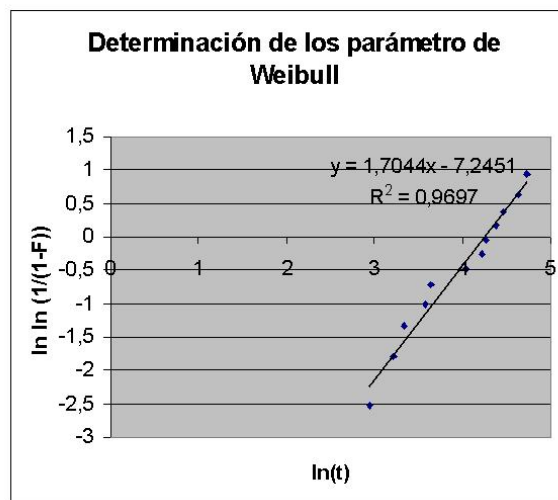


Figura 8.1: Recta que ajusta los valores de la tabla (8.1).

De donde se deduce que $\beta = 1,7$ y $\eta = 70$ días. Dentro del estudio de la distribución de Weibull, cuando el parámetro de forma β es mayor a la unidad se tiene que la tasa del falla del equipo aumenta en forma continua con la edad, lo que indica que el proceso de desgaste comienza cada vez que el equipo es puesto en servicio ($\gamma = 0$).

La función de intensidad del equipo posee el siguiente gráfico

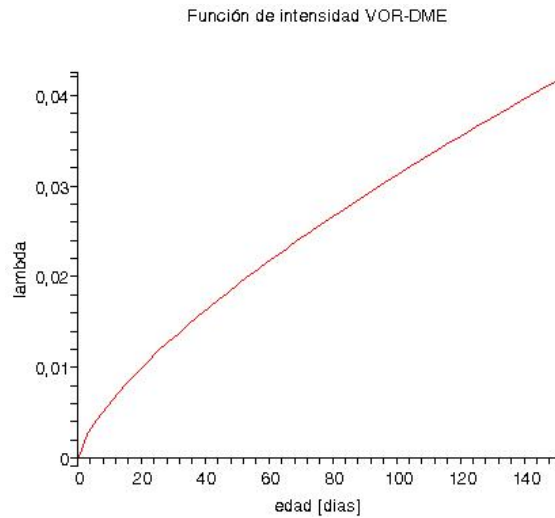
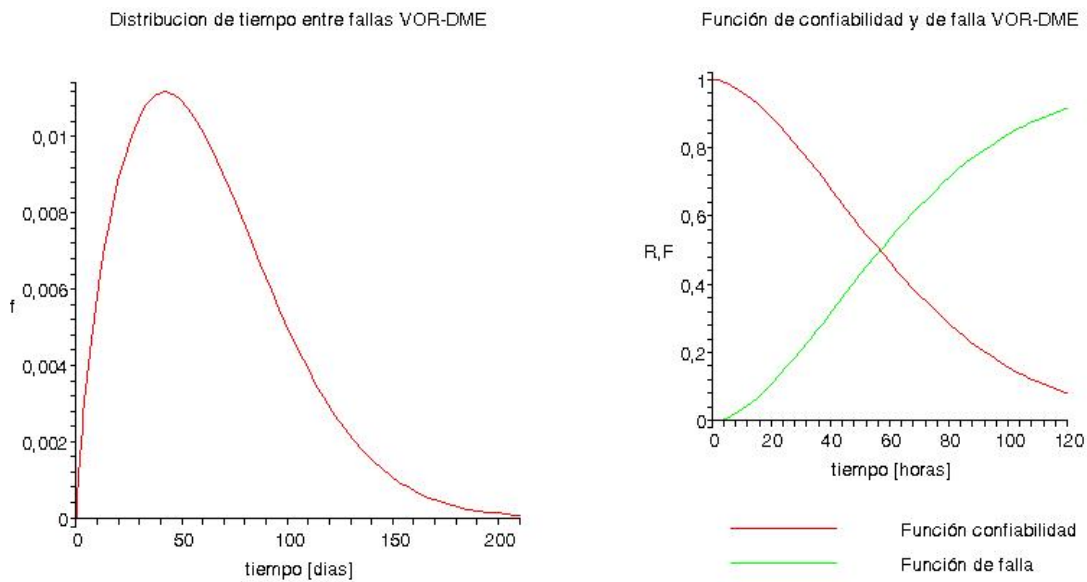


Figura 8.2: Función de intensidad $\lambda(t)$ del VOR-DME.

Mientras que la función distribución de probabilidades del tiempo entre fallas, la confiabilidad del equipo y la probabilidad de falla poseen los siguientes gráficos.



(a) pdf del tiempo entre fallas

(b) Probabilidad de falla y confiabilidad del equipo

Figura 8.3: (a) Función de distribución de probabilidades del tiempo entre fallas; (b) Probabilidad de falla y confiabilidad del equipo dado los parámetros obtenidos.

8.3.1. Test de Kolmogorov-Smirnov

Este test permite evaluar los valores obtenidos con un nivel de seguridad de ϵ . El valor $\tilde{F}(i)$ corresponde a la distribución propuesta que sigue la forma de (8.3).

Cuadro 8.2: Determinación de la diferencia entre distribución propuesta \tilde{F} y $F(i)$; útiles para el test de Kolmogorov-Smirnov.

i	t_i [días]	$F(i)$	$\tilde{F}(i)$	D_i
1	19	0,077	0,101	0,024
2	25	0,154	0,156	0,003
3	28	0,231	0,186	0,044
4	36	0,308	0,271	0,037
5	38	0,385	0,293	0,092
6	57	0,462	0,499	0,037
7	68	0,538	0,606	0,068
8	72	0,615	0,642	0,027
9	80	0,692	0,707	0,015
10	87	0,769	0,758	0,012
11	103	0,846	0,849	0,003
12	113	0,923	0,890	0,033

Donde $D_i = F(i) - \tilde{F}(i)$ y $D_n = \max\{D_i\}$, por lo que $D_n = 0,092$. Tomando un margen de error de $\epsilon = 5\%$, se tiene que $D_{n,5\%} = 0,375$. Concluyéndose que los parámetros de Weibull determinados son estadísticamente verdaderos con una certeza del 95 %.

8.4. EL VOR-DME

Es un equipo electrónico que permite la orientación de las aeronaves a larga distancia emitiendo 360 radiales, uno por cada ángulo; por lo tanto, el error de una pequeña variación angular crece proporcionalmente según la distancia entre el equipo y la aeronave, como consecuencia, una pequeña descalibración pueden llevar a errores de varios kilómetros.

Dado que el valor obtenido en el parámetro de forma de la distribución de Weibull es mayor a la unidad, deja en claro que la edad del equipo forma un elemento principal en las fallas ya que la confiabilidad disminuye en función de esta.

El VOR-DME de Tongoy es denominado de ruta⁶, por su gran potencia y alcance, cercana a las 200 millas. Cuando el VOR-DME está en mantenimiento no trasmite, por lo que es incapaz de guiar de las aeronaves siendo de nula utilidad para la navegación aérea. En este caso, la aeronave es guiada por el radio-faro de Tongoy o un VOR-DME de ruta más distante. Aún cuando la DGAC percibe los ingresos por el servicio de radio-ayuda no lo hace por el aeródromo de La Florida ya que el equipo no está operativo.

Las siglas DME que complementa el VOR, permite agregar información al piloto de la distancia entre la aeronave y el VOR-DME.

8.5. Ingresos

El nivel de ingresos que muestra el aeródromo de La Florida por el uso del VOR-DME son los siguientes

Cuadro 8.3: Muestra los ítemes del VOR-DME existente en la localidad de Tongoy dependiente del aeródromo La Florida.

Item	Origen	Ingresos [<i>pesos/año</i>]
Ingresos	Nacional	20×10^6
	Internacional	120×10^3

Estos ingresos son regulados por ley. La notable diferencia entre los ingresos nacionales e internacionales es que, a la fecha, aviones internacionales no requieren servicio de radio-ayuda por no estar La Florida en su trayecto. En años anteriores, tales ingresos – los internacionales – eran mayores por la existencia de aviación comercial internacional en la zona.

Los ingresos por unidad de tiempo es $\omega = 56100$ pesos por día.

⁶Existen otros VOR-DME llamados de terminal, con un alcance menor cercano a las 80 millas.

8.6. Costos

Según informa la DGAC, los costos anuales respecto al mantenimiento del VOR-DME son los siguientes

Cuadro 8.4: Muestra los ítemes de costos del VOR-DME de la localidad de Tongoy.

Item	Origen	Costos [<i>Mpesos/año</i>]
Costos	Nacional	2.5
	Sueldo	1.5
	Eventos	0.3

Por lo que los costos anuales son 4,8 millones de pesos.

8.7. Beneficios residuales

En la actualidad, el aeródromo de La Florida tiene gastos de mantenimiento de 4,8 millones de pesos anuales e ingresos algo superiores a los 20 millones de pesos. Según Asgharizadeh [1], Salanié [18] y Fisher [6] la diferencia entre los ingresos y costos de mantenimiento in-house será llamada como beneficios residuales, y equivalen a los beneficios esperados ante la elección de A_0 .

Los beneficios residuales son: $U_0 = 15,9 \times 10^6$ pesos al año.

8.8. Variables de decisión

Las variables de decisión que se tienen en este problema, y que serán determinadas para maximizar los beneficios esperados del principal, son las siguientes:

- Precios unitarios. Son los precios de cada intervención preventiva y correctiva, y que serán cobrados al principal. Estas son el resultado del problema principal-agente que nace de la formulación de la teoría de juegos.

- Tiempo entre preventivas T_s . En relación a la subpolítica de mantenimiento preventivo de intervención por bloque (block replacement).
- Edad del equipo T_p . En relación a la subpolítica de intervención por edad (age replacement).
- Subpolítica de mantenimiento preventivo, a saber: intervenciones por bloque o edad (block o age replacement), mediante la maximización de los beneficios esperados.

Existen otras variables que no serán respondidas mediante el análisis técnico-económico, este es el caso de la duración del contrato l . La determinación de esta variable obedece a criterios estratégicos en busca de evitar la fidelización y dependencia de un determinado proveedor.

8.9. Desarrollo de caso (intervención por bloque)

8.9.1. Introducción

En ciertos tipos de equipos mecánicos tiene sentido realizar intervenciones preventivas en fechas determinadas como estrategia de mantenimiento; de modo que las partes conocen – ex-ante – la fecha y la cantidad de estas intervenciones, teniendo como única variable aleatoria la cantidad de intervenciones correctivas. A este tipo de política se le conoce como “block replacement”, aquí traducido como “intervención en bloques”.

El tipo de mantenimiento que se considera en el desarrollo de esta sección es mantenimiento perfecto, lo que significa que después de cada intervención, sea correctiva o preventiva, el equipo es dejado como nuevo.

El desarrollo del modelo propuesto será al amparo de la teoría de renovación.

Los valores para la duración del contrato l y el periodo entre preventivas T_s fueron fijados por la DGAC y serán conservados a lo largo de la memoria.

8.9.2. Expresión analítica de los beneficios

Con el resultado de los capítulos anteriores se puede construir las expresiones para los beneficios esperados del contrato.

Beneficio para la DGAC

Ordenando y reagrupando términos en forma conveniente, se obtiene que

$$E(\pi_p) = \omega l + \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) G(\tau) + \delta G(\tau) - p_c \right) E(n_c) - n_s p_p \quad (8.4)$$

Beneficios para el proveedor

Realizando lo propio respecto al proveedor, se obtiene

$$E(\pi_f) = n_s(p_p - c_p) + E(n_c)(p_c - c_c) - \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) + \delta \right) G(\tau) E(n_c) \quad (8.5)$$

Donde $E(n_c)$ está dada por la ecuación

$$E(n_c) = \sum_{j=0}^{+\infty} j P(N(T_s) = j) \quad (8.6)$$

y

$$P(N(T_s) = n_c) = \Phi\left(\frac{T_s - n_c \bar{T}}{\sigma \sqrt{n_c}}\right) - \Phi\left(\frac{T_s - (n_c + 1) \bar{T}}{\sigma \sqrt{n_c + 1}}\right) \quad (8.7)$$

El gráfico de la expresión (8.7) es el siguiente

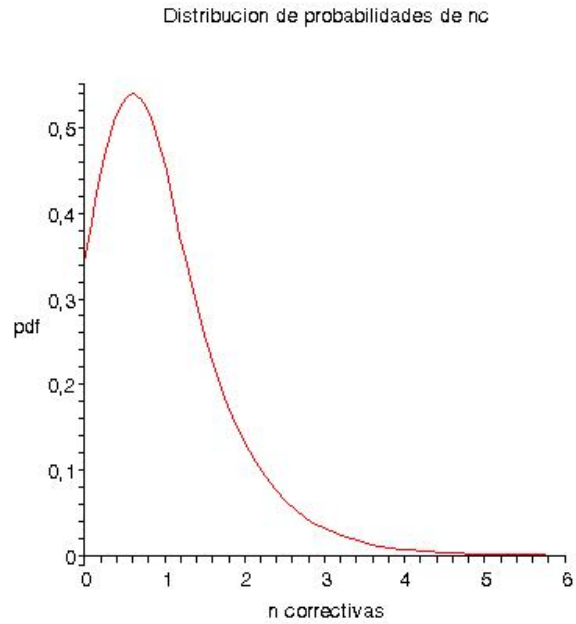


Figura 8.4: Función de densidad de probabilidad de las intervenciones correctivas obtenida desde la teoría de renovación.

Mientras que su función de probabilidad acumulada es

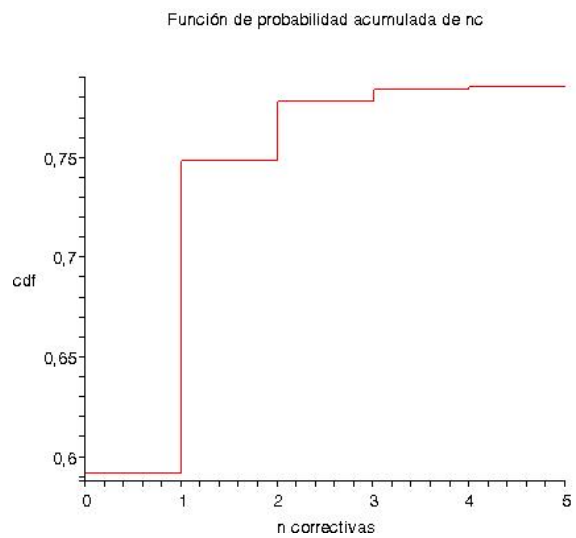


Figura 8.5: Función de densidad acumulada de las intervenciones correctivas en un intervalo de largo T_s .

Las expresiones (8.4) y (8.5) son lineales en los precios, esto se debe a la suposición de la neutralidad frente al riesgo de los actores de la negociación.

8.10. Resultados numéricos

Considerando el caso del VOR-DME de Tongoy cuyos parámetros, bajo una distribución de Weibull, fueron calculados en el presente capítulo, los ingresos y los costos encuestados al mencionado aeródromo.

Para un contrato de $l = 3$ años de duración y los tiempos característicos de las multas 1 y 2 – especificados en las bases administrativas del contrato – son 3,5 y 0,5 horas, respectivamente; determinadas por interés del principal. El tiempo entre preventiva es $T_s = 2,5$ meses.

Los resultados son los siguientes:

Cuadro 8.5: Resultados operacionales bajo la política de intervención por bloque (block replacement).

n_p	n_c	$E(\text{multa}_1)$	$E(\text{multa}_2)$
14	12	3	0.3

8.10.1. Beneficio para el principal

Mediante la ecuación (8.4) se concluye que la función de beneficios esperados para el principal es

$$E(\pi_p) = 6,08 \times 10^7 - 14p_p - 12p_c \quad (8.8)$$

Esta describe un plano en el espacio en función de los precios

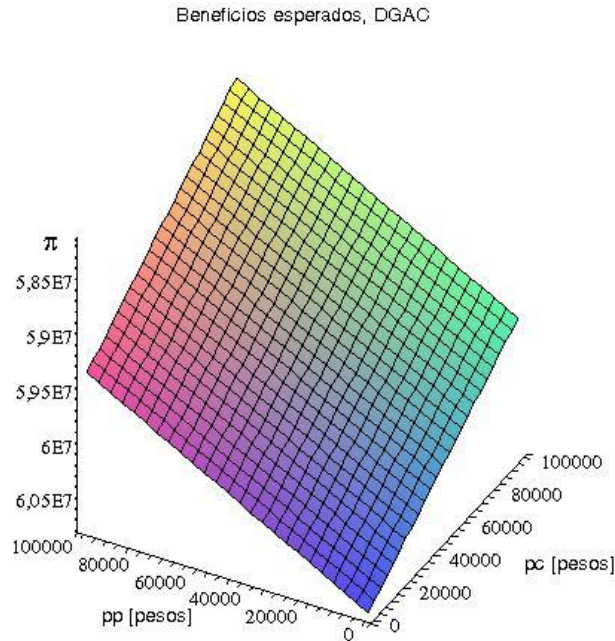


Figura 8.6: Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.

Existirán pares de precios que entregarán beneficios positivos mientras que otros negativos. En los primeros, el contrato se aceptará mientras que en el segundo se rechazará. A la región de aceptación se le llamará B_1 , en tanto que a la región de rechazo: B_0 .

Por lo que cualquier par de precios $(p_p, p_c) \in B_1$, la estrategia para el principal será A_1 . Por otro lado, si $(p_p, p_c) \in B_0$, la estrategia será A_0 . Esto se resume en

$$A^* = \begin{cases} A_1 & ; \text{si } (p_p, p_c) \in B_1 \\ A_0 & ; \text{si ocurre lo contrario} \end{cases} \quad (8.9)$$

Donde A^* es la estrategia óptima. El gráfico de la región de aceptación es

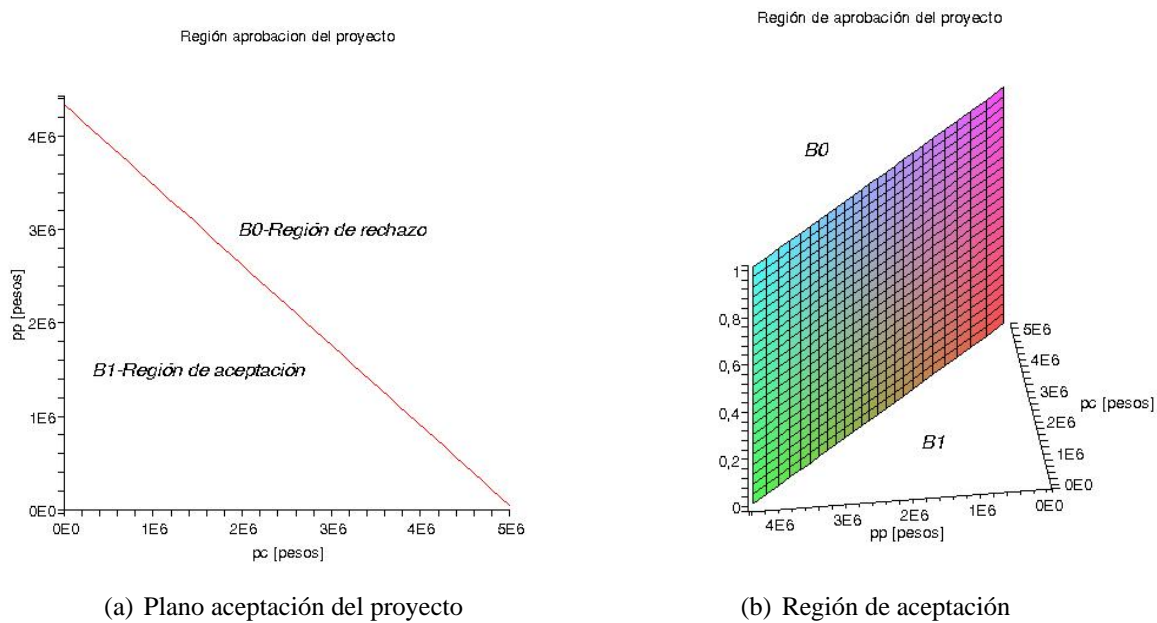


Figura 8.7: (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual la DAGC es una empresa competitiva.

Todos los contratos posibles entre discriminación perfecta y la DGAC como firma competitiva estarán en B_1 , por lo que también podrá ser una región de precios factibles de contratos.

8.10.2. Beneficio para el agente

Los beneficios esperados para el proveedor del servicio son los siguientes

$$E(\pi_f) = 14p_p + 12p_c - 1,72 \times 10^6 \tag{8.10}$$

Esta ecuación define un plano en el espacio en función de los precios. Es natural considerar que este plano está definido para el primer octante del espacio, pues para el proveedor no es rentable que existan beneficios negativos, cosa que si podría ocurrir en el caso de la DGAC como se verá más adelante⁷.

⁷En el caso de máximo presupuesto la DGAC acepta beneficios negativos definidos por la institución ex-ante.

Beneficios esperados proveedor

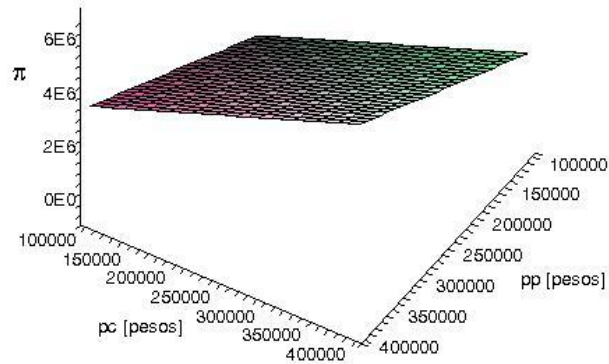


Figura 8.8: Función de beneficios esperados para el proveedor en función de los precios.

Por extensión, el proveedor puede definir una región de aceptación B_1 y de rechazo B_0 , análoga respecto a la DGAC. Se grafica como sigue

Región aprobación del proyecto

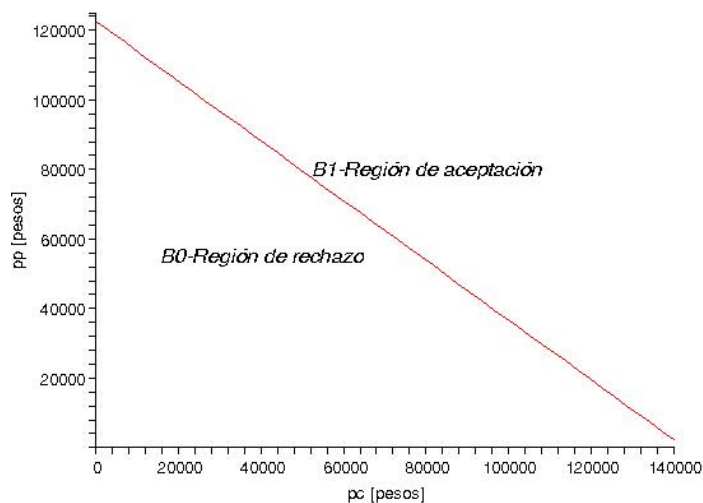


Figura 8.9: En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 .

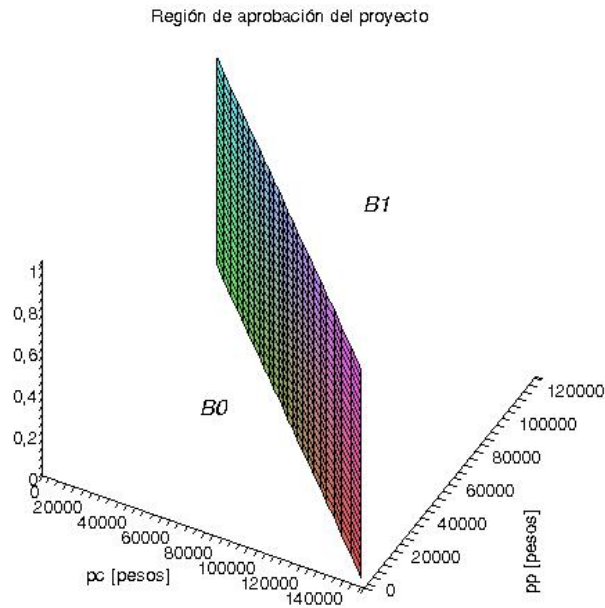


Figura 8.10: La figura muestra la frontera en la cual el proveedor es una firma competitiva.

Por lo tanto, para cualquier par de precios $(p_p, p_c) \in B_1$, el proveedor acepta el contrato A_1 , mientras que si estos están B_0 , se rechaza el contrato por no ser rentable para el proveedor.

8.11. Solución problema principal-agente

Se presentan tres escenarios bajos los cuales se resuelve el problema:

- Discriminación perfecta: La DGAC es capaz de configurar un contrato diseñado para un determinado proveedor.
- Consideración de DGAC como una empresa competitiva: Bajo este escenario quien maximiza sus beneficios es el proveedor del servicio.
- Máximo presupuesto: una de las formas en que la DGAC presenta sus procesos de licitaciones es mediante un máximo presupuesto el que es conocido por los proveedores.

8.11.1. Discriminación perfecta

La DGAC conoce al proveedor de tal forma que es capaz de construir un contrato diseñado para él, de modo que, dada la capacidad de negociación del principal, él puede determinar que el seguidor sea una firma competitiva.

El problema principal-agente se representa como sigue.

$$\begin{aligned}
 & \underset{\{p_p, p_c\}}{\text{máx}} && E(\pi_p) \\
 & \text{s/a} && \\
 & && E(\pi_f) \geq 0 \\
 & && p_c \geq p_p \\
 & && p_c, p_p \geq 0
 \end{aligned} \tag{8.11}$$

Los resultados son los siguientes:

Cuadro 8.6: Resultado del problema principal-agente bajo discriminación perfecta.

p_p [pesos]	p_c [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [pesos]
0	278×10^3	57,1	0

La restricción del problema principal-agente es activa, esto es $E(\pi_f) = 0$ (proveedor competitivo), quien maximiza sus beneficios es la institución.

8.11.2. DAGC competitiva

En este caso la DGAC se impone como una empresa competitiva de modo que la firma que maximiza sus beneficios es la proveedora del servicio.

El proceso de negociación tiene la siguiente representación.

$$\underset{\{p_p, p_c\}}{\text{máx}} \quad E(\pi_f)$$

s/a

$$E(\pi_p) \geq 0$$

$$p_c \geq p_p$$

$$p_c, p_p \geq 0 \tag{8.12}$$

El resultado del problema principal-agente considerando a la DAGC como firma competitiva son los siguientes

Cuadro 8.7: Resultado del problema principal-agente bajo DGAC competitiva.

p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [pesos]
0	3,95	0	57,1

Como es natural y debido a la construcción del modelo los beneficios esperados para la DGAC bajo proveedor competitivo son iguales a los beneficios esperados bajo DGAC competitiva debido a la simetría del problema.

Esta simetría se puede corregir mediante la consideración de la inclusión de un presupuesto de parte del líder.

8.11.3. Máximo presupuesto

Una de las formas que tiene la DGAC de presentar sus contrato es exponiendo su máxima disposición de costos del proyecto. La DGAC propone un presupuesto de 10^7 de pesos en los tres años que dura el contrato.

Esto se representa bajo el siguiente problema principal-agente.

$$\begin{array}{l} \text{máx} \\ \{p_p, p_c\} \\ \text{s/a} \end{array} E(\pi_f)$$

$$\text{presupuesto} + E(\pi_p) \geq 0$$

$$\begin{aligned}
p_c &\geq p_p \\
p_c, p_p &\geq 0
\end{aligned}
\tag{8.13}$$

Los resultados del problema anterior son los siguientes:

Cuadro 8.8: Resultado del problema principal-agente bajo máximo presupuesto.

p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
0	4,6	-10^7	67,1

Como es natural, corresponde al escenario de mayor beneficio para el seguidor y el de mayor costo para la DGAC que correspondería al presupuesto destinado por el proyecto.

8.12. Análisis de sensibilidad

Se estudiarán las variaciones de los beneficios en función de los parámetros: duración del contrato l y variación mensual del periodo entre preventivas T_s .

8.12.1. Duración del contrato l

Una de las estrategias que puede considerar la DGAC es la duración del contrato, esto tiene una repercusión en los ingresos como también en la cantidad de intervenciones preventivas y correctivas. Desde una perspectiva estratégica la DGAC debe estudiar la prolongada relación con un único proveedor del servicio de mantenimiento para evitar una peligrosa dependencia.

Beneficio DGAC

Se contrasta la variación de los beneficios de la externalización del servicio frente a realizarlo in-house ante variaciones anuales de la duración del contrato.

Para periodos de duración interanuales se considera que la función de beneficios es suave.

Cuadro 8.9: Variación de los beneficios en virtud de los cambios de la duración del contrato.

l [años]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	U_0 [M pesos]
1	19,1	15,9
2	38,1	31,8
3	57,1	47,7
4	76,1	63,6
5	95,1	79,5
6	114,2	95,4

La tabla anterior genera el siguiente gráfico

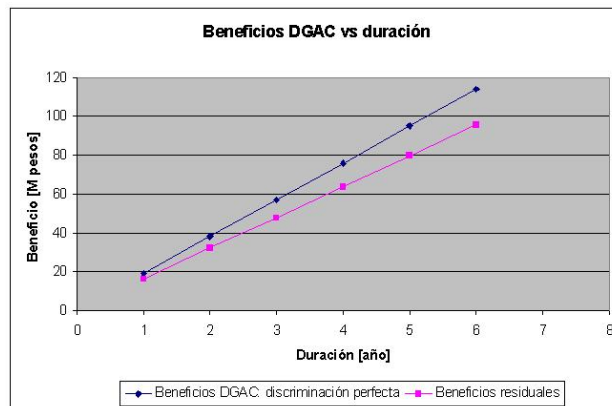


Figura 8.11: Variación de los beneficios del cliente y sus beneficios residuales. Es notorio el incremento de los beneficios respecto a l .

Como se observa en la figura, el valor esperado del proyecto de externalizar es mayor a los beneficios residuales. Desde esta perspectiva es conveniente realizar la subcontratación.

Beneficio proveedor

Se estudia la variación de los beneficios del proveedor en virtud de la variación anual de la duración del contrato bajo los escenarios DGAC competitivo y de máximo presupuesto.

Cuadro 8.10: Variación de los beneficios del proveedor en virtud de los cambios de la duración del contrato.

l [años]	$E(\pi_f \text{DGAC comp})$ [M pesos]	$E(\pi_f \text{max presup})$ [M pesos]
1	19.1	22.9
2	38.1	44,8
3	57,1	67,1
4	76,1	89.5
5	95,1	111.8
6	114,2	134.2

De la tabla anterior se obtiene el siguiente gráfico

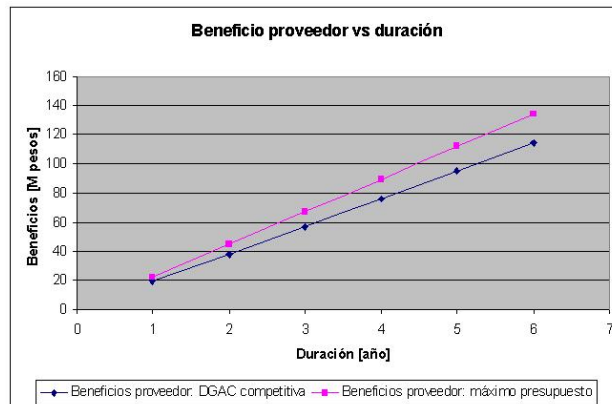


Figura 8.12: Variación de los beneficios del proveedor respecto a los escenarios de DGAC competitiva y máximo presupuesto en relación a la variación de l .

Como es natural, bajo máximo presupuesto los beneficios son mayores, esta es una situación común dentro de las propuestas de la DGAC donde la institución determina una cota máxima de los costos del proyecto, como consecuencia los proveedores interesados fijan precios y beneficios entre proveedor competitivo (de beneficios nulos) y de máximo presupuesto.

8.12.2. Variación de T_s

El valor del periodo entre preventivas T_s condiciona los beneficios esperados; por un lado, cuando T_s es grande el modelo tenderá a mantenimiento correctivo, semejante al modelo de Asgharzadeh [1]⁸, mientras que cuando T_s decrece la cantidad de intervenciones preventivas puede ser exagerada.

Beneficios DGAC

La variación de los beneficios del principal varía con el tiempo entre intervenciones preventivas T_s . En efecto, existe una repercusión entre la cantidad de intervenciones preventivas y la cantidad de fallas en ese periodo.

Los resultados son los siguientes

Cuadro 8.11: Variación de los beneficios del cliente en virtud de los cambios de la duración de T_s .

T_s [meses]	$E(\pi_p)$ [M pesos]
1,00	55,8
1,25	56,4
1,50	56,7
1,75	56,9
2,00	57,0
2,25	57,0
2,50	57,1
2,75	57,1
3,00	57,1
3,25	57,1
3,50	57,2
3,75	57,2

La tabla anterior representa el siguiente gráfico

⁸Considera mantenimiento correctivo bajo una distribución de probabilidad de tiempo entre fallas exponencial.

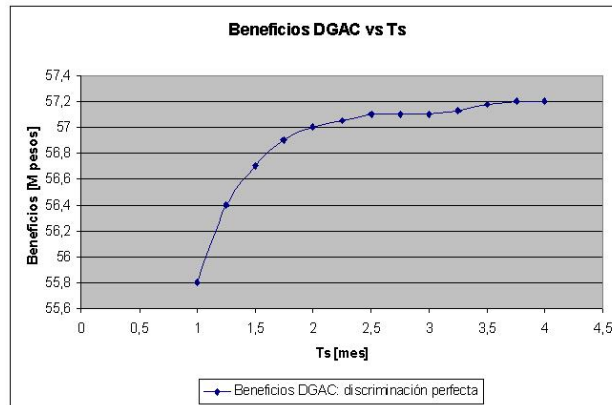


Figura 8.13: Variación de los beneficios del cliente en la medida que varía el periodo entre intervenciones preventivas.

En la figura (8.13) se constata que en la medida que T_s crece, aumentan los beneficios esperados para el cliente. Por lo tanto, el modelo desde la perspectiva técnico-económica conviene derivarlo a mantenimiento correctivo, ya que para $T_s \geq 4$ meses la confiabilidad del equipo es menor al 10 % y la política como tal deja de tener sentido.

De perseverar en la intención de aplicar la política de intervención por bloque el análisis que debe primar es el estratégico.

Beneficio proveedor

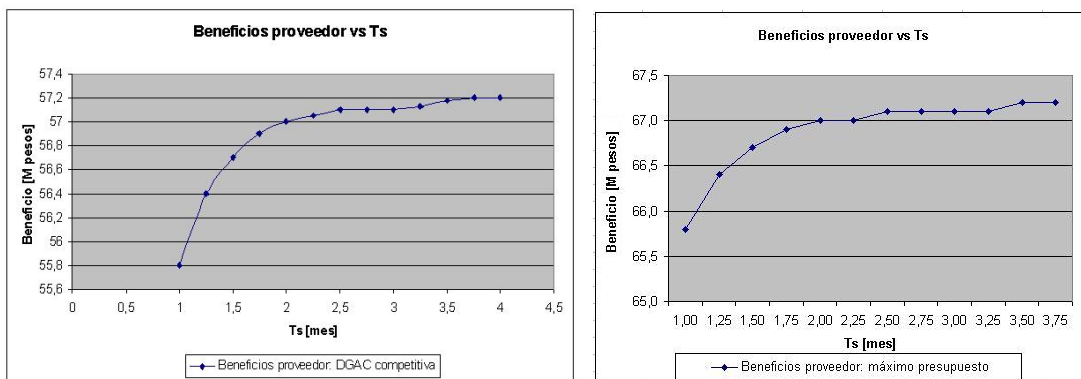
Una optimización de T_s no solo puede traer repercusiones positivas para el principal sino que también para el proveedor del servicio, ya que este no destinará recursos innecesarios para satisfacer las necesidades de la DGAC.

La variación de los beneficios del proveedor en virtud de la variación de T_s bajo los escenarios de DAGC competitivo y máximo presupuesto son los siguientes.

Cuadro 8.12: Variación de los beneficios del proveedor en virtud de los cambios del periodo entre preventivas T_s .

T_s [meses]	$E(\pi_f \text{DGAC comp})$ [M pesos]	$E(\pi_f \text{max presup})$ [M pesos]
1,00	55,8	65,8
1,25	56,4	66,4
1,50	56,7	66,7
1,75	56,9	66,9
2,00	57,0	67,0
2,25	57,0	67,0
2,50	57,1	67,1
2,75	57,1	67,1
3,00	57,1	67,1
3,25	57,1	67,1
3,50	57,2	67,2
3,75	57,2	67,2

La tabla anterior se representa como los siguientes gráficos.



(a) Beneficios proveedor bajo DGAC competitiva (b) Beneficios proveedor bajo máximo presupuesto

Figura 8.14: La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor en relación con la variación de T_s : (a) resolución del problema principal-agente bajo DGAC competitiva, (b) resolución bajo máximo presupuesto.

Al igual que en el análisis de sensibilidad de l , los mayores beneficios se esperan para la situación del máximo presupuesto. Para el proveedor también es más rentable postergar las preventivas lo más posible.

8.13. Conclusiones

Desde la perspectiva técnico-económica y bajo el escenario de discriminación perfecta, el valor esperado de los beneficios es siempre mayor que los beneficios residuales, en particular para los valores propuestos en las bases administrativas; en atención a esto, la posición de la DGAC es aceptar el contrato, esto es A_1 .

En relación a los datos expuestos originalmente en las bases administrativas del contratos, estos son:

- Duración del contrato, $l = 3$ años.
- Tiempo entre preventivas, $T_s = 2,5$ meses.
- Tiempo característico de multa 1, $\tau = 3,5$ horas.
- Tiempo característico de multa 2, $\theta = 0,5$ horas.

El resultado del problema principal-agente bajo el escenario de discriminación perfecta entrega los siguientes resultados:

Cuadro 8.13: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de discriminación perfecta.

p_p [pesos]	p_c [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [pesos]
0	$2,78 \times 10^5$	56.7	0

Este par de precios está dentro de la regiones B_1 para ambas partes por lo que, en una primera aproximación, las partes deberían inclinarse por A_1 .

En relación a la determinación de los precios y el beneficios esperados para las partes, bajo los escenarios de DGAC competitiva y máximo presupuesto, con los datos originales expuestos en las bases administrativas. Se obtiene

Cuadro 8.14: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de DGAC competitiva y máximo presupuesto.

Escenario	p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
DAGC competitiva	0	4.76	0	56.7
Máximo presupuesto	0	5.54	-10^7	66.7

En lo que respecta a la definición del contrato óptimo; la determinación de l se debe realizar bajo análisis estratégico, pues si bien es cierto que la valorización del proyecto crece con el tiempo, la DGAC debe de evitar la dependencia y la pérdida de habilidades en la delegación de tal proceso.

Respecto a T_s , se observa que desde la perspectiva del análisis técnico-económico, resulta atractiva para ambas partes retardar las intervenciones preventivas, llevando al modelo a una estrategia de externalización de mantenimiento correctivo. En efecto, los beneficios esperados para la DGAC en el outsourcing de mantenimiento correctivo son 57,4 millones de pesos. Nuevamente, la determinación de T_s debe estar en consideración a los consejos de proveedor del equipo (OEM), normativas y políticas locales o corporativas.

Si se considera que la DGAC no define un presupuesto, los escenarios extremos serán: discriminación perfecta y DGAC competitiva. Luego, los precios y los beneficios de una negociación real estarán entre los encontrados en estos escenarios, mientras que si la DGAC define un presupuesto máximo, los escenarios extremos serán: discriminación perfecta y máximo presupuesto; los precios y los beneficios reales se encontrarán entre estas dos cotas.

8.14. Desarrollo de caso (intervención por edad)

A diferencia del modelo presentado en la sección anterior, donde las fechas de las intervenciones preventivas están determinadas ex-ante; aquí corresponden a elementos estocásticos. Este modelo considera que se debe realizar mantenimiento preventivo a T_s unidades de tiempo desde la

última intervención, sea esta correctiva o preventiva, en este sentido, T_s representa otro concepto al manifestado en block replacement, por lo que será llamado T_p .

Bajo dicha consideración, tanto las intervenciones preventivas como correctivas son eventos estocásticos.

Los beneficios de la partes están dadas por la diferencias entre los ingresos y egresos del proyecto en virtud de agentes económicos neutros al riesgo. A diferencia del modelo anterior, donde los ingresos para el proveedor y costos para la DGAC por las intervenciones preventivas estaba dado por $n_s p_p$; bajo la política de intervención por edad, donde la cantidad de intervenciones preventivas es estocástica, los ingresos o egresos –según corresponda– por este ítem son $E(n_p) p_p$, donde $E(n_p)$ representa el valor esperado de eventos preventivos en el intervalo $[0, l]$.

En relación a los ingresos esperados por las intervenciones correctivas poseen la misma forma expuesta en el capítulo anterior $E(n_c) p_c$ donde la innovación viene dado por el proceso de conteo de n_c . La estructura de multa no varía de forma respecto al modelo anterior, aún cuando sí en su expresión analítica debido a la modificación del proceso de conteo de n_c .

8.14.1. Proceso de conteo de n_p

La probabilidad de las fallas preventivas se obtiene mediante una distribución binomial, está dada por

$$P(n_p) = \binom{n_s}{n_p} R^{n_p} (1 - R)^{n_s - n_p} \quad (8.14)$$

Por lo que la esperanza será

$$E(n_p) = \sum_{n_p=0}^{n_s} n_p P(n_p) \quad (8.15)$$

8.14.2. Proceso de conteo de n_c

La duración del contrato es fijada por el cliente al igual que el tiempo en el cual hay que realizar una intervención preventiva, a estas se le llama:

- l , duración del contrato.
- T_p , tiempo en el cual hay que realizar el mantenimiento preventivo después de cualquier intervención.

Por lo tanto, la cantidad máxima de intervenciones preventivas son: $n_s = \lfloor l/T_p \rfloor$, por lo que $n_p = \{0, \dots, n_s\}$. Además se cumple que $l - n_s T_p \geq 0$

Por lo tanto, la cantidad de intervenciones correctivas estará dado por

$$E(n_c | n_p) = \frac{l - n_p T_p}{\bar{T}} \quad (8.16)$$

Luego, el valor esperado de n_c será

$$E(n_c) = \sum_{j=0}^{n_s} \frac{l - j T_p}{\bar{T}} P(n_p = j) \quad (8.17)$$

8.14.3. Determinación de multa 1

La expresión que caracteriza a la multa tipo 1 es

$$E(\text{multa}_1 | m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} H_{y_j + \tau}(x_j^i + y_j) \quad (8.18)$$

Su expresión final es

$$E(\text{multa}_1) = G(\tau) E(n_c) \quad (8.19)$$

Donde $G(\tau) = e^{-\mu\tau}$ corresponde a la probabilidad de que el tiempo de intervención sea mayor que τ .

8.14.4. Determinación de multa 2

La expresión analítica que define a esta multa es tomada de Asgharizadeh [1]

$$E(\text{multa}_2|\tilde{n}, m, n_c) = \sum_{j=1}^{n_c} \text{máx} \{0, y_j - \tau - \theta\} \quad (8.20)$$

Finalmente, la esperanza de la ocurrencia de la multa 2 es

$$E(\text{multa}_2) = G(\tau)G(\tau + \theta)e^{-2\mu(\tau+\theta)} \left(\frac{\mu(\tau + \theta) + 1}{\mu} \right) E(n_c) \quad (8.21)$$

Donde $G(\tau + \theta) = e^{-\mu(\tau+\theta)}$ es la probabilidad de que el tiempo de intervención $y \geq \tau + \theta$.

8.14.5. Beneficios para los agentes

El valor esperado para los beneficios de los agentes económicos es como sigue

Beneficios para el principal

Mediante el resultado de las secciones anteriores y la ecuación (4.11) el valor esperado de los beneficios son

$$E(\pi_p) = \omega l + \delta E(\text{multa}_1) + \alpha E(\text{multa}_2) - p_p E(n_p) - p_c E(n_c) \quad (8.22)$$

Reemplazando los valores se obtiene

$$E(\pi_p) = \omega l + \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta)G(\tau) + \delta G(\tau) - p_c \right) E(n_c) - E(n_p)p_p \quad (8.23)$$

Beneficios para el seguidor

Por medio de la ecuación (4.12), la marginalización esperada de las intervenciones correctivas y preventivas, y el valor esperado de las multas, permite concluir que los beneficios esperados son

$$E(\pi_f) = (p_p - c_c) E(n_p) + (p_c - c_c) E(n_c) - \delta E(\text{multa}_1) - \alpha E(\text{multa}_2) \quad (8.24)$$

Sustituyendo

$$E(\pi_f) = E(n_p)(p_p - c_p) + E(n_c)(p_c - c_c) - \left(\alpha \frac{e^{-\mu(\tau+\theta)}}{\mu} G(\tau + \theta) + \delta \right) G(\tau) E(n_c) \quad (8.25)$$

La diferencia en la forma de los beneficios esperados para las partes en relación al modelo de intervención por bloque, es que estas expresiones incluyen el valor esperado de las intervenciones preventivas por constituir estas un evento estocástico.

8.15. Desarrollo numérico del caso

Como se estableció en los capítulos pasados, los ingresos son $\omega = 56100$ [pesos/día] debido al uso del VOR-DME. También se estableció que los costos anuales son 4,8 millones de pesos, estos serán amplificados por la cantidad de años que se formule el contrato. A esta cantidad se le definirá como los costos en mantenimiento in-house, a la diferencia entre ingresos y costos de mantenimiento in-house se le llamará beneficio residual, lo que significaría en una primera aproximación, que cualquier contrato que signifique beneficios esperados mayores a estos beneficios residuales sería viable desde la perspectiva económica.

Las cantidades δ y α , que definen a las multas tipo 1 y tipo 2, respectivamente, se cuantifican como sigue:

- δ : corresponde al 0,5 % de los costos de mantenimiento in-house. Esta cantidad es una proposición pues no existe esta multa en el mercado.
- α : corresponde a la actual multa de “uno por mil” (de los costos de mantenimiento in-house), definida por la actual ley de licitación del organismos públicos.

Los tiempos característicos θ y τ que definen a las multas 1 y 2, quedan como sigue.

- τ : Se define como una hora más de la estimación del MTTR por parte de la DGAC, por lo que $\tau = 3,5$ horas.

- θ : Es igual a 0,5 horas, de modo esta multa comienza a hacerse efectiva después de 4 horas en que el equipo no está en estado operativo.

Respecto a los costo propios del proveedor, la DGAC no posee esta información, pero ella estima que los costos correctivos, c_c , son el tiempo medio de reparación (MTTR=2.5 horas) por los costos de las horas hombre del proveedor, estimadas en 32×10^3 pesos, más el arriendo de equipos equivalentes a 10^5 pesos. Los costos preventivos, c_p , se estiman como el 50 % de los costos correctivos.

Resultados

Bajo los valores expresados en: la duración de contrato (I), tiempo de aplicación de intervención preventiva (T_p), tiempos característicos de las multas 1 y 2 (τ y θ), definidos en las bases administrativas se obtiene los siguientes resultados

Cuadro 8.15: Resultados operacionales bajo la política de intervención por edad (age replacement).

$E(n_p)$	$E(n_c)$	$E(\text{multa}_1)$	$E(\text{multa}_2)$
4.6	11.8	3	0

8.16. Beneficio para las partes

Mediante las ecuaciones (8.23) y (8.25) y la sección anterior, se puede entregar una función de beneficios esperados.

8.16.1. Beneficio para la DGAC

Los beneficios esperados para la DGAC (principal) mediante (8.23) son

$$E(\pi_p) = 6,08 \times 10^7 - 4,6p_p - 11,8p_c \quad (8.26)$$

Esta ecuación define el siguiente plano en el espacio

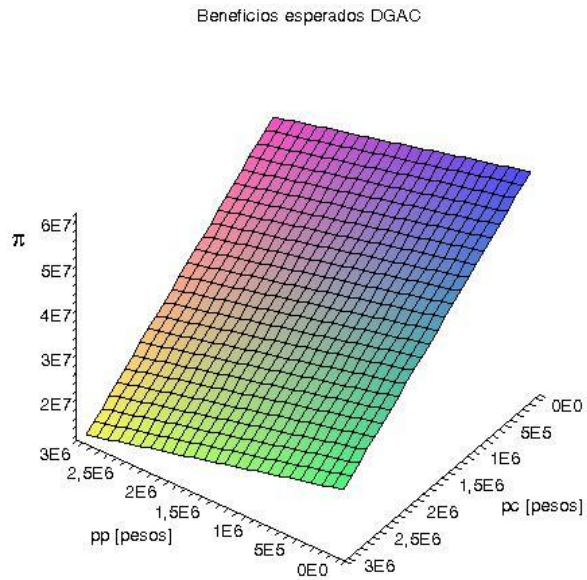


Figura 8.15: Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.

Al igual que la sección anterior se define una región de aceptación B_1 . La que queda definida como

$$B_1 = \{(p_p, p_c) : 6,08 \times 10^7 - 4,6p_p - 11,8p_c \geq 0\} \quad (8.27)$$

Donde su representación gráfica es.

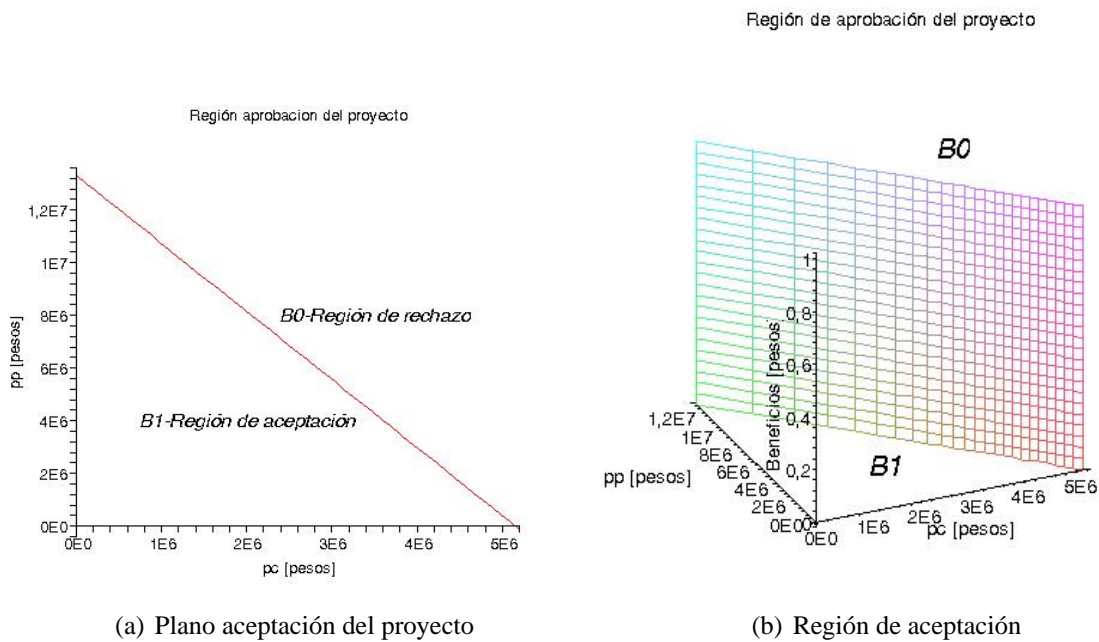


Figura 8.16: (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual la DAGC es una empresa competitiva.

Luego la estrategia óptima A^* está definida como sigue

$$A^* = \begin{cases} A_1 & ; \text{si } (p_p, p_c) \in B_1 \\ A_0 & ; \text{si } (p_p, p_c) \in B_0 \end{cases} \quad (8.28)$$

Donde B_0 es la región de rechazo.

8.16.2. Beneficio para el proveedor

Mediante la ecuación (8.25) los beneficios para el proveedor son

$$E(\pi_f) = 4,6p_p + 11,8p_c - 2,72 \times 10^6 \quad (8.29)$$

Su representación gráfica en el espacio es

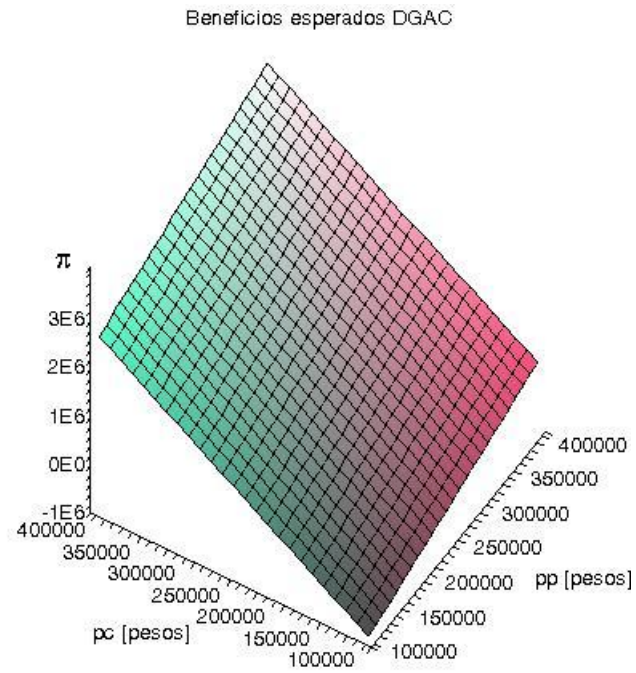
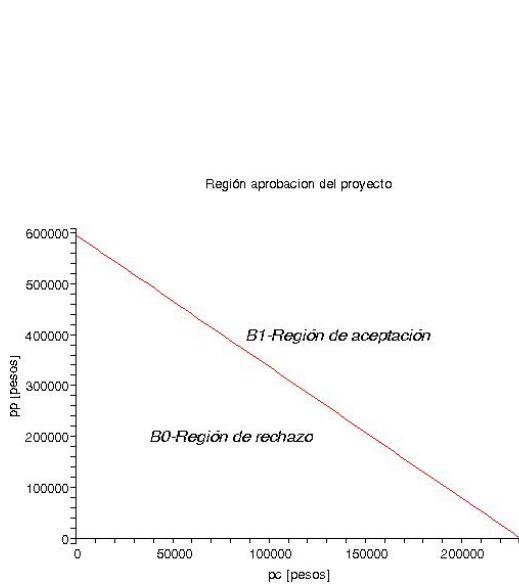
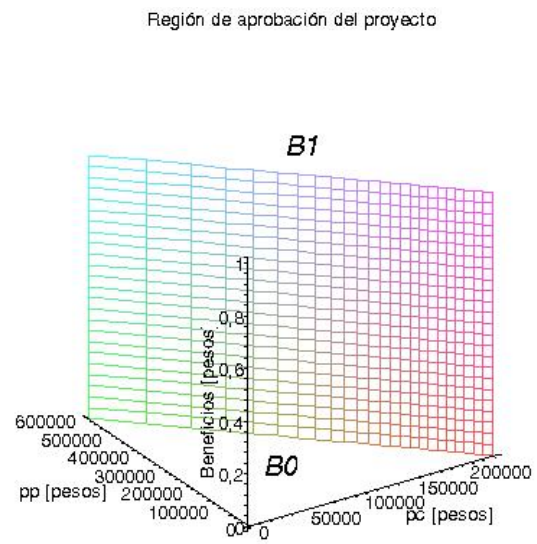


Figura 8.17: Función de beneficios esperados para la DGAC en función de los precios.

Su región de aceptación es



(a) Plano aceptación del proyecto



(b) Región de aceptación

Figura 8.18: (a) En la figura se muestra la región B_1 en donde se acepta A_1 y la región B_0 donde se elige A_0 ; (b) En esta figura muestra la frontera en la cual el proveedor es una firma competitiva.

8.17. Solución problema principal-agente

La estrategia de resolución del problema principal-agente puede desarrollarse de distintas formas. En este informe se consideran:

- Discriminación perfecta de parte de la DGAC frente a un proveedor del servicio.
- DAGC se asume como una firma competitiva.
- La determinación de un máximo presupuesto donde el agente maximiza su beneficio.

8.17.1. Discriminación perfecta

Esto quiere decir que el principal puede definir un contrato diseñado para un determinado proveedor, lo que se representa como un problema de optimización donde el líder maximiza su utilidad sujeto a la satisfacción de la restricción de participación del proveedor.

El problema principal-agente es el siguiente

$$\begin{aligned}
 & \underset{\{p_p, p_c\}}{\text{máx}} && E(\pi_p) \\
 & \text{s/a} \\
 & && E(\pi_f) \geq 0 \\
 & && p_c \geq p_p \\
 & && p_c, p_p \geq 0
 \end{aligned} \tag{8.30}$$

La resolución de este problema muestra que la restricción de participación es activa, lo que implica $E(\pi_f) = 0$, lo que lleva a que el proveedor es una firma competitiva.

Cuadro 8.16: Resultado del problema principal-agente bajo discriminación perfecta.

p_p [pesos]	p_c [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
0	231×10^3	58,1	0

8.17.2. DGAC competitiva

A continuación se presenta la resolución del problema tal que la DGAC es una empresa competitiva, de modo que quien maximiza los beneficios es el proveedor.

La situación se grafica como el siguiente problema de optimización con restricción

$$\begin{aligned}
 & \underset{\{p_p, p_c\}}{\text{máx}} && E(\pi_f) \\
 & \text{s/a} && \\
 & && E(\pi_p) \geq 0 \\
 & && p_c \geq p_p \\
 & && p_c, p_p \geq 0
 \end{aligned} \tag{8.31}$$

La restricción sobre los beneficios se vuelve activa, esto es $E(\pi_p) = 0$. Los resultados son los siguientes:

Cuadro 8.17: Resultado del problema principal-agente bajo la consideración de DGAC competitiva.

p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
0	5,16	0	58,1

8.17.3. Situación de máximo presupuesto

En ocasiones la DGAC en sus procesos de licitación define un valor máximo de presupuesto a pagar por un determinado trabajo, el cual es conocido por los proveedores del servicio.

Frente al caso de un proveedor del servicio el problema que resuelve este es el siguiente

$$\begin{aligned}
 & \underset{\{p_p, p_c\}}{\text{máx}} && E(\pi_f) \\
 & \text{s/a} &&
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E(\pi_p) + \text{presupuesto} &\geq 0 \\
p_c &\geq p_p \\
p_c, p_p &\geq 0
\end{aligned}
\tag{8.32}$$

Como es natural suponer, los precios son más elevados que en los problemas (8.30) y (8.31). Esto se debe a la disponibilidad de parte del principal de admitir un costo mayor por el uso del contrato. Esto se justifica desde la perspectiva de los beneficios estratégicos del outsourcing.

Los resultados son los siguientes:

Cuadro 8.18: Resultado del problema principal-agente bajo la consideración de máximo presupuesto.

p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
0	6	-10	68,1

8.18. Análisis de sensibilidad

Se evalúa la variación de la esperanza de los beneficios frente a variaciones de importantes parámetros; entre ellos: duración del contrato l y máximo tiempo entre intervenciones T_p .

8.18.1. Duración del contrato l

Un importante parámetro de los contratos es la duración de él, l . Se estima $\frac{dE(\pi_p)}{dl} > 0$. Evaluando para distintas magnitudes de l se puede construir la tabla (8.19) bajo el problema principal-agente de proveedor competitivo. La variación de l no solo tiene consecuencias en el resultado del ejercicio sino que también en la organización completa por los lazos que se pueden formar con el proveedor.

Beneficios de la DGAC

Es de esperar que los beneficios aumenten con la duración del contrato pero también el grado de fidelización lo que puede crear dependencia.

Cuadro 8.19: Variación de los beneficios de las DGAC bajo discriminación perfecta.

l [años]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	U_0 [M pesos]
1	19,3	15,9
2	38,7	31,8
3	58,1	47,7
4	77,4	63,6
5	96,8	79,5
6	116,0	95,4

La representación gráfica de la tabla anterior es la siguiente

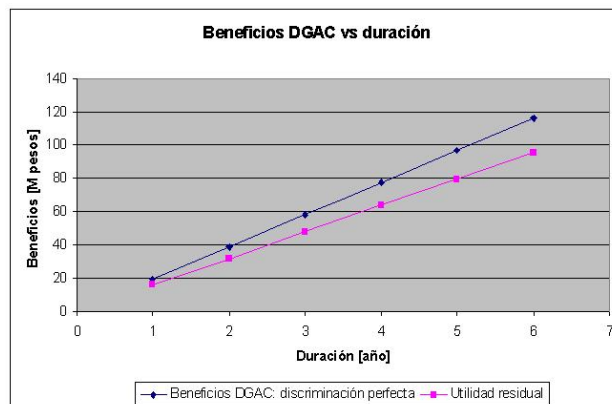


Figura 8.19: La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para la DAGC.

Al igual que el caso anterior los beneficios esperados son mayores a la utilidad esperada U_0 . En relación al contraste entre intervención por bloque y edad (block y age replacement), se observa que en este último tipo de subpolítica los beneficios son mayores, por lo se vuelve más atractiva para el cliente. Es necesario desarrollar la perspectiva estratégica para la decisión sobre la cual será la duración del contrato a escoger.

Beneficio proveedor

La variación de los beneficios del proveedor frente a l

Cuadro 8.20: Variación de los beneficios del proveedor bajo DGAC competitiva y máximo presupuesto.

l [años]	$E(\pi_f \text{DGAC comp})$ [M pesos]	$E(\pi_f \text{max presup})$ [M pesos]
1	19,3	22,7
2	38,7	45,4
3	58,1	68,1
4	77,4	90,8
5	96,8	113,4
6	116,0	136,0

La representación gráfica es la siguiente

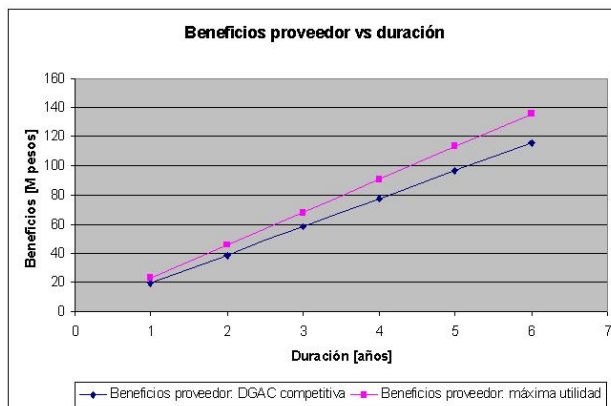


Figura 8.20: La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor bajo los escenarios de DGAC competitiva y máximo presupuesto.

Sigue siendo el escenario más favorable para el proveedor el correspondiente a máximo presupuesto. Es natural argumentar que mientras más prolongado sea el contrato mayor será la valoración del proyecto para el proveedor.

8.18.2. Variación de T_p

El máximo tiempo de espera desde la última intervención es T_p el cual es fijado en las bases administrativas del contrato. La variación de este parámetro conlleva variaciones en los beneficios los que no tienen por qué ser lineales como el caso de l .

Se han considerado valores de T_p tal que puedan representar semanas, es de esperarse que para variaciones continuas las función beneficios se comporte suavemente.

Beneficio de la DGAC

La variación de T_p tiene efectos sobre los beneficios que queda registrado en la siguiente tabla

Cuadro 8.21: Variación de los beneficios de la DGAC frente a la variación de T_p .

T_p [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]
1,00	57,39
1,25	57,85
1,50	58,09
1,75	58,16
2,00	58,20
2,25	58,15
2,50	58,07
2,75	58,00
3,00	57,88
3,25	57,86
3,50	57,78
3,75	57,72
4,00	57,68

El gráfico representativo de la tabla anterior es el siguiente

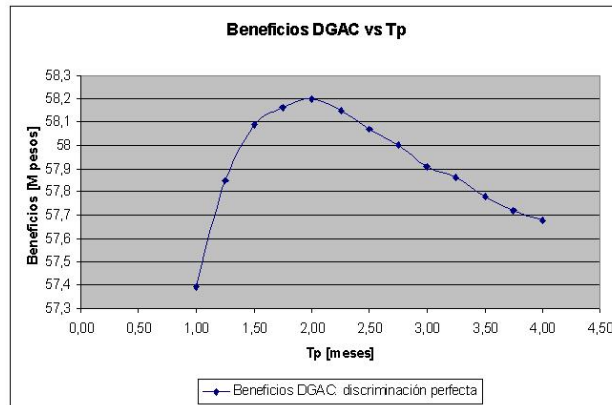


Figura 8.21: La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para la DGAC con discriminación perfecta.

Se observa que para $T_p = 2$ meses los beneficios esperados de la DGAC son máximos, por lo tanto este debe ser el periodo que debe considerar la institución para las intervenciones preventivas. La elección debe ser coherente con las recomendaciones del proveedor del equipo (OEM), disposiciones normativas, posición de los seguros, etc.

En la medida que varía T_p , también lo hace el valor esperado de la ocurrencia de fallas e intervenciones preventivas del equipo. En la medida que T_p aumenta, la confiabilidad del equipo disminuye y el modelo tiende a la externalización de mantenimiento correctivo, por otro lado, si T_p disminuye, la cantidad de intervenciones preventivas podría ser exagerada.

La siguiente tabla muestra las variaciones de las ocurrencias de las fallas y de las intervenciones preventivas

Cuadro 8.22: Variación de n_c y n_p frente a la variación de T_p para un periodo de $l = 3$ años.

T_p	$E(n_c)$	$E(n_p)$	$\epsilon \times 10^{-4}$
1,00	3,6	28,5	3
1,25	5,4	20	74
1,50	6,5	15	17
1,75	8,1	11	41
2,00	9,2	8,4	2
2,25	10,5	6,3	23
2,50	11,8	4,6	33
2,75	12,7	3,5	34
3,00	14	2,2	53
3,25	14,3	2	93
3,50	15	1,4	54
3,75	15,5	1	24
4,00	15,8	0,7	66

El error porcentual ϵ se calcula como sigue:

$$\epsilon = \frac{|l - \bar{T}E(n_c) - T_pE(n_p)|}{l} \quad (8.33)$$

De este valor debería esperarse que, la diferencia absoluta entre la duración del contrato y la suma entre la cantidad de fallas multiplicada por \bar{T} y las intervenciones preventivas por T_p sea pequeña, que es lo que se obtiene en la tabla (8.22).

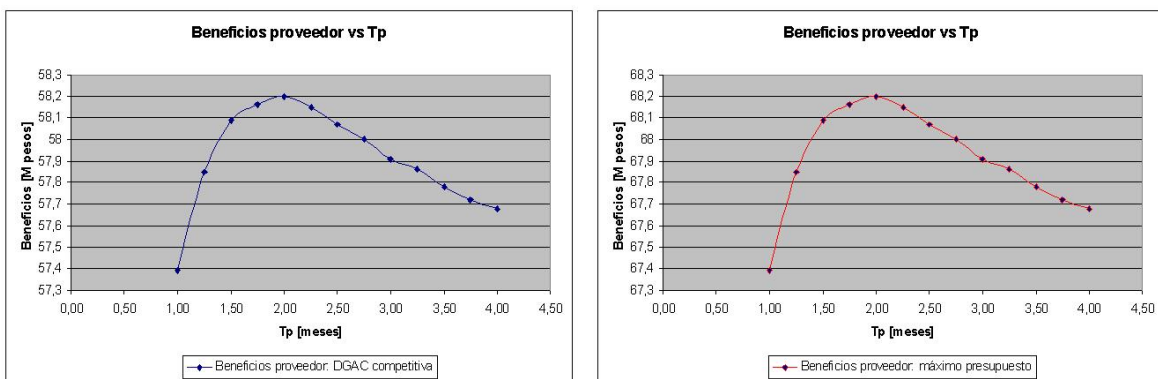
Beneficio proveedor

La variación de los beneficios esperados del proveedor queda representada en la siguiente tabla

Cuadro 8.23: Variación de los beneficios del proveedor frente a la variación de T_s .

T_p [meses]	$E(\pi_f \text{DGAC comp})$ [M pesos]	$E(\pi_f \text{max presup})$ [M pesos]
1,00	57,39	67,40
1,25	57,85	67,80
1,50	58,09	68,09
1,75	58,16	68,16
2,00	58,20	68,20
2,25	58,15	68,15
2,50	58,07	68,07
2,75	58,00	68,00
3,00	57,88	67,88
3,25	57,86	67,86
3,50	57,78	67,80
3,75	57,72	67,72
4,00	57,68	67,70

Su representación gráfica son las siguientes.



(a) Beneficios proveedor bajo DGAC competitiva

(b) Beneficios proveedor bajo máximo presupuesto

Figura 8.22: La figura muestra la dependencia de los beneficios esperados para el proveedor en relación con la variación de T_p : (a) resolución del problema principal-agente bajo DGAC competitiva, (b) resolución bajo máximo presupuesto.

8.19. Conclusión

Desde la perspectiva técnico-económica, el modelo de intervención por edad (age replacement) entrega beneficios esperados mayores a los beneficios residuales U_0 , por lo que sin mediar del análisis estratégico, es de esperarse que la DGAC celebre el contrato (A_1).

En relación a los datos del contratos expuestos en las bases administrativas, estos son:

- Duración del contrato, $l = 3$ años.
- Tiempo máximo sin intervención, $T_p = 2,5$ meses.
- Tiempo característico de la multa 1, $\tau = 3,5$ horas.
- Tiempo característico de la multa 2, $\theta = 0,5$ horas.

Bajo el escenario de discriminación perfecta, los resultados son los siguientes:

Cuadro 8.24: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de discriminación perfecta.

p_p [pesos]	p_c [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [pesos]
0	$2,31 \times 10^5$	58.1	0

La aceptación del contrato se justifica, en una primera instancia, en que los precios obtenidos pertenecen a las respectiva regiones de aceptación B_1 de los agentes económicos.

Desde la perspectiva de los escenarios de DGAC competitiva y máximo presupuesto, la decisión de las partes es más directa pues se asume que la DGAC ya ha realizado un análisis estratégico bajo el cual ha decidido algunos de los dos escenarios propuestos. Por otro lado, la estrategia del proveedor es aceptar el contrato (A_1) pues son los escenarios donde sus beneficios esperados son mayores.

Los resultados son:

Cuadro 8.25: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de DGAC competitiva y máximo presupuesto y los datos primitivos de las bases administrativas.

Escenario	p_p [pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
DAGC competitiva	0	5.16	0	58.1
Máximo presupuesto	0	6	-10^7	68.1

La determinación del periodo T_p^* se obtiene bajo el análisis de sensibilidad. El resultado óptimo muestra que $T_p^* = 2$ meses, en donde se obtiene un valor esperado de los beneficios para el principal de $E(\pi_p) = 58,2$ millones de pesos. Este valor es coincidente para el proveedor del servicio, un menor o mayor valor de T_p implicaría no aprovechar los recursos en forma eficiente.

Con respecto al proveedor, no es necesario que realice un análisis estratégico en relación a T_p^* ; la aceptación del contrato A_1 solo depende de que el par de precios este dentro de su región de aceptación B_1 .

Respecto a la duración del contrato, se debe recurrir al análisis estratégico pues si bien es cierto que crece la valorización del proyecto en la medida que aumenta su duración; se sacrifican con ella el *know how* de la institución, además de comprometerla a los vaivenes e intereses del proveedor, creando un lazo de dependencia con este. Desde la perspectiva del proveedor, en la medida que aumenta l más aumenta su valorización del proyecto, por lo que tendencia es buscar la mayor duración del contrato.

Por lo tanto, los valores de las variables de decisión son:

Cuadro 8.26: Resultados de las variables de decisión bajo el escenario de discriminación perfecta.

Decisión	p_p [pesos]	p_c [pesos]	T_s [meses]	l [años]
A_1	0	$2,77 \times 10^5$	2	a determinar

Al igual que en el modelo de intervención por bloque, los escenarios de: discriminación perfecta y DGAC competitiva, y discriminación perfecta y máximo presupuesto definen dos casos extremos – relativo si la DGAC mediante un análisis estratégico en las etapas tempranas del diseño del proyecto se define como firma competitiva o destina un presupuesto –, por lo que los precios y

los beneficios esperados para las partes en situaciones no tan idealizadas tendrán como cota superior e inferior los escenarios propuestos. La solución de juego tipo Nash (los agentes económicos comparten los excedentes en partes iguales) es un caso particular a lo expresado.

Capítulo 9

Extensiones de los modelos

En el desarrollo de la memoria se han realizado numerosos supuestos, las extensiones naturales que se pueden sugerir son el levantamiento de estos. Esto podría generar modelos más reales pero que crecerán en complejidad.

A continuación se mencionan algunos de las posibles extensiones

9.1. Adversidad frente al riesgo

Considerando a u como una función de utilidad, se define el coeficiente de aversión absoluta al riesgo de Arrow-Pratt (ARA) como

$$r = -\frac{u''}{u'} \quad (9.1)$$

Donde $u' > 0$. El signo de r define la postura frente al riesgo como sigue:

- Si $r > 0$, se tiene adversidad frente al riesgo.
- Si $r = 0$, se tiene neutralidad frente al riesgo.
- Si $r < 0$, se tiene propensión al riesgo.

El caso estudiado en la memoria es la neutralidad frente al riesgo por parte de ambos agentes, cualquier variación en torno a r tendría cambios en la metodología de la solución por la generación de funciones no lineales.

Un caso particular lo define la función CARA¹ que resuelve la ecuación diferencial $r = -\rho$, con ρ es conocido como parámetro de aversión riesgo siendo constante y positiva. Una solución particular de esta es la expresión que entrega Asgharizadeh [1]

$$u = \frac{1}{\rho} (1 - e^{-\pi\rho}) \quad (9.2)$$

Luego, un agente económico pretenderá maximizar su utilidad y no sus beneficios. Existe un amplio conjunto de funciones de utilidad que pueden considerarse, entre estas están: IARA (Increasing absolute risk aversion), DARA (Decreasing absolute risk aversion), CRRA (Constant relative risk aversion), IRRA (Increasing relative risk aversion) y DRRA (Decreasing relative risk aversion) entre otras.

9.2. Múltiples equipos

La DGAC posee varios VOR-DME a lo largo del territorio nacional para facilitar la navegación aérea con instrumentos. Es posible que esta institución, como DAGC y no como aeródromo de La Florida, esté interesada en subcontratar el servicio de mantenimiento en un conjunto de ellos, por lo que existirán otras variables en consideración como la distancia entre taller y activo, cantidad de talleres, etc.

Una repercusión inmediata es sobre la distribución de probabilidades de y (tiempo que el equipo está no operativo), que será la suma del tiempo efectivo de intervención en el taller y el eventual tiempo de espera en cola (este último, cuando la cantidad de equipos del cliente es mayor a la cantidad de talleres del proveedor).

Según muestra Asgharizadeh [1], Asgharizadeh y Murthy [2] la función de distribución del tiempo en el cual el equipo no está operativo con un taller de parte del proveedor.

¹Constant absolute risk aversion.

$$g(y) = \sum_{k=0}^{M-1} \hat{P}_k \mu e^{-\mu y} \frac{(\mu y)^k}{k!} \quad (9.3)$$

Donde M es la cantidad de equipos

$$P_k = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{M!}{(M-k)!}}{\sum_{i=0}^{M-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{M!}{(M-i)!}} \quad (9.4)$$

La que se puede expresar como

$$P_k = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k M!}{(M-k)! \left({}_2F_0\left(1, -M; -\frac{\lambda}{\mu}\right) - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^M M! \right)} \quad (9.5)$$

En donde ${}_2F_0$ es una expresión hipergeométrica de parámetros 2 y 0. Además

$$\hat{P}_k = \frac{(M-k)P_k}{\sum_{j=0}^{M-1} (M-k)P_j} \quad (9.6)$$

la que se expresa analíticamente como

$$\hat{P}_k = - \frac{(M-k) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k M! \left(-{}_2F_1\left(1, -M; -\frac{\lambda}{\mu}\right) + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^M M! \right)}{(M-k)! \left\{ {}_2F_1\left(1, -M; -\frac{\lambda}{\mu}\right) - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^M M! \right\} M {}_2F_0\left(1, 1-M; -\frac{\lambda}{\mu}\right)} \quad (9.7)$$

Finalmente la función de distribución es

$$g(y) = \frac{\mu (1 + y\lambda)^{M-1}}{{}_2F_0\left(1, 1-M; -\frac{\lambda}{\mu}\right) e^{\mu y}} \quad (9.8)$$

Su función acumulada es

$$G(y) = \int_0^y \frac{(1 + y\lambda)^{M-1}}{{}_2F_0\left(1, 1-M; -\frac{\lambda}{\mu}\right) e^{\mu y}} dy \quad (9.9)$$

Cuando la cantidad de talleres es mayor a la unidad ($S > 1$), la función de distribución de y es

$$f(y) = e^{-\mu y} \sum_{k=0}^{S-1} \hat{P}_k + \sum_{k=1}^{M-S} \hat{P}_{k+S-1} \mu (S\mu)^k \left\{ \frac{e^{-\mu y}}{(S\mu - \mu)^k} - \sum_{j=1}^k \frac{y^{k-j} e^{-S\mu y}}{(k-j)! (S\mu - \mu)^j} \right\} \quad (9.10)$$

Donde

$$\hat{P}_k = \frac{(M-k)P_k}{\sum_{j=0}^M (M-j)P_j} \quad (9.11)$$

y

$$P_k = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{M!}{(M-k)!k!} P_0 & ; \text{ si } k = \{0, 1, \dots, S-1\} \\ \left(\frac{\lambda}{S\mu}\right)^k \left(\frac{S^S}{S!}\right) \frac{M!}{(M-k)!} P_0 & ; \text{ si } k = \{S, S+1, \dots, M\} \\ 0 & ; \text{ si } S > M \end{cases} \quad (9.12)$$

Donde P_0 esta dado por

$$P_0 = \left\{ \sum_{k=0}^{S-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{M!}{(M-k)!k!} + \sum_{k=S}^{M-1} \left(\frac{\lambda}{S\mu}\right)^k \left(\frac{S^S}{S!}\right) \frac{M!}{(M-k)!} \right\}^{-1} \quad (9.13)$$

Las expresiones antes mostradas alteran los beneficios esperados ya que afectan directamente a las multas. Este modelo puede incluir otras variables de decisión, como por ejemplo a cuantos equipos vender el servicio de mantenimiento ya que a mayor número, mayor es el valor esperado del costo de las multas; otra variable puede ser la cantidad de talleres que desea tener el proveedor donde se debe analizar el trade-off entre la seguridad de tener varios talleres y los costos fijos que estos generan.

El modelo se puede complicar más considerando una correlación de falla entre los equipos, donde tal cosa, en un escenario real, tiene sentido.

9.3. Solución bajo un juego de Nash

Una de las premisas basales de la memoria, mediante la cual se obtienen los precios de las intervenciones y los beneficios esperados, es la resolución centrada en la existencia de un principal

(aquí DGAC) quien realiza la primera jugada. En un juego de Nash se pierde la nominación de principal o líder y de agente o seguidor, por los que las esperanzas se denominarán como $E(\pi_{dgac})$ y $E(\pi_{proveedor})$, respectivamente.

Rubistein demostró que en un escenario no competitivo la solución de un juego de Nash es la división por partes iguales de los excedentes económicos, por lo que

$$E(\pi_{DAGC}) = E(\pi_{proveedor}) \quad (9.14)$$

La forma de resolver este problema no requiere de un problema de optimización con restricciones.

9.4. Cartera de contratos

Una extensión válida es la oferta de una cartera de varios de contratos $\{A_1, \dots, A_k\}$ dentro de la cual cliente pueda escoger el que maximice su utilidad mediante algún proceso de negociación que podría ser un juego de Nash o Stackelberg.

Con seguridad, la elección del contrato óptimo dependerá del nivel de conocimiento mutuo que tengan las partes (problema de información), como del comportamiento estocástico de las fallas del equipo, el poder de negociación, cantidad de clientes como de proveedores, etc. La variación de la configuración anterior sin duda modificará las estrategias así como la elección del contrato óptimo A^* .

Existen muchas otras extensiones del modelo que serán solamente nombradas: colusión entre dos proveedores, depreciación del equipo, cambios en la política de mantenimiento, mercado oligopólicos u oligopsódico del servicio, etc.

Capítulo 10

Conclusiones

La DGAC es una institución con equipos de alta tecnología y muchos de ellos son críticos, son los activos que le permiten entregar la tan valorada seguridad en la industria aeronáutica. Por otro lado, por ser una institución estatal, regida por una serie de normativas, no es una firma eficiente y no pretende maximizar sus utilidades. Por ello, los resultados obtenidos en la presente memoria deben ser analizados por la jefatura del aeródromo de La Florida en una primera instancia y posteriormente por la DGAC como institución.

En este sentido, el resultado de la variable de decisión T_s (o T_p , según sea la subpolítica de aplicación del mantenimiento preventivo) debe ser cotejada con las sugerencias del proveedor del equipo (OEM), recomendaciones normativas¹, políticas locales², políticas internas o corporativas³, entre otras.

Respecto a la duración del contrato, la DGAC debe considerar un análisis estratégico, ya que fijar un contrato de prologada duración traería como consecuencia la excesiva dependencia del proveedor del servicio, pero por otro lado, es una oportunidad para la DGAC de establecer una alianza estratégica. En consecuencia, el análisis estratégico es un eslabón fundamental en el proceso de externalización.

La presencia de equipos de radio-ayuda tipo VOR-DME en el país es extensa por lo que la externalización del servicio por parte del aeródromo de La Florida es un acto pionero que puede

¹Emanadas de la DAR, organismo que entrega las normativas aeronáuticas en Chile.

²Determinadas por las jefatura del aeródromo de La Florida.

³Propias de la DGAC.

servir como incentivo para que otros aeródromos imiten y en lo posible, mejoren el proceso de subcontratación.

La resolución del problema principal-agente se llevó a cabo en tres escenarios, ellos son:

- Discriminación perfecta: Valiéndose de la simetría de información y de su alto poder de negociación, la DGAC es capaz de formular un contrato diseñado para un determinado proveedor.
- DGAC competitiva: Cuando mediante un análisis estratégico la DAGC ha decidido ser una firma competitiva ya que no pretende obtener dividendos del proyecto focalizándose en su negocio (*core business*).
- Máximo presupuesto: La DGAC mediante un análisis estratégico define una cota máxima de costo en el proyecto, este presupuesto es conocido por parte de los proveedores del servicio.

La solución del problema principal-agente bajo discriminación perfecta en relación a los valores originales especificados en las bases administrativas ($l = 3$ años, $T_s = T_p = 2,5$ meses, $\tau = 3,5$ y $\theta = 0,5$ horas), se obtiene

Cuadro 10.1: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de discriminación perfecta y las subpolíticas.

Subpolítica	p_p [pesos]	p_c [pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [pesos]
BR ⁴	0	$2,31 \times 10^5$	57.1	0
AR ⁵	0	$2,78 \times 10^5$	58.1	0

Los precios obtenidos son pertenecientes a la región de aceptación B_1 correspondiente a cada subpolítica tanto para el proveedor como para la DGAC. La tendencia de las partes sería aceptar el proyecto respecto a ambas subpolíticas. Siendo más atractivo el de intervención por edad.

En consideración que los beneficios residuales ($U_0 = 47,7$ millones a pesos) y el análisis técnico-económico, la DGAC debería aceptar el proyecto de externalización, en especial con la subpolítica de intervención por edad. Este resultado debe ser contrastado por la decisión de la jefatura del aeródromo de La Florida basado en el análisis estratégico.

Como se observa, el proveedor es una firma competitiva, esto es, sus beneficios esperados son nulos. Esto tiene sentido desde la perspectiva económica, ya que si la firma no participara debería asumir sus costos fijos ya que estos están presentes independiente a la producción, además celebrar el contrato permite formar una barrera de entrada a otras empresas proveedoras.

Por otro lado, cuando la institución se ha manifestado como una empresa competitiva o definido un máximo presupuesto, los resultados del proceso de negociación bajo las bases administrativas originales definidas en el capítulo (8) son:

Cuadro 10.2: Resultados económicos del problema principal-agente bajo el escenario de DGAC competitiva y máximo presupuesto para el caso particular de $l = 3$ años, $T_s = 2,5$ meses, $\tau = 3,5$ y $\theta = 0,5$ horas, evaluadas para ambas subpolíticas.

Subpolítica	Escenario	p_p [M pesos]	p_c [M pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]	$E(\pi_f)$ [M pesos]
BR	DAGC competitiva	0	4.76	0	56.7
BR	Máximo presupuesto	0	5.54	0	66.7
AR	DAGC competitiva	0	5.16	0	58.1
AR	Máximo presupuesto	0	6.00	0	68.1

Como se observa, la estrategia dominante para el proveedor, tanto para el escenario de DGAC competitiva y máximo presupuesto, es la subpolítica de intervención por edad.

En consideración a la determinación del contrato de mayor beneficio esperado para el cliente en relación de las variables de decisión l , T_s , p_c y p_p . Estas fueron determinadas en el análisis de sensibilidad correspondiente a cada modelo. La solución es

Cuadro 10.3: Resultados de las variables de decisión bajo el escenario de discriminación perfecta y intervención por edad.

Subpolítica	Decisión	p_p [pesos]	p_c [pesos]	T_s [meses]	l [años]
AR	A_1	0	$2,77 \times 10^5$	2	a determinar

En relación a la subpolítica de intervención por bloque (block replacement), se observa en el gráfico (8.14) y en la tabla (8.12) que en la medida que aumenta T_s los beneficios esperados son

mayores, por lo que se vuelve más rentable, desde la perspectiva del análisis técnico-económico, externalizar el servicio de reparaciones mediante mantenimiento correctivo; ya que los beneficios esperados bajo esta política son $E(\pi_{\text{correctivo}}) = 57,4$ millones de pesos. La DGAC deberá analizar desde la perspectiva estratégica, si es necesario delegar la responsabilidad del servicio a agentes externos y escoger entre mantenimiento correctivo o preventivo bajo intervenciones por bloque.

Si la DGAC escogiese mantenimiento preventivo bajo intervenciones por bloque (block replacement) y dado que la curva de beneficios esperados no muestra un óptimo, la institución deberá escoger el periodo entre preventivas de la tabla (10.4).

Considerando un intervalo desde $T_s = 1$ a $T_s = 4$ meses, los posibles valores que experimentará la DGAC (asumiendo $l = 3$ años) son:

Cuadro 10.4: Valores posibles para un eventual contrato de mantenimiento preventivo bajo intervención por bloque. La determinación de l^* , T_s^* , R^* [%], p_c^* , p_p^* , $E(\pi_p^*)$ se determinará mediante análisis estratégico.

T_s [meses]	R [%]	p_c [K pesos]	p_p [K pesos]	$E(\pi_p)$ [M pesos]
1,00	80	110,7	110,7	55,8
1,25	70	479,0	0,0	56,4
1,50	63	120,7	120,7	56,7
1,75	54	125,7	125,7	56,9
2,00	46	342,0	0,0	57,0
2,25	39	135,0	135,0	57,0
2,50	33	139,0	139,0	57,1
2,75	27	288,0	0,0	57,1
3,00	22	277,2	0,0	57,1
3,25	17	290,0	0,0	57,1
3,50	14	151,2	151,2	57,2
3,75	11	256,9	0,0	57,2
4,00	8	155,4	155,4	57,2

Si se considera $T_s = T_p = l$, los modelos de intervención por edad y bloque tienden a man-

tenimiento correctivo en el marco de la subcontratación. Tanto el modelo matemático para intervención por edad y bloques coinciden en los beneficios esperados cuando los tiempos T_s y T_p son iguales a l . Focalizándose en la DGAC y resolviendo el problema principal-agente bajo discriminación perfecta bajo el marco de externalización de mantenimiento correctivo se obtiene, que para $l = 3$ años, los beneficios esperados son $E(\pi_p) = 57,4$ millones de pesos.

Finalmente, contrastando los beneficios esperados para la DGAC en la externalización bajo mantenimiento correctivo y preventivo (intervenciones por bloque y edad) frente a variaciones de T_s – o T_p , según corresponda –, resolviendo el problema principal-agente mediante discriminación perfecta, se obtiene el siguiente gráfico

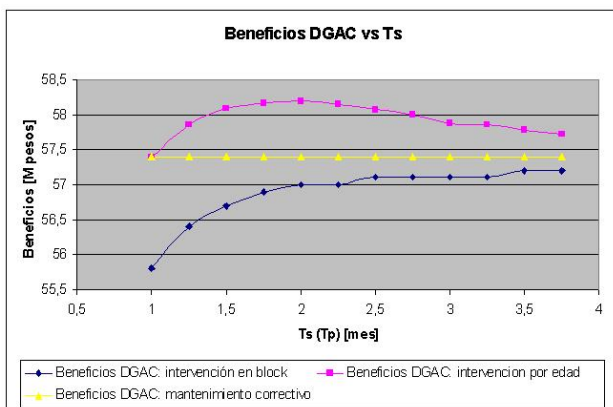


Figura 10.1: Variación de los beneficios esperados para la DGAC en relación a: (i) mantenimiento preventivo con intervención por edad, (ii) mantenimiento preventivo con intervención por bloque y (iii) mantenimiento correctivo.

En donde se concluye que, la política de mantenimiento preventivo aplicando intervención por edad, es la mayores beneficios esperados para el principal en un periodo de $T_p^* = 2$ meses.

Contrastando el mantenimiento in-house, respecto a intervenciones por bloque y edad, en relación a la duración del proyecto, se observa en la figura (10.2) que la subpolítica de intervención por edad siempre domina como estrategia a la intervención por bloque y al mantenimiento in-house en función del tiempo.

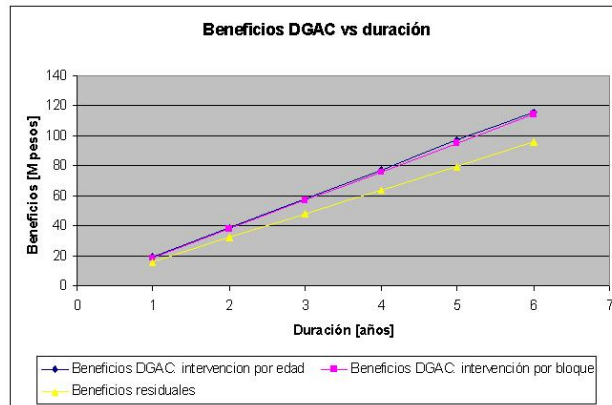


Figura 10.2: Curva de beneficios esperados para el cliente en función de la duración del contrato bajo intervenciones por edad, por bloque y mantenimiento in-house.

Por lo que se desprende de las figuras (10.1) y (10.2) que el proceso de mantenimiento preventivo con intervenciones por edad (age replacement) es la estrategia más rentable y la elección racionalmente económica para la DGAC.

En resumen, la externalización del servicio de mantenimiento del activo VOR-DME de la localidad de Tongoy bajo la política de mantenimiento preventivo con intervenciones por edad (age replacement) es una estrategia dominante, según el análisis técnico-económico, respecto a las otras mencionadas: a saber, intervenciones por bloque (block replacement), mantención in-house y la externalización bajo mantenimiento correctivo.

El proceso de negociación se debe llevar bajo discriminación perfecta aprovechando la simetría de información y el alto poder de negociación de la DGAC. Este contrato debe declarar en sus bases administrativas: $T_p = 2$ meses, $p_p = 0$ y $p_c = 2,77 \times 10^5$ pesos, $\tau = 3,5$ y $\theta = 0,5$ horas. Tomando $l = 3$ años, los beneficios esperados para el cliente son $E(\pi_p) = 58,2$ millones de pesos mientras que para el proveedor son $E(\pi_p) = 0$.

Bibliografía

- [1] Asgharizadeh, E. (1997): *Modelling and Analysis of Maintenance Service Contracts* Tesis para la obtención del Grado de Doctor of Philosophy.
Universidad de Queensland, Australia
- [2] Asgharizadeh, E. and Murthy, D.N.P. (2000): *Service Contracts: A Stochastic Model* Mathematical and Computer Modelling , issue 31, pp 11-20
- [3] Bai, J, Pham, H (2006): *Cost analysis on renewable full-service warranties for multi-component systems* European Journal of Operational Research 168, 492-508
- [4] Cohen, J.W. (1969): *The Single Server*
London, North-Holland Publishing Company
- [5] Cruz, J., Chen C. (1972): *Stackelberg solution for two-person games with biased information patterns*
IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. ac-17, No. 6, 791-798
- [6] Fisher, R. (2004): *Apuntes de IN-51A*
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial Universidad de Chile
- [7] Hitt, M., Ireland, R. and Hoskisson, R. (2004): *Administración Estratégica. Competitividad y Conceptos de Globalización*
Quinta Edición. México, D.F., Thomson Learning
- [8] Jackson, C. (2006): *Optimal Maintenance Service Construct Negotiation with Aging Equipment*
Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile. Santiago Chile

- [9] Kreps, D. (1998): *Notes on the Theory of Choice*
Underground Classics in Economics, Boulder, Westview Press
- [10] Mas-Colell, A., Whinston, M. and Green, R. (1995): *Microeconomic Theory*
New York, Oxford University Press
- [11] Menendez, V. (2002): *La Realidad del Outsourcing en las Empresas de Chile*
Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas
Departamento de Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile, Santiago, Chile
- [12] Nie, P (2005): *Dynamic Stackelberg games under open-loop complete information*
Journal of the Franklin Institute 342, 737-748
- [13] Pascual, R. (2005): *El Arte de Mantener. Apuntes curso ME-57A* Facultad de Ciencias Físicas
y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Chile, Santiago, Chile
- [14] Rojas, C. (2005): *Implementación de modelo para planificación estratégica de overhaul en
flotas de equipos militares*
Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico
Universidad de Chile, Santiago Chile
- [15] Ross, S. (1997): *A First Course in Probability*
Fifth Edition, Upper Saddle River, N.Y., Pearson Prentice Hall
- [16] Ross, S. (1996): *Stochastic Processes*
Second Edition, New York, Wiley
- [17] Rousand, M. and Hoyland, A. (2004): *System reliability theory: models, statistical methods
and applicatins*
second edition, New Jersey, USA, John Wiley and Sons
- [18] Salanié, B. (1997): *The Economics of Contracts*
Cambridge, Massachusetts, The MIT Press
- [19] Salanié, B. (2000): *Microeconomics of Market Failure*
Cambridge, Mass, USA, The MIT Press

[20] Weidenbaun, M. (2005): *Outsourcing: Pros and Cons*
Kelley, School of Business 48, 311-315

[21] Zeballos, W. (2004): *Estudio de la Industria del Outsourcing Logístico en Chile*
Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas
Departamento de Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile, Santiago Chile