

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
REEMPLAZO DE VEHÍCULOS PARA UNA FLOTA DE
TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

Realizada por: D. Jorge Luiz de Sá Riechi
Director de tesis: Dr. D. Bernardo Tormos Martínez

Valencia, Febrero de 2018

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
REEMPLAZO DE VEHÍCULOS PARA UNA FLOTA DE
TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

Presentada por
JORGE LUIZ DE SÁ RIECHI

En el
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Para la obtención del grado de
DOCTOR POR LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Valencia, Febrero de 2018

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
REEMPLAZO DE VEHÍCULOS PARA UNA FLOTA DE
TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

Realizada por: D.Jorge Luiz de Sá Riechi

Dirigida por: Dr. D. Bernardo Tormos Martínez

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente: Dr. D. Vicente Macián

Secretario: Dr. D. Francisco Javier González

Vocal: Dr. D. Jesús Antonio Royo Sánchez

Valencia, Febrero de 2018

Resumen

Cada vez más, las empresas de transporte de viajeros se encuentran enmarcadas por un reto financiero para su supervivencia en un mundo globalizado, y están en busca de una gestión eficiente para optimizar los costes de explotación de las flotas. El principal objetivo es obtener el mínimo coste por kilómetro recorrido de los autobuses durante toda su vida útil, pero sin olvidar la influencia de la edad y del kilometraje sobre los vehículos.

Desde un punto de vista puramente económico, es evidente que se obtengan los costes de operación y mantenimiento más bajos en los primeros años de trabajo de los vehículos. Pero cuando se consideran otros tipos de costes, como la compra del vehículo, impuestos, subvenciones o incentivos fiscales, y la necesidad de sustitución por nuevos vehículos dotados de innovaciones tecnológicas en conformidad con las exigentes normas de sostenibilidad y sus altos costes, la optimización económica es un reto para los operadores. Así, la determinación del momento óptimo de reemplazo es una tarea cada vez más dependiente de la disponibilidad, fiabilidad y precisión de los datos que se manejen, debido a la incertidumbre en la predicción de algunos valores y costes, tales como los futuros precios del combustible, costes de mantenimiento y la tasa de utilización.

Teniendo en cuenta que este proceso ocurre a nivel global en diferentes sectores, existen diferentes modelos y herramientas de gestión que permiten encontrar al menos una solución para el problema de reemplazo. En este trabajo se han planteado dos modelos clásicos aplicados en problemáticas similares, para adaptarlos a la resolución del caso de flotas de transporte urbano de dos países diferentes, España y Brasil, propiciando así un análisis bajo condiciones y entornos distintos. Con el acceso a los datos reales de las flotas, fue desarrollada e implementada la

metodología combinada entre la herramienta gerencial Life Cycle Cost y el modelo matemático de Simulación Monte Carlo, mediante la realización de un análisis estocástico, considerando tanto la edad y el kilometraje promedio anual.

El estudio ha demostrado que la inclusión de las variables aleatorias en el proceso de determinación de la edad óptima de cambio, junto con la mejor tasa de utilización de los vehículos en función del kilometraje medio, aporta ventajas al proceso de reemplazo convencional, al permitir una perspectiva más confiable de los futuros escenarios, mediante el análisis probabilístico dependiente de las variables económicas y técnicas. Los resultados obtenidos apuntan hacia la eficiencia del modelo, y que podrá ser utilizado de forma satisfactoria en otros estudios comparativos en flotas de transporte urbano.

Resum

Cada vegada més, les empreses de transport de viatgers es troben majors reptes financers per a la seva supervivència en un món globalitzat, i estan a la recerca d'una gestió eficient per optimitzar els costos d'explotació de les flotes. El principal objectiu és obtenir el mínim cost per quilòmetre recorregut dels autobusos durant tota la seva vida útil, però sense oblidar la influència de l'edat i del quilometratge sobre els vehicles.

Des d'un punt de vista purament econòmic, és evident que s'obti els costos d'operació i manteniment més baixos en els primers anys de treball dels vehicles. Però quan es consideren altres tipus de costos, com la compra del vehicle, impostos, subvencions o incentius fiscals, i la necessitat de substitució per nous vehicles dotats d'innovacions tecnològiques en conformitat amb les exigents normes de sostenibilitat i els seus alts costos, l'optimització econòmica és un repte per als operadors. Així, la determinació del moment òptim de reemplaçament és una tasca cada vegada més dependent de la disponibilitat, fiabilitat i precisió de les dades que es manegen, a causa de la incertesa en la predicció d'alguns valors i costos, com ara els futurs preus del combustible, costos de manteniment i la taxa d'utilització.

Tenint en compte que aquest procés ocorre a nivell global a diferents sectors, hi ha diferents models i eines de gestió que permeten trobar almenys una solució per al problema de reemplaçament. En aquest treball s'han plantejat dos models clàssics aplicats en problemàtiques similars, per adaptar-los a la resolució del cas de flotes de transport urbà de dos països diferents, Espanya i el Brasil, propiciant així una anàlisi sota condicions i entorns diferents. Amb l'accés a les dades reals de les flotes, va ser desenvolupada i implementada la metodologia combinada entre

l'eina gerencial Life Cycle Cost i el model matemàtic de simulació Monte Carlo, mitjançant la realització d'una anàlisi estocàstica, considerant tant l'edat com la mitjana de quilometratge anual.

L'estudi ha demostrat que la inclusió de les variables aleatòries en el procés de determinació de l'edat òptima de canvi, juntament amb la millor taxa d'utilització dels vehicles en funció del quilometratge mitjà, aporta avantatges al procés de reemplaçament convencional, en permetre una perspectiva més fiable dels futurs escenaris, mitjançant l'anàlisi probabilístic depenent de les variables econòmiques i tècniques. Els resultats obtinguts apunten cap a l'eficiència del model, i que podrà ser utilitzat de forma satisfactòria en altres estudis comparatius en flotes de transport urbà.

Abstract

The passenger transport companies have been increasingly challenged by financial restrictions for their survival in a globalised world and they are searching out an efficient management to optimise the exploitation costs of the fleets. The main objective is not only reaching the lowest average cost per mile of the buses during their lives, but also reaching such aim considering the influence of the age and mileage over the vehicles.

From an economic point of view, it is evident that the operational and maintenance costs must be lower at the first working years of the vehicle. However, when other types of costs are taken into consideration, such as the purchasing price, taxes, subsidies or tax incentives, the need of the replacement for new vehicles endowed with technologic innovations in accordance with sustainable rules and their high costs, the economic optimisation becomes a challenge for the managers. Likewise, the determination of the optimum replacement moment is a more and more dependent task on the availability, reliability and precision of the data in use due to the uncertainty and unreliability when predicting some values and costs, such as future fuel prices, maintenance costs and bus use rate.

In view of this process happens at a global level over different sectors of the economy, there are several models and tools of management that leads to a solution to the replacement problem. In this study, two classic modules were applied in similar conditions, however, some changes were required to adapt them for the resolution in two urban transport fleet in two different countries, Spain and Brazil, generating an analysis under different conditions and environments though. Using the access of real date from the two fleets, a methodology was developed combining the Life Cycle Cost tool and the mathematical model of

Monte Carlo Simulation, by performing a stochastic analysis considering both age and average annual mileage for optimum vehicle replacement.

This study has demonstrated that the inclusion of random variables into the determination process of optimum replacement age together with the best mileage of the vehicle in function of average mileage improve the conventional replacement process since it creates a more reliable perspective on future successes through probabilistic analysis dependent on economic and technical variables. The results suggest that the model is effective and it could be used satisfactorily in other comparative studies about urban transport fleet.

En este espacio quisiera detenerme para agradecer a todas aquellas personas que han sido parte de esta etapa de mi vida.

En primer lugar, quiero dar un especial agradecimiento a mi tutor y director Bernardo Tormos, ya que sin su consejo y dedicación hubiese sido muy difícil haber podido llevar este proyecto a buen término. De la misma forma quisiera agradecer a Vicente Macián, director de la Línea de Mantenimiento por haberme admitido en su grupo de trabajo. En segundo lugar, quiero agradecer al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, haciendo una mención especial a Francisco Payri y José María Desantes por haberme concedido ser parte de este prestigioso centro de investigación, permitiéndome disponer de los recursos técnicos y humanos para la consecución de mi Tesis doctoral.

Asimismo, me gustaría agradecer al Gobierno Brasileño a través de CAPES(Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior), UTFPR y del Ministerio de Educación por su apoyo logístico y económico.

Gracias también a Santiago Ballester y a Guillermo Miró, primer por la paciencia que tuvieron desde los primeros días con el castellano, y mucho más por la ayuda y colaboración aportada en el desarrollo del trabajo de la tesis. Así como a toda la peña del sector de mantenimiento durante esta etapa de mi vida: Leo, Santi Andrés, Moisés, Luis, Xema, Lorena, Ruth, y los compañeros brasileños Ávila, Zely, Marcos Vinicius y Jairo. Por otro lado, no me puedo olvidar de todos mis familiares en Brasil, en particular mi madre “Dona Silvia” que mismo a distancia y con “saudades”, estaban presentes por su pensamiento positivo.

Por último y en especial, gustaría de dedicar este trabajo y agradecer todo el amor, compañerismo, dedicación y paciencia de mis hijas Isabela y Sofía, y de mi eterna y siempre Tatiana.

Índice general

Índice general	XV
Índice de figuras	XIX
Índice de tablas	XXIII
Nomenclatura	XXV
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis y objetivos a alcanzar	7
1.4 Metodología a utilizar	7
1.5 Medios a utilizar	7
1.6 Desarrollo de la Tesis	9
2 Gestión Del Mantenimiento	11
2.1 Evolución del Mantenimiento	12
2.2 Mantenimiento del Siglo XXI	16

2.3	Gestión del Mantenimiento	19
2.3.1	Misión del Mantenimiento	20
2.3.2	Estrategias de Mantenimiento	22
2.4	Organización del Mantenimiento	24
2.4.1	Tecnología de la Información y Comunicación	26
2.4.2	Principales Ventajas y Oportunidades de las <i>ICT</i>	27
2.4.3	<i>EMaintenace</i> y <i>IMaintenance</i>	29
2.5	Coste de Mantenimiento	30
2.6	Gestión del Mantenimiento en Flotas.	31
3	Estudio y Desarrollo de la Metodología Combinada LCC+SMC para Optimizar	39
3.1	Introducción	39
3.2	Histórico de los Modelos de Optimización.	41
3.3	Métodos y Modelos para Evaluación del Costes	43
3.3.1	Métodos de optimización	43
3.3.2	Métodos de Simulación	44
3.3.3	Métodos de Apoyo a las Decisiones.	46
3.3.4	Métodos de Estimación	48
3.4	Método Life Cycle Cost (LCC)	53
3.4.1	Evolución histórica del LCC	53
3.4.2	Conceptos Generales del LCC	54
3.5	Modelo LCC aplicado a Flotas de transporte	56
3.6	Método Coste Medio Anual	58
3.7	Métodos Basados en la Optimización de Costes.	59
3.7.1	Coste Total de Propiedad	59
3.7.2	Coste Total de Propiedad Descontado	59
3.7.3	Tasa y Factor de Descuento	60
3.7.4	Vida Útil y Vida Económica	61
3.7.5	Horizonte Temporal	62
3.7.6	Método del Coste Anual Equivalente.	62
3.7.7	Modelos de Minimización de Costes	63
3.7.8	Modelo de Optimización Dinámica Determinista	66
3.7.9	Función objetiva minimizada	68
3.8	Definición y desarrollo de modelo matemático combinado entre Life Cycle Cost...	70
3.8.1	Modelo Matemático LCC + SMC	70

4	Análisis y validación de la metodología aplicada para la optimización del reemplazo	75
4.1	Introducción	75
4.2	Estudio comparativo de costes de explotación en flotas de autobuses.	76
4.2.1	Antecedentes	76
4.2.2	Desarrollo del estudio	77
4.2.2.1	Tecnología de motorización del vehículo	77
4.2.2.2	Coste de Compra de un Autobús	84
4.2.2.3	Combustible: Consumo y coste	86
4.2.2.4	Condiciones de contorno ambiental	89
4.2.2.5	Características del Vehículo	90
4.2.2.6	Personal de Conducción	92
4.2.2.7	Las políticas de formación	94
4.2.2.8	Infraestructura	95
4.2.2.9	Impuestos y tasas.	96
4.2.3	Conclusiones	98
4.2.4	Descripción de las flotas utilizadas según los ejes directores.	99
4.3	Estudio Comparativo entre Autobuses Diésel y GNC	100
4.3.1	Antecedentes	100
4.3.2	Desarrollo del Estudio.	101
4.3.2.1	Definición inicial e hipótesis	101
4.3.2.2	Resultados del estudio previo	102
4.3.2.3	Vehículos seleccionados para la Investigación	102
4.3.2.4	Costes del mantenimiento.	105
4.3.2.5	Costes operacionales (de combustible y neumáticos)	105
4.3.2.6	Coste de la Infraestructura	106
4.3.3	Análisis de los resultados	108
4.3.4	Conclusiones	111
4.4	Estudio Comparativo entre dos Flotas de Transporte Urbano con uso de la Metodología...	111
4.4.1	Antecedentes	111
4.4.2	Desarrollo del Estudio.	112
4.4.3	Introducción a la Metodología.	113
4.4.4	Generación de la función de costes de mantenimiento y explotación.	114
4.4.5	Generación de base de datos.	115
4.4.5.1	Flota española de transporte urbano	115
4.4.5.2	Flota brasileña de transporte urbano	117
4.4.6	Resultados.	119
4.4.6.1	Análisis del coste del ciclo de vida (LCC)	119
4.4.6.2	Resultados del método LCC	120
4.4.6.3	Simulación del Monte Carlo	121
4.4.6.4	Resultados del Modelo Combinado LCC + SMC.	121

5 Conclusiones y trabajos futuros	127
5.1 Conclusiones	127
5.2 Trabajos futuros.	130
Apéndice	131
Bibliografía	135
APENDICE	147
A Datos de la Flota Brasileña	147
B Datos de la Flota Española de Transporte Urbano - Tipo A	151
C Datos de la Flota Español para el Estudio Comparativo - Diesel x GNC- (adoptado como ejemplo los datos de un autobus)	157

Índice de figuras

2.1. Industria en años 20 del Siglo XX.	11
2.2. Industria en los años 40 del Siglo XX (B-32 Bomber Production – Ford’s Factory - 1943)	12
2.3. Mantenimiento de Equipos de Energía Eólica en Siglo XXI	16
2.4. Construyendo una Estrategia de Mantenimiento.	23
2.5. Niveles y Sistemas de Tecnología de la Información	25
2.6. Ejemplo de aplicación conceptual: <i>eMaintenance</i> / <i>iMaintenance</i>	30
2.7. Costes de Mantenimiento.	31
2.8. Equilibrio entre eficacia y eficiencia en la perspectiva financiera.	32
2.9. Diagrama de un sistema de control electrónico	35
3.1. Fases del ciclo de vida.	54
3.2. Coste Anual Equivalente (EAC).	57
3.3. Restricciones en TDCO.	65
3.4. Flujograma del Modelo Combinado LCC + SMC.	74
4.1. Etapas de desarrollo de un modelo en cascada	76

4.2. Filtro de Partículas Diésel	79
4.3. Matrícula de Autobuses en España	82
4.4. Autobús Marca Scania – Modelo N280 UB GNC	83
4.5. Autobús Articulado de la empresa TMB	83
4.6. Precios con Impuestos del Gasóleo de Automoción en España (2005-2017)	88
4.7. Precios con Impuestos del Gasóleo de Automoción en la U.E.	88
4.8. Precios Medios con Impuestos del Gasóleo en España	89
4.9. Autobús años 70	91
4.10. Autobús años 2015	91
4.11. Autobus GNC EEV 2006.	104
4.12. Autobus Diesel Euro 3 Año 2004.	104
4.13. Comparación del Coste del Combustible (euros).	106
4.14. Comparación del Coste del Combustible por km (euros/km).	107
4.15. Coste Total (euros / km).	109
4.16. Coste Acumulado (Euros).	109
4.17. Distribución de los costes para autobús GNC (%).	110
4.18. Distribución de los costes para autobús Diesel (%).	110
4.19. Flujograma de la Secuencia de la Metodología.	113
4.20. Autobus Tipo A.	115
4.21. Análisis del kilometraje – Flota Española.	117
4.22. Autobus Tipo B.	118
4.23. Análisis del kilometraje – Flota Brasileña.	119
4.24. Años de Edad.	122
4.25. Kilometraje indicado.	123
4.26. Muestra de la flota española.	124

4.27. Muestra de la flota brasileña. 124

Índice de tablas

2.1. Ventajas y Oportunidades.	28
4.1. Parque por carburante y años de antigüedad (Años 2016) ¹	81
4.2. IPC España actual e histórico	96
4.3. IPC Brasil actual e histórico	97
4.4. Datos seleccionados con las empresas de transporte.	100
4.5. Autobus GNC EEV 2006.	103
4.6. Autobus Diesel Euro 3 Año 2004.	104
4.7. Coste del combustible de los 10 autobuses Diesel.	105
4.8. Coste del combustible de los 10 autobuses GNC.	105
4.9. Coste de la Infraestructura (euros).	107
4.10. Coste/vehículo (euros).	108
4.11. Datos y resultados.	108
4.12. Coste total 2012-2013.	110
4.13. Autobus Tipo A.	115
4.14. Autobus Tipo B.	118

4.15. Flota Española.	120
4.16. Flota Brasileña.	121

Nomenclatura

Acrónimos

AAC	<i>Average Annual Cost</i> , página 71
ABC	<i>Activity Based Costing</i> , página 51
AHP	<i>Analytical Hierachy Process</i> , página 3
AUVASA	Autobuses Urbanos de Valladolid, página 83
BSC	<i>Balanced Scorecard</i> , página 23
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i> , página 28
CER	<i>Cost Estimating Relationships</i> , página 50
CM	<i>Condition Monitoring</i> , página 25
CMA	Coste Medio Anual, página 58
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i> , página 22
DCS	<i>Distributed Control System</i> , página 19
DP	<i>Dynamic Programming</i> , página 3
EAC	<i>Equivalent Annual Cost</i> , página 62
EAM	<i>Enterprise Asset Management</i> , página 24
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> , página 34

EE	<i>Economics Engineering</i> , página 3
EMT-Valencia	Empresa Municipal de Transportes de Valencia, página 103
EnerAgen	Agencias Españolas de Gestión de la Energía, página 83
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> , página 19
FE	<i>Fuel Economy</i> , página 80
GHG	<i>Greenhouse Gas Emissions</i> , página 68
GMAO	Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador, página 35
ICT	<i>Information and Communications Technology</i> , página 26
IT	<i>Information Technology</i> , página 26
JIT	<i>Just In Time</i> , página 51
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> , página 23
LCC	<i>Life Cycle Cost</i> , página 7
MAUT	<i>Multi Attribute Utility Theory</i> , página 3
MDSS	<i>Maintenance Decision Support System</i> , página 25
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> , página 19
MOVEA	Movilidad con Vehículos de Energías Alternativas, página 86
MRP	<i>Materials Resource Planning</i> , página 24
O&M	Operación y Mantenimiento, página 8
OR	<i>Operations Research</i> , página 3
PCM	Planificación y Control del Mantenimiento, página 13
PdM	<i>Predictive Maintenance</i> , página 28
PFRP	<i>Parallel Fleet Replacement Problem</i> , página 62
PV	<i>Present Value</i> , página 59
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> , página 3
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> , página 13

SCEA	<i>Society of Cost Estimating and Analysis</i> , página 41
SCM	<i>Strategic Cost Management</i> , página 51
SMC	Simulación de Monte Carlo, página 7
TC	<i>Target Costing</i> , página 51
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> , página 59
TDCO	<i>Total Discounted Cost of Ownership</i> , página 59
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> , página 14
URBS	Urbanización de Curitiba S/A, página 99

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Para la realización de sus actividades, desde la más sencilla hasta la más compleja, es común que las empresas hagan uso de máquinas, equipos, instalaciones, infraestructuras, mano de obra, etc., para las que se requiere que tengan la mayor disponibilidad posible, buscando además una durabilidad adecuada así como los mínimos costes operativos. Por ello, el mantenimiento de los equipos de producción para la realización de un determinado servicio es un factor clave para un adecuado nivel de productividad de las empresas, así como para asegurar la calidad de los bienes y servicios realizados, permitiendo que la empresa siga las demandas del mercado en el que actúa. Todo esto resulta en un proceso de mejora continua respecto a su competitividad, indispensable para hacer frente a la creciente competencia, la evolución al alza de los costes y al hándicap que supone la utilización de software de gestión comercial demasiado generalista [12] que no tienen en cuenta las particularidades específicas de la empresa.

Según Fredberg [41] y Carrasco [12], las empresas se ven obligadas a actuar sobre factores que afectan a su nivel competitivo. Una variable importante sobre la que pueden actuar es la eficiencia del propio proceso productivo. El mantenimiento industrial tiene como objetivo principal conseguir una utilización óptima de los activos productivos de la compañía, manteniéndolos en el estado requerido para

una producción o servicio eficiente con costes mínimos. Dicha función debe tener en cuenta los objetivos de la empresa y se debe llevar a cabo en el marco de un gasto acotado por un presupuesto.

Los equipos no son viables, entendiendo este concepto a diferentes niveles: productivo, de calidad, de eficiencia energética, de impacto medio ambiental, etc., por siempre. En algunos casos, como los equipos informáticos, determinados cambios tecnológicos puntuales, les tornan rápidamente obsoletos y aun estando en buenas condiciones operativas, deben ser sustituidos por otros con dichas innovaciones tecnológicas, permitiendo que la empresa siga la evolución del mercado. Centrándonos en activos de empresas de transporte, tema de este trabajo, la necesidad de sustitución llega a término normalmente en función del desgaste de los componentes mecánicos, por exigencias legales o por la identificación de un **elevado coste de mantenimiento**.

Todas las actividades de mantenimiento en vehículos tienen como objetivo principal el mantener el estado de los mismos lo más parecido al existente cuando eran nuevos. Desafortunadamente, con el paso de los años y con el consecuente desgaste, los mantenimientos cada vez se tornan más costosos. Además, estas actividades requieren cada vez más tiempo de parada de los vehículos en los talleres, penalizando por tanto la disponibilidad de los mismos y normalmente ligada con una menor productividad/rentabilidad.

En general, las empresas de transporte, tienen la opción de aplicar políticas de mantenimiento y decisiones que pueden contribuir a un aumento de la vida útil de sus vehículos y que estos mantengan el comportamiento esperado. Ejemplo de esto son la utilización de una gestión de mantenimiento adecuada y eficiente, con las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo muy bien definidas y distribuidas y siempre de acuerdo con las exigencias de los fabricantes de los equipos y considerando las condiciones de uso de los mismos. Otro factor importante son las políticas de formación y concienciación para todos los involucrados en los servicios de mantenimiento.

Aunque actualmente los vehículos estén tecnológicamente preparados para ofrecer de manera instantánea los máximos datos posibles de funcionamiento, así como de posibles fallos o averías ya ocurridos o que pudieran surgir, la importancia de un sistema de análisis de esta información a nivel de gestión de mantenimiento se hace cada vez más necesario e imprescindible [9].

Como consecuencia del aumento de los costes de mantenimiento con el envejecimiento de la flota se puede llegar a una situación de inviabilidad económica. Por lo tanto, debe existir un momento óptimo para la sustitución de un vehículo,

que no tiene que corresponder con el hecho de que el vehículo no tenga capacidad de desempeñar su función por más tiempo de vida.

Existen además algunos costes intangibles que también pueden ser citados, como son los costes de imagen, relacionados con por ejemplo, la ocurrencia de fallos en servicio y el efecto sobre el pasaje, el aumento de los tiempos de espera para los clientes si existe la reducción de los vehículos de la flota, etc. En general los fallos que pueden afectar a la calidad del servicio son difícilmente valorables en términos económicos pero muy importantes respecto a pérdida de imagen de la compañía.

El nivel de competencia y la exigencia de viabilidad económica existente en las empresas de transporte, obliga a disponer de estrategias sólidas para la consolidación de la organización. Este escenario requiere la incorporación rápida y eficaz de las nuevas tecnologías para satisfacer las demandas del mercado. Para una gestión eficiente de los activos físicos de una empresa, los aspectos de gestión y planificación del mantenimiento y gestión de repuestos seguramente estén entre los principales aspectos que asegurarán la posición consolidada en este segmento.

Algunos estudios enfocados a la definición del periodo óptimo de sustitución de vehículos en la flota aplicados al segmento de autobuses están presentes en la literatura específica, como en Keles y Hartman [64], Khasnabis, Alsaïdi y Ellis [67], Di y Hauke [27]. Sin embargo, estos trabajos se basan en datos simulados y bajo formulaciones puramente teóricas. Hay dos tipos de modelos que son sugeridos por lo general en la literatura para la definición del periodo de sustitución aplicada a una flota: modelos de ingeniería económica (**EE** - *Economics Engineering*) y modelos de investigación operativa (**OR** - *Operations Research*).

Los modelos de *EE* se limitan fundamentalmente a los aspectos económicos y financieros, teniendo en cuenta las variables exógenas tecnológicas, de gestión y estratégicas. Según Kaplan [59], esta limitación de los métodos tradicionales de gestión *EE* lleva a abandonar los métodos formales de análisis de la inversión y el uso de análisis subjetivo no estructurado. Este hecho es observado por otros autores en la literatura, como Carter [14] y Collan y Liu [18].

Los modelos tradicionales de **OR**, a pesar de utilizar una configuración de múltiples variables, se centran en un solo objetivo a maximizar / minimizar. La adopción de un único criterio limita las aplicaciones prácticas donde el coste, la eficiencia y el nivel de servicio deben ser evaluados de forma simultánea. Métodos como *Multi Attribute Utility Theory (MAUT)*, *Analytical Hierachy Process (AHP)* y *Quality Function Deployment (QFD)*, *Dynamic Programming (DP)*, se han utilizado para resolver estos problemas [29, 30].

1.2 Justificación

De acuerdo con los expertos en gestión del mantenimiento, es posible prolongar la vida de un vehículo de transporte con el aumento de las actividades del mantenimiento, incluso con trabajos de reparación general en componentes clave como: transmisión, motor, carrocerías, etc. Pero, la pregunta principal es

- ¿hasta cuándo este procedimiento es económicamente viable? y
- ¿qué es más importante para una empresa de transporte: un aumento del periodo de vida de un activo basada en un aumento de los costes, generando una menor rentabilidad de la empresa, o la sustitución del mismo en el momento adecuado?

Responder estas cuestiones y gestionar los costes de operación y mantenimiento nunca ha sido una tarea fácil. Los gestores responsables de esta actividad, deben estar siempre manejando los datos con el objetivo de maximizar la vida útil de los vehículos, minimizando sus costes, y al mismo tiempo, conscientes de que el aspecto económico siempre prima sobre el técnico, pero sin olvidar la seguridad de todos los involucrados [25].

La evolución de las políticas de gestión del mantenimiento aplicadas a flotas de transporte exige cada vez más un análisis y control de todos los costes directos e indirectos, fijos y variables, generales u ocultos involucrados tanto en el proceso de operación como en los servicios de mantenimiento de las mismas.

Hay varios factores relevantes, pero los costes del mantenimiento y los costes de operación, muy específicamente el coste de los combustibles, aún son los principales costes variables de una flota, y en general presentan una clara tendencia de crecimiento. Los primeros en función de los desgastes de los componentes mecánicos de los vehículos con la edad y los otros fundamentalmente en función de la variabilidad de los precios de los derivados del petróleo.

Además, los avances tecnológicos adoptados en los vehículos, han obligado a un cambio en las filosofías y estrategias de mantenimiento empleados. Estos cambios tecnológicos, especialmente en vehículos con combustibles alternativos, más allá de los convencionales, como: biodiesel, gas natural, hidrógeno, metanol, híbridos e eléctricos, requieren un estudio más amplio para el uso óptimo de estos y sus nuevos elementos.

Por lo tanto, reducir los costes de operación y mantenimiento, teniendo en cuenta además otros costes generales como los propios de adquisición, costes administrativos, coste de formación de personal, y otros, es un problema de difícil solución, siendo necesario un control y análisis constante de los costes en todo el

ciclo de vida de los vehículos, para que permanezcan con valores controlados y aceptables.

Una flota de vehículos representa una inversión sustancial. Uno de los aspectos más importantes y que representa un mayor reto en su gestión operativa es la decisión de cuando reemplazar las unidades que la componen. Estas decisiones tienen un claro impacto económico, así como también afectan la capacidad de la flota para atender la demandada requerida. La decisión de reemplazo puede venir motivada por varios factores:

- Decisión estratégica de ampliar la capacidad de la flota de la empresa, para poder afrontar nuevas actividades y aumentar la competitividad.
- Por obsolescencia del vehículo debido a la aparición de nuevas tecnologías o por puro envejecimiento.
- Conveniencia de sustitución por ahorro en costes o influenciados por una política gubernamental con exención fiscal, es decir, tras establecerse una política de renovación se decide efectuar la renovación en un determinado período de tiempo.

Sin lugar a dudas, la mejor opción es definir una política clara y sustentada científicamente, de renovación, que pueda estar definida en términos del kilometraje recorrido, por la edad del vehículo o por ambas, desarrolladas a través de la experiencia y por análisis de costes, y que debe proporcionar las bases para un análisis continuo de la flota.

Algunos autores como Feldens y col. [34], Dario y col. [21] y Costa y col. [20] sugieren que en el proceso decisorio de reemplazo, las empresas tienen un reto basado en el uso eficiente de los activos y en una muy clara política de evaluación y sustitución sin olvidar el retorno financiero de la propia empresa.

Aunque los estudios de Feng y Figliozzi [37], indican que una sustitución de los vehículos viejos por los nuevos puede reducir los costos de mantenimiento, por otro lado esto puede generar un aumento considerable del capital invertido. Además, los estudios demuestran una necesidad cada vez mayor de la identificación del momento ideal de la sustitución de la flota para la minimización del coste del mantenimiento a lo largo de la vida útil del vehículo. Otro factor importante, en línea con lo que comenta Feng y Figliozzi, sería la amortización del bien. Es decir, con el tiempo el activo se ha ido depreciando perdiendo su valor económico, por lo que igual su sustitución es la mejor opción también desde una óptica contable.

A continuación se presentan algunas ventajas del proceso de renovación de flota, o simplemente un vehículo:

- Ahorro en Costes – al mismo tiempo que por un lado la renovación de una y/o varias unidades implica un gran coste, debido a la inversión inicial que se tiene que realizar, esta se debe analizar con un horizonte temporal que contemple la vida económica. Además, hay una disminución de los costes de mantenimiento, pues, a priori cuanto más edad tiene una unidad y más kilometraje acumule, mayor es la frecuencia con la que requiere servicios de mantenimiento y reparación, aumentando estos costes;
- Mayor Disponibilidad - Las unidades más antiguas requieren más actividades de mantenimiento. Por lo tanto cuánto más vieja es una flota, menor es su disponibilidad;
- Mejora Imagen - De manera directa, las empresas son un mercado de publicidad y/o con uso de logos; o de manera indirecta, con el simple hecho de circular por las vías urbanas e interurbanas. Un vehículo nuevo contribuye a dar mejor imagen que uno viejo, por lo que se puede considerar también la renovación como una inversión en marketing.

Otro factor importante en este proceso de renovación es la limitación financiera de cada empresa. Así, dada la amplia variedad de empresas de transportes existentes, no todas abordan de la misma manera el problema de la renovación de sus flotas. Las grandes empresas, que disponen por norma general de un mayor presupuesto destinado para tal fin, tendrán una edad media de la flota menor que las empresas con menos recursos.

Por otro lado cuanto más grande y variada sea la flota, más difícil será el proceso de reemplazo. Se requiere entonces, la agrupación por clases de vehículos y la toma de decisiones para un grupo homogéneo con las mismas características y que se destinen al mismo fin. Su estructura de costes a lo largo de su vida útil será similar si las características técnicas y de operación coinciden, pudiendo aplicarles por tanto el mismo método.

No obstante, la situación normal de una empresa va a ser que tiene en su parque móvil no sólo un único tipo de vehículo, lo que le obliga a buscar métodos que combinen las distintas clases de los mismos. De aquí nace el problema típico para una flota de vehículos, donde se busca el óptimo punto de renovación a lo largo de su ciclo de vida económicamente viable, compuesta por vehículos de diferentes tipos, con distintas edades, estructuras de costes y características de servicios.

1.3 Hipótesis y objetivos a alcanzar

Se plantea como objetivo principal de esta tesis doctoral la elaboración y aplicación de un modelo combinado de sustitución de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros, integrando tanto criterios técnicos como económicos. Son factores a considerar dentro de los aspectos técnicos: la antigüedad del vehículo, el tipo de ruta, la topografía, el kilometraje anual, eficiencia energética (consumo), nivel de emisiones contaminantes, etc. Dentro de los aspectos económicos se considerarán: los costes asociados a la compra, costes de mantenimiento y los costes de explotación. Otro importante aspecto a destacar va a ser la flexibilidad del modelo, que se podrá adaptar fácilmente para el análisis de otros tipos de flotas. Para su validación y prueba se utilizarán datos reales de dos flotas diferentes de transporte urbano, en un caso una empresa española y en otra, brasileña. En consecuencia, este trabajo pretende contribuir como una mejora sobre las actividades de gestión de las flotas de transporte, resultando en una mejor competitividad de la misma.

1.4 Metodología a utilizar

Existen diferentes modelos y herramientas de gestión que permiten encontrar al menos una solución para el problema del reemplazo en sistemas industriales. En este trabajo se plantearán dos modelos clásicos que han sido aplicados en problemáticas similares, para adaptarlos a la resolución del caso en flotas de transportes urbanos de dos países diferentes, propiciando un análisis con datos reales bajo condiciones y entornos distintos, tales como: el entorno laboral, condiciones climáticas, diferentes tipos de servicios, diferentes rutas, distancias recorridas, etc.; con el reto de evaluar las similitudes y las discrepancias. Los modelos utilizados serán los basados en la filosofía de métodos optimizados de minimización de costes, método *Life Cycle Cost (LCC)* y el modelo matemático, **Simulación de Monte Carlo (SMC)**. Es importante mencionar que en ambos casos, estas técnicas son altamente dependientes de la disponibilidad de suficientes datos y su fiabilidad.

1.5 Medios a utilizar

Se pretende validar la metodología mediante aplicación en casos reales en flotas de transporte urbano de pasajeros, el cual es un sector muy específico pero representativo y una oportunidad para evaluar las posibles ventajas o desventajas del modelo. El éxito de esta investigación se basará en muchos diferentes aspectos,

aunque uno de los aspectos clave en este caso será la disponibilidad, estructura y veracidad de los costes de operación y mantenimiento (O&M) que disponga la empresa.

Otros factores tales como como el estado financiero de la empresa, la propia dimensión de la flota y la previsión de la demanda de servicios pueden influir de manera muy significativa en la toma de decisión de remplazo o sustitución. Pero, para estas consideraciones, sería necesario un enfoque de estudio diferente, lo que en este trabajo está fuera del objetivo principal.

En la realización de este trabajo se considera la utilización de técnicas y herramientas para el análisis y control de los costes en una flota de transporte de pasajeros, a partir de los datos obtenidos desde las áreas de Gestión del Mantenimiento y Gestión Económica con énfasis en la obtención del período óptimo de sustitución o retirada de un vehículo.

Para Farr [33], *Life Cycle Cost (LCC)* son todos los costes previstos asociados con un proyecto o programa a lo largo de su vida. Son la suma total de los costes relacionados: directos, indirectos, recurrentes, no recurrentes, y otros incurridos o estimados a incurrir, en el diseño, la investigación y el desarrollo, la inversión, las operaciones, el mantenimiento, la eliminación, y cualquier otro tipo de actividad asociada a un producto durante su ciclo de vida (es decir, su tiempo de vida útil esperado). Todos los costes relevantes deben ser incluidos, en un análisis *LCC*, independientemente de la fuente de financiación, unidad de negocio, control de gestión, etc.

Para Emblemsvag [28] el *LCC* es una herramienta cada vez más utilizada para el apoyo a la toma de decisiones que directa o indirectamente se refieren a equipos de ingeniería y/o sistemas, y supera muchas de las deficiencias de la contabilidad tradicional de costes en la gestión de activos. El punto clave no es técnico, sino económico, y tiene como objetivo principal, maximizar el retorno de la inversión sobre los activos, para operarlos durante el tiempo con mejor rentabilidad, obtengan mejor comportamiento y cuesten menos de mantenerlos. En este contexto, hay varios estudios que utilizan esta metodología, como los de Feldens y col. [35], Zambujal-Oliveira y Duque [107], Feng y Figliozzi [37] y Mishra y col. [81]. Según Silveira, Anzanello y Etcheverry [101], hay muchos modelos matemáticos de simulación para la resolución de problemas estocásticos, pero la SMC presenta la ventaja de que los datos de entrada pueden tener cualquier tipo de distribución, permitiendo analizar varios escenarios de manera eficaz y rápida. Además, debido a no existencia de un único algoritmo, la SMC puede ajustar el procedimiento de simulación a cada situación. Otros autores entienden a este modelo como un método estocástico universal para la resolución de problemas ma-

temáticos, señalando también su utilización en gestión de proyectos, permitiendo un mejor análisis de los costes [87, 58].

La viabilidad de este trabajo queda asegurada por la experiencia en el ámbito de la Ingeniería del Mantenimiento de la Línea de Investigación del Departamento de Máquinas y Motores de la Universitat Politècnica de València, que está desarrollando varios proyectos de investigación y consultoría relacionados con el tema propuesto con empresas de transporte.

1.6 Desarrollo de la Tesis

La presente tesis está estructurada en seis capítulos:

- En el primer capítulo, se describe el objetivo, la justificación y la viabilidad del proyecto, así como las bases con las que se ha contado para su consecución y el contenido de los diferentes documentos del mismo.
- En el segundo capítulo, se describen el estado de la arte de la gestión del mantenimiento, estableciendo la evolución desde los principios de la evolución industrial hasta el siglo XXI, los conceptos generales, misión, estrategias del planteamiento y control, los costes del mantenimiento, los medios y las tecnologías de la integración de las informaciones y datos en un sistema informatizado e integrado de una planta industrial, destacando su importancia en la productividad y en la rentabilidad de las empresas.
- En el tercer capítulo se describe una revisión del estado del arte de los métodos y modelos para el reemplazo de flotas de vehículos, tanto los publicados en la literatura como los realizados en la práctica, y se se presenta la definición, desarrollo y aplicación de la metodología basada en la herramienta *LCC* y en el modelo matemático Monte Carlo.
- En el cuarto capítulo se explica la metodología aplicada para la validación del modelo. Se compone de dos estudios diferentes. En primer lugar se estudia los elementos críticos de coste de explotación y mantenimiento de diferentes flotas de transporte urbano, para luego realizar un análisis de idoneidad de los datos comparando una serie de estos ofrecidos por una flota. A continuación, se presenta el estudio de validación de la metodología basada en la herramienta *LCC* y en el modelo matemático Monte Carlo a dos casos reales de flotas de transporte urbano en dos países España y Brasil, en diferentes condiciones de trabajo, entorno laboral, condiciones climáticas, tipo de servicio, etc., con el reto de evaluar las similitudes y discrepancias.

- En el quinto capítulo se presentan las conclusiones de la tesis, aportaciones y recomendaciones para futuras investigaciones en la misma línea temática propuesta por la tesis, tanto en flotas de autobuses convencionales como en flotas de vehículos eléctricos e híbridos.
- El capítulo 6 presenta la bibliografía.

Capítulo 2

Gestión Del Mantenimiento

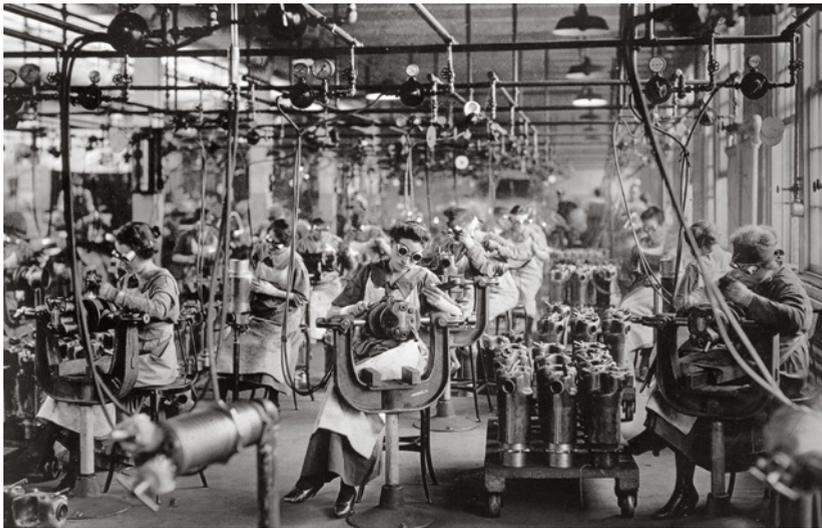


Figura 2.1: Industria en años 20 del Siglo XX¹.

¹Fuente: <http://jdcdn.wabisabiinvestme.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2013/02/I-Guerra-Mundial.jpg>

2.1 Evolución del Mantenimiento

El desarrollo industrial ha ido siempre acompañado por la evolución del mantenimiento. Aunque se han hecho grandes progresos en los equipos y en los procesos de manufactura, el mantenimiento de los equipos sigue siendo todavía un desafío debido a diversos factores técnicos y económicos. Resulta innecesario decir que las prácticas de mantenimiento de hoy en día están cada vez más direccionadas al mercado, en particular para las industrias de bienes de producción, tales como materias primas, herramientas, maquinarias, etc., así como para las industrias de proceso [24].



Figura 2.2: Industria en los años 40 del Siglo XX (B-32 Bomber Production – Ford’s Factory - 1943)².

A finales del siglo XIX, con la mecanización de las industrias, surgió la necesidad de las primeras reparaciones, donde los propios operarios se encargaban de las reparaciones de los equipos. Con la llegada de la Primera Guerra Mundial y con la masificación de la producción en serie, las fábricas pasaron a establecer programas de planeamiento y control de producción y como consecuencia de esto la necesidad de ejecución de los primeros trabajos de reparaciones de máquinas en servicio en el menor tiempo posible. Así surgió un sector subordinado a la

²Fuente: USAirForce-<http://peopleandpowerngr.com/2016/05/the-amazing-legacy-of-henry-ford/>

operación, cuyo objetivo básico era la ejecución del mantenimiento (reparación), hoy conocido como **Mantenimiento Correctivo**.

Esta situación se mantuvo hasta los años 30, cuando, como consecuencia de la Segunda Guerra Mundial y la necesidad de aumentar la rapidez de producción, la alta administración pasó a preocuparse, no solamente de corregir fallos sino también de evitar que las mismos ocurriesen, razón por la cual el personal técnico de mantenimiento pasó a desarrollar un proceso de prevención de averías que, juntamente con la corrección, completaban el cuadro general de Mantenimiento Industrial, formando una estructura, en algunos casos, tan importante como la de Producción Industrial.

Alrededor del año 1950, con el desarrollo de la industria enfocado a satisfacer los requerimientos de la postguerra, la evolución de la aviación comercial y de la industria electrónica, los Gerentes de Mantenimiento observaron que, en muchos casos, el tiempo empleado para diagnosticar los fallos era mayor que el propio tiempo empleado en la ejecución de la reparación, y seleccionaron grupos de especialistas para conformar un órgano asesor que se llamó **Ingeniería de Mantenimiento y recibió las funciones de Planificar y Controlar el Mantenimiento Preventivo** analizando causas y efectos de las averías.

Con la difusión de los ordenadores a finales de los años 60, y con la sofisticación de los instrumentos de protección y medición, la Ingeniería de Mantenimiento pasó a desarrollar criterios de predicción o previsión de fallos, con el objetivo de optimizar el desempeño de los grupos de ejecución del mantenimiento. Características estas presentes también en el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (*Reliability Centered Maintenance - RCM*) [24].

Estas nuevas características y criterios, conocidos como **Mantenimiento Predictivo**, fueron asociados a métodos de planificación y control de mantenimiento automatizados, reduciendo las tareas del mantenimiento. Estas actividades ocasionaron la diversificación de la Ingeniería de Mantenimiento, que pasó a tener dos equipos: el de estudios de fallos crónicos y el de **Planificación y Control del Mantenimiento (PCM)**, este último con la finalidad de desarrollar, implementar y analizar los resultados de los Sistemas Automatizados de Mantenimiento.

En los años 70 y 80 la industria de la mayoría de los países occidentales tenía un objetivo bien definido: obtener el máximo de rentabilidad para una inversión dada. Sin embargo, con la penetración de la industria oriental en el mercado occidental, la satisfacción del consumidor pasó a ser considerada un elemento importante en las transacciones, o sea, exigir la calidad de los productos y los servicios suministrados, y esta demanda hizo que las empresas considerasen este factor, “calidad”, como una necesidad para mantenerse competitivas, especial-

mente en el mercado internacional. En este período se acentúa el desarrollo de los programas de Mantenimiento Productivo Total (*Total Productive Maintenance - TPM*), con la meta final del “cero averías y cero defectos”, mejorándose así las tasas de operación de los equipos y minimizando los stocks y costes, en conjunto con los conceptos 5s (**Seiri** / Clasificación y descarte; **Seiton** / Organización; **Seiso** / Limpieza; **Seiketsu** / Higiene y Visualización; **Shitsuke** / Disciplina y compromiso).

Este cambio no se debe atribuir exclusivamente a los asiáticos, ya que en 1975, la Organización de las Naciones Unidas definía a la actividad final de cualquier entidad organizada como Producción = Operación + Mantenimiento, basados en: la reducción del tiempo de parada de los equipos que afectan la operación; en la reparación, en tiempo oportuno, de los daños que reducen el potencial de ejecución de los servicios; y en la garantía de funcionamiento de las instalaciones, de manera que los productos o servicios satisfagan criterios establecidos por el control de la calidad y estándares preestablecidos [104].

A continuación, las empresas comenzaron a realizar estudios causa-efecto para averiguar el origen de los problemas con la detección precoz de síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias fuesen catastróficas, aumentando la importancia del Mantenimiento Predictivo.

Según [83], en los años 70 un nuevo enfoque más integrado fue puesto en práctica por el gobierno de los Estados Unidos, el cual exigía un análisis de los costes de mantenimiento durante la vida útil a la hora de adquirir productos y equipos militares. Este se basaba en el conocido método *Life Cycle Cost (LCC)*, el cual analiza los costes de mantenimiento y operación.

En los primeros años de los 90, el mantenimiento se contempla como una parte del concepto de Calidad Total, cuyo objetivo principal era aumentar la disponibilidad al tiempo que se reducen los costes a través de una adecuada gestión del mantenimiento. Se concibe el mantenimiento como un proceso de la empresa al que contribuyen también otros departamentos. Se identifica al mantenimiento como fuente de beneficios frente al antiguo concepto de mantenimiento como “**mal necesario**”. La posibilidad de que una máquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad necesaria en cada caso al mínimo coste.

Con las exigencias de incremento de la calidad de los productos y servicios, hechas por los consumidores, el mantenimiento pasó a ser un elemento importante en el desempeño de los equipos, en un grado equivalente a lo que se venía practicando en operación.

Estas etapas evolutivas del Mantenimiento Industrial se caracterizaron por la Reducción de Costes y por la Garantía de la Calidad (a través de la fiabilidad y la productividad de los equipos) y el cumplimiento de los tiempos de ejecución (a través de la disponibilidad de los equipos).

Los profesionales de mantenimiento pasaron a ser más exigidos, en la atención adecuada de sus clientes, o sea, los equipos, obras o instalaciones, quedando claro que las tareas que desempeñan, se manifiestan como un impacto directo o indirecto en el producto o servicio que la empresa ofrece a sus clientes. En consecuencia el mantenimiento tiene un alto nivel de importancia dentro de la estructura administrativa de las empresas actuales.

Otro resultado de esta evolución, ya a finales del siglo XX y comienzos del XXI, ha sido la necesidad de integrar diferentes conceptos de mantenimiento, como RCM y TPM para la obtención de resultados positivos, pues como en un primer momento fueron planteados de forma asiladas, no han tenido en muchos casos el éxito perseguido.

Un aspecto diferenciador del siglo XXI en relación con los años anteriores, es el aumento de la idea de la contratación externa (externalización) como método de reducción de costes y de mejora del servicio prestado. Los nuevos contratos “*win-win*”, se elaboran y redactan con el objetivo de llevar a cabo procesos de mejora continua con la filosofía cuanto más gañas tu más gano yo, lo que implicará el establecimiento de indicadores de comportamiento medibles y objetivos para saber desde qué posición se parte y para que el contratista y sus subcontratistas persigan mejoras de los mismos. Otra característica importante de este proceso contractual, es una mayor motivación y una implicación más fuerte en los resultados. Además, no hay sólo cuantificación y pagos de penalizaciones ante incumplimientos, también hay un sistema cuantificado en forma de bonificación cuando los indicadores expongan que han existido desempeños notables [38].

Para la eficacia de la actividad de mantenimiento en **siglo XXI**, se espera que el manejo de la información sea más automatizado y fiable, además de ser mucho más complejo; como consecuencia de ello, aumentará la importancia del mantenimiento de software, que se acercará, si no igualará, al mantenimiento de equipos y maquinaria. El siglo XXI se enfoca en el mantenimiento de áreas fundamentales no tenidas en cuenta con anterioridad como el factor humano, seguridad y la efectividad de los costes. Se requerirán nuevas ideas y nuevas estrategias para obtener beneficios potenciales y convertirlas en rentabilidad, y aprovechar de forma efectiva la nueva información, la tecnología y los métodos.

En el pasado, el tamaño típico de un grupo de mantenimiento en una empresa de fabricación variaba entre el 5 al 10 % de la fuerza de producción. Hoy en día,

el tamaño proporcional del departamento de mantenimiento en comparación con el departamento productivo ha aumentado significativamente. El factor principal detrás de esta tendencia es el aumento de la mecanización y la automatización de muchos procesos en la industria. En consecuencia, esto significa menor necesidad de operadores pero una mayor solicitud para el personal de mantenimiento.



Figura 2.3: Mantenimiento de Equipos de Energía Eólica en Siglo XXI³.

2.2 Mantenimiento del Siglo XXI

En un estudio realizado con responsables de mantenimiento de empresas de varios sectores importantes de la industria en más de 40 países de todo el mundo (América del Norte y Europa), mostró que existe una gran incertidumbre sobre nociones básicas del mantenimiento industrial; ¿debe ser centralizado o descentralizado? ¿En qué medida debe ser subcontratado el mantenimiento? ¿Cuál es la estrategia de mantenimiento “ideal“ ? Por encima de todo, cuál es exactamente o debería ser el papel del director de “mantenimiento“? Detrás de estas incertidumbres hay una sensación generalizada de que el departamento de mantenimiento

³Fuente: <http://elescolar.com.uy/wp-content/uploads/2015/11/aerogenerador-1.jpg>

en su conjunto necesita de una organización cada vez más eficaz para poder hacerlo adecuado para lograr realmente el óptimo rendimiento del equipo [72].

Estas y otras importantes cuestiones afectan el estado actual y futuro de la función de mantenimiento en la industria en todo el mundo. Algunas de estas cuestiones están más relacionadas con la organización y otros aspectos son más técnicos. Hay organizaciones, donde se encuentran departamentos altamente centralizados responsables de todos los aspectos de la gestión de activos físicos. Las responsabilidades de estos departamentos centralizados incluyen especificar, adquirir, instalar y poner en marcha una nueva planta o equipos; la formulación de políticas y estrategias de mantenimiento; especificando instalación y operación de sistemas de planificación y control de mantenimiento; la gestión de las piezas de repuesto; la ejecución de las tareas de mantenimiento e incluso en algunos casos, apoyo a servicios del suministro y abastecimiento de agua, vapor, aire, distribución de energía y así sucesivamente.

En otros casos, sobre todo en América del Norte, la “ingeniería” se separa de “mantenimiento”. El primero es responsable de la especificación, adquisición y despliegue de nuevos proyectos (casi siempre de capital) de la planta, mientras que el segundo se ocupa de todos los aspectos de mantenimiento después de que la planta haya sido adquirida.

El caso opuesto es un departamento de mantenimiento descentralizado, en el cual el grupo de mantenimiento se asigna al área en particular o unidad del esquema organizativo. Algunas razones importantes para justificar la opción del mantenimiento descentralizado son reducir el tiempo de viaje hacia y desde los trabajos de mantenimiento, y mejorar la cooperación entre los trabajadores de producción y mantenimiento.

La experiencia en grandes plantas indica que la mejor opción es una combinación de mantenimiento centralizado y descentralizado. La razón principal son los beneficios que con ambos sistemas se pueden lograr en esencia. No obstante, no hay un tipo particular de organización de mantenimiento que se amolde a todos los tipos de empresas.

Durante el mismo periodo, final del siglo XX e inicio del XXI, hemos visto otro gran salto de la automatización en la industria, con el número de operadores reducido en un orden de magnitud, en donde las máquinas se han apoderado de muchas de las tareas que solían ser realizadas por los seres humanos. En el caso de algunos sistemas, como ciertos tipos de equipos militares, generación de energía, estaciones de bombeo y sistemas de manipulación y transporte de materiales, no hay operadores en el propio lugar. Además, estos sistemas son en muchos casos

operados y controlados mediante ordenadores por los operarios ubicados en salas de control externas, a veces situadas a larga distancia [72].

Gran parte de esta presión surge de la necesidad de seguir siendo competitivos en el mundo de los negocios y / o la competencia dentro de la organización por los recursos económicos. Sin embargo, gran parte de ella parece surgir de una especie de vaga creencia por parte de los altos ejecutivos de que, si es posible reducir el gasto en personal de operaciones, entonces debería ser posible reducir los costes de mantenimiento en proporciones similares. Esta creencia pierde de vista el hecho de que uno de los principales factores que ha permitido a las organizaciones lograr enormes aumentos en la productividad de sus operadores, ha sido precisamente la mecanización y la automatización, que en otras palabras, es la sustitución de las personas por las máquinas y que estas máquinas obviamente necesitan de un mantenimiento efectivo.

Por lo tanto, en estas circunstancias, es necesario que las grandes reducciones en los costes directos de operación sean acompañados por un aumento controlado de los gastos de mantenimiento directo, porque muy poco gasto en mantenimiento reduce la fiabilidad del equipo y por lo tanto la productividad.

También cabe señalar que, según los expertos, la industria se encuentra en un momento de cambio, donde la gestión de la información proveniente desde todas las áreas de la empresa debe ser gestionada de forma eficiente y en tiempo real. De esta manera, estas serán más flexibles y podrán atender de manera más eficaz las demandas, cada vez más específicas y cambiantes de los clientes [78]. Por lo tanto, la interconectividad actualizada entre todas las áreas de gestión de la empresa, así como de los equipos productivos y servicios auxiliares, son el punto clave en este cambio. Esta evolución industrial se conoce como Industria 4.0, que por un elevado grado de automatización y de digitalización, recurre al uso intensivo de Internet y redes virtuales, con el objetivo de modernizar las fabricas hasta transformarlas en “inteligentes” (Smart Factories).

Para el éxito de este nuevo tipo de industria, se han desarrollado nuevas técnicas y estrategias en lo referente a las necesidades reales de seguimiento y diagnóstico de los equipos en el plan de mantenimiento predictivo, en la forma de gestionar la logística de la cadena de producción en función del estado funcional de los equipos en cada momento y en la implementación de aplicaciones novedosas para la gestión, procesamiento y presentación de la información recabada, de modo que esta llegue en tiempo real a todo el personal involucrado. El primer paso es desarrollar un procedimiento sencillo, operativo y eficaz para cuantificar el “estado funcional” de un equipo dinámico como consecuencia de los resultados obtenidos de los diagnósticos de mantenimiento predictivo, gracias al cual, la

comprensión del estado real de cada equipo será sencilla y operativa, incluso para aquellas personas que no estén involucradas en el día a día del departamento de mantenimiento. Tras la evaluación del estado de los equipos dinámicos, la segunda etapa debe ser focalizada en la implementación de sistema de gestión dinámica de los intervalos de medición basada en la criticidad y el “estado funcional” de los equipos anteriormente desarrollados. La criticidad de los equipos se calculará en función de criterios operativos, de servicio y de mantenibilidad. Por último, la tercera etapa debe ser centrado en la monitorización de aquellos equipos que resultasen críticos.

Asimismo, y como pilar básico de la metodología, conforme a la actual filosofía de Industria 4.0, toda la información relevante obtenida a través de los sistemas y herramientas que se han desarrollado e implantado, son integrados en los sistema de gestión de la información operativos en la empresa (principalmente ERP - *Enterprise Resource Planning*, MES - *Manufacturing Execution System* y DCS - *Distributed Control System*), haciéndola altamente disponible, operativa y compartida en tiempo real en los diferentes niveles de decisión de la empresa, dentro y fuera del departamento de mantenimiento, cumpliendo, por lo tanto, con la premisas de las “Fábricas Inteligentes” o “Smart Factories” [79].

En resumen, la cuarta generación de la industria y la gestión de activos ISO 55000 vienen para aumentar la ventaja competitiva con reducción de costes de mantenimiento, mayor disponibilidad de los activos, control de inventario eficiente y eficaz, control de saltos, reducción de pequeñas y grandes paradas, confiabilidad y control máximo de riesgos entre otros dentro de una política de gestión de activos para industria 4.0 [42].

2.3 Gestión del Mantenimiento

La gestión del mantenimiento puede ser dividida en dos partes: la definición de la estrategia y la implementación de dicha estrategia. Para la primera parte se requiere la definición de los objetivos del mantenimiento como parámetros de entrada, los cuales se derivan directamente de los planes de la empresa. Esta parte inicial del proceso de gestión del mantenimiento condiciona el éxito del mantenimiento en una organización y determina la eficacia de la subsecuente implementación del plan de mantenimiento, programación, la rentabilidad, los sistemas de gestión informatizados utilizados, la capacitación técnica y el control y mejora continua del proceso.

La eficacia muestra qué tan bien un departamento o función cumple sus objetivos o las necesidades de la empresa, y con frecuencia se discute en términos

de la calidad del servicio prestado, visto desde la perspectiva del cliente. Esto permitirá llegar a una posición en la que será posible reducir al mínimo los costes indirectos del mantenimiento, los costes derivados de las pérdidas de producción y, en definitiva, con la insatisfacción de los clientes.

En el caso del mantenimiento, la eficacia puede representar la satisfacción global de la empresa con la capacidad y el estado de sus activos, o la reducción del coste global de la empresa obtenida por la capacidad de producción que está disponible cuando sea necesaria. La eficacia se concentra entonces en la corrección del proceso y si el proceso produce el resultado requerido.

La segunda parte del proceso, la aplicación de la estrategia seleccionada, tiene un nivel de significación diferente. Tiene relación con la capacidad para hacer la aplicación de la gestión del mantenimiento frente al problema (por ejemplo, la capacidad para garantizar un nivel adecuado de calificación de la fuerza de trabajo, preparación para el trabajo adecuado, las herramientas adecuadas y el cumplimiento del cronograma), esto permitirá minimizar el coste de mantenimiento directo (mano de obra y de otros recursos necesarios para el mantenimiento). La eficiencia es actuar o producir con un desperdicio mínimo, gastos o esfuerzos innecesarios. La eficiencia se entiende entonces como proporcionar el mantenimiento igual o mejor por el mismo coste.

2.3.1 Misión del Mantenimiento

Según [82], primero es necesario identificar cuál es exactamente el propósito de la función de mantenimiento. En un mundo de crecientes expectativas, limitaciones reglamentarias cada vez más costosas, cambios de paradigmas tecnológicos y reorganizaciones interminables, los cuales deben ser tratados con urgencia, es fácil perderse. En este entorno las grandes empresas deben de desarrollar objetivos formales para continuar siendo competitivos. Así que la declaración de la misión debe reflejar el hecho de que el mantenimiento actúa, ante todo, sobre los activos físicos.

La declaración de la misión también debe reconocer a los “clientes” del servicio de mantenimiento. Los ingenieros de mantenimiento se sirven de tres conjuntos distintos de clientes: los propietarios de los activos, los usuarios de los activos (por lo general los operadores), y la sociedad en su conjunto. Los propietarios están satisfechos si sus activos generan un rendimiento satisfactorio de acuerdo a la inversión realizada para adquirirlos. Los usuarios están satisfechos si cada activo sigue haciendo lo que quieren que haga a un nivel de rendimiento que ellos consideran que es satisfactorio. La satisfacción de la sociedad en su conjunto se cumple

si los activos no fallan en formas que amenacen la seguridad pública o el medio ambiente.

Para el control de los fallos, la tecnología de mantenimiento debe estar anclada en la aplicación de formas adecuadas de gestión, como las técnicas del mantenimiento predictivo y preventivo, que no solo realice la búsqueda de los fallos, si no también que ejecute de una sola vez los cambios de diseño del activo o la forma en que se opera, para impedir el fallo de nuevo.

Cada categoría de trabajo incluye una serie de opciones, algunas más eficaces que otras, por tanto los ingenieros de mantenimiento no sólo tienen que aprender lo que estas opciones son, también tienen que decidir si merece la pena aplicarlas en sus propias organizaciones. Si se toman las decisiones correctas, es posible mejorar el comportamiento de los activos y al mismo tiempo contener e incluso reducir el coste de mantenimiento asociado. Por el contrario, si toman las decisiones equivocadas, nuevos problemas se pueden crear mientras empeoran los problemas ya existentes. Así que la declaración de la misión debe insistir en la necesidad de tomar las decisiones más rentables de toda la gama de opciones. Al considerar las opciones de gestión de fallos, se debe tener en cuenta que los fallos sólo atraen la atención debido a que tienen consecuencias. Los fallos pueden afectar a la producción, la seguridad, la integridad del medio ambiente, la calidad del producto, el servicio al cliente, la protección y los costes de operación, y además, los costes de reparación.

También se debe reconocer que en la mayoría de los casos aplicados se trabaja en un entorno con recursos limitados. Los ingenieros de mantenimiento más eficientes son los que aplican los recursos que se necesitan: mano de obra, recambios y herramientas con el coste más optimizado posible. En otras palabras, el coste de la propiedad de los activos debe minimizarse durante toda su vida útil, no sólo durante el período contable.

Por último, la declaración de la misión de una empresa debe reconocer que el mantenimiento depende no sólo de los ingenieros de mantenimiento, sino también de los diseñadores, fabricantes y operadores. Por lo tanto, deben tener conocimiento de las necesidades de todos los involucrados con respecto a los activos, así como compartir un entendimiento común de lo que hay que hacer, estar capacitados y dispuestos a hacer lo que sea necesario en cada momento para mantener la calidad de los activos. Todo esto sugiere lo siguiente como una posible declaración de la misión de mantenimiento:

Preservar las funciones de los activos físicos durante toda su vida tecnológicamente útil para satisfacción de sus propietarios, de sus usuarios y de la sociedad en su conjunto; seleccionando y aplicando las técnicas más rentables

para la gestión de fallos y sus consecuencias, con el apoyo activo de todas las personas involucradas [82].

2.3.2 Estrategias de Mantenimiento

Una cosa es definir una misión y otra muy distinta es desarrollar e implementar una estrategia que permite al departamento de mantenimiento ejecutar acciones planeadas para identificar, recopilar y desarrollar una eficiente gestión del mantenimiento de los activos y/o sistemas.

Teniendo en cuenta todas las presiones del día a día a las que se enfrentan los gestores de mantenimiento, la primera pregunta es ¿por dónde comenzar?; ¿Comprar un nuevo sistema de gestión de mantenimiento (*CMMS - Computerized Maintenance Management System*)? ¿Reorganizar? ¿Se debe invertir en herramientas de monitorizado de las condiciones de equipos?

La respuesta está en el comienzo de la declaración de la misión, que establece que la misión es preservar las funciones de todos nuestros activos. Sólo cuando estas funciones se han definido puede quedar claro exactamente lo que el mantenimiento debe lograr, y también, precisamente, lo que se entiende por fallo y/o defecto.

En resumen, el desarrollo y ejecución de una estrategia de mantenimiento consta de tres pasos:

- Formular una estrategia de mantenimiento para cada activo (identificación del trabajo).
- Adquirir los recursos necesarios para ejecutar la estrategia de manera efectiva (personas, repuestos y herramientas).
- Ejecutar la estrategia (adquirir, implementar y operar los sistemas necesarios para administrar los recursos de manera eficiente).

En otras palabras, como se muestra en la figura 2.4, construir primero su base (*foundations*), a continuación sus paredes (*walls*) y su techo (*roof*).

La ejecución de las actividades de mantenimiento, una vez planificadas y programadas utilizando las técnicas más adecuadas a la realidad de la empresa tienen que ser evaluadas y las desviaciones controladas para orientarse continuamente hacia los objetivos del negocio y los valores de referencia para los principales indicadores de evaluación del mantenimiento seleccionados por la organización.

Muchos de los indicadores **KPIs** (*Key Performance Indicator*) de mantenimiento de alto nivel, están contruidos o compuestos de otros indicadores técnicos

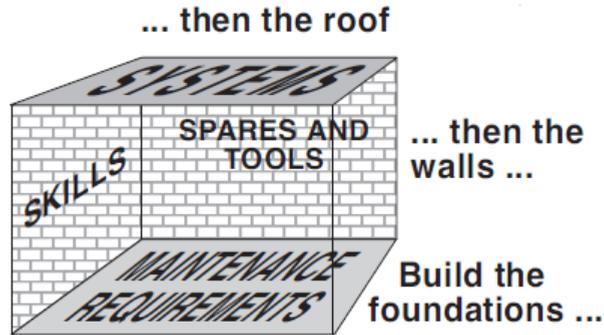


Figura 2.4: Construyendo una Estrategia de Mantenimiento.
Fuente: Moubray [82]

y económicos de nivel básico. Estos indicadores son la representación gráfica de la situación en mantenimiento, posibilitando la identificación de las estrategias que se deben seguir para alcanzar la visión de empresa, y por el otro lado expresar dichas estrategias en objetivos específicos. Por lo tanto, es muy importante asegurarse de que la organización capture los datos adecuados y que los datos estén correctamente agregados/desagregados según el nivel requerido de análisis del rendimiento del mantenimiento.

En cuanto a la definición de los objetivos de mantenimiento y los indicadores clave de comportamiento **KPIs**, es común que los objetivos operativos y la estrategia, así como las medidas de desempeño, se puedan definir mediante la introducción del cuadro de mando integral o **BSC** - *Balanced Scorecard*, que tiene como función principal implementar y traducir la estrategia en cuatro perspectivas: cliente, negocio interno, innovación y aprendizaje y perspectiva financiera, sustentadas cada una de ellas en un grupo de objetivos, indicadores de gestión, metas e iniciativas, interactivamente conectadas en una relación causa/efecto. El *Balanced Scorecard* parte de la visión, y estos a su vez serán el resultado de los mecanismos y estrategias que rigen con los clientes [85].

Entre los elementos que surgen de esta evolución está la orientación hacia una visión sistemática de la importancia del departamento de mantenimiento, identificando las necesidades de cada uno de los actores involucrados (*stakeholders*), lo que conlleva la reorientación en los esquemas de evaluación de resultados y

a la definición de estrategias de indicadores técnicos y financieros para medir la rentabilidad [44].

La tendencia actual es la consideración de los indicadores financieros en el desempeño del negocio del mantenimiento, que merecen atención relevante. La importancia de invertir para crear valor futuro, y no solamente en las áreas tradicionales de desarrollo de nuevas instalaciones o nuevos equipos sino en el mantenimiento de los activos existentes.

2.4 Organización del Mantenimiento

Según los expertos, desde un punto de vista organizativo, la gestión de mantenimiento debe considerar las acciones en tres niveles de actividades empresariales: el estratégico (*strategic level*), el táctico (*tactical level*) y el operacional (*operational level*).

El nivel estratégico debe establecer las prioridades en conformidad con los objetivos del negocio de la empresa. Estos objetivos se concretan en el plan de mantenimiento que establecerá objetivos críticos en las operaciones. Además, la gestión del mantenimiento en este nivel es responsable de determinar las habilidades y la tecnología necesaria para mejorar la eficacia y eficiencia del mantenimiento. Es esencial en esta etapa, una perfecta conectividad con el sistema de planificación de recursos empresariales (*Enterprise Resource Planning - ERP*), donde se encuentran tanto los datos financieros como los de recursos humanos.

El nivel táctico determina el destino de los recursos de mantenimiento para cumplir con el plan de mantenimiento de acuerdo con el plan de producción, gestionado por el sistema *MRP* - (*Materials Resource Planning*), y con la gestión de activos empresariales (*Enterprise Asset Management - EAM*), que contiene información sobre todos los activos, no sólo los productivos. Para complementar y finalizar las actividades en este nivel, es imprescindible el uso de un sistema *CMMS*, determinando los repuestos y la mano de obra necesarios para la planificación y programación de los trabajos.

El nivel operativo asegura que para el equipo programado, las tareas de mantenimiento se llevan a cabo por técnicos cualificados, siguiendo los procedimientos correctos y con el uso de las herramientas adecuadas. Este nivel es también responsable de los datos con fines de diagnóstico y / o pronóstico, a fin de determinar la condición del equipo, y potencialmente predecir un fallo. Estos datos son almacenados y controlados a través de un sistema de monitorizado de condición (*Condition Monitoring - CM*), con el uso de tecnologías tales como: análisis y

medición de vibraciones, la termografía infrarroja, el análisis de lubricantes y tribología, ultrasonidos, etc.

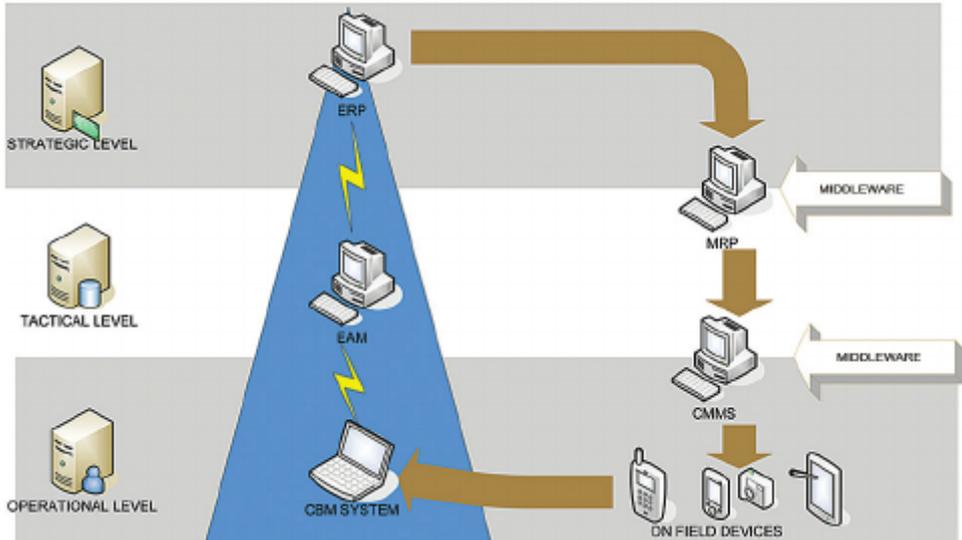


Figura 2.5: Niveles y Sistemas de Tecnología de la Información (*Information Technologies - IT*) - Proceso MDSS (*Maintenance Decision Support System*).

Fuente: Galar y col. [43]

Un sistema de información de mantenimiento, más que un software, es una metodología de gestión que permite a las empresas obtener resultados en cuanto a:

- Definición de procesos óptimos
- Normalización de procedimientos.
- Análisis de eventos.
- Conocimiento de los costes.
- Obtención de indicadores de gestión.

Los programas de mantenimiento informatizados (*CMMS*) de alto nivel son aparentemente similares en contenido, siendo su diferencia tanto la profundidad de la información de algunos registros y funciones, como la capacidad de apoyo e innovación.

El componente principal de un software para la gestión de mantenimiento es que sea aplicable a cualquier tipo de empresa. Contar con módulos integrados para el manejo de almacenes, compras, facturas, y algunas aplicaciones para el manejo de proyectos, herramientas, presupuestos, catálogos, planos, indicadores de gestión, emisión de informes y control de autorizaciones.

La función principal de dicho software es permitir la planificación y el control del mantenimiento, pues debe servir como herramienta para llevar a cabo dichos procesos. El sistema debe trabajar con datos compartidos e interrelacionados, lo que permite que la información fluya entre distintas dependencias en tiempo real.

2.4.1 Tecnología de la Información y Comunicación

El crecimiento de las tecnologías de la información y comunicación (*Information and Communications Technology - ICT*), ha provocado la inclusión de una nueva dimensión en la planta industrial o la instalación.

Es importante señalar que hay una diferencia entre *IT* (*Information Technology*) que hace referencia a Tecnologías de la Información, mientras que *ICT* implica las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Ambas sostienen una amplia relación, sin embargo, señalan áreas diferentes. El término *IT* es un término más amplio y abarca a las *ICT*, siendo éste un término que indica una subcategoría de aquel. Las *IT* abarcan el dominio completo de la información, que incluye al hardware, al software, a los periféricos y a las redes. Un elemento cae dentro de la categoría de las *IT* cuando se usa con el propósito de almacenar, proteger, recuperar y procesar datos electrónicamente.

ICT es planificar y gestionar la infraestructura de una organización, que siendo un trabajo más difícil y complejo, requiere una base muy sólida de la aplicación de los conceptos fundamentales de áreas como las ciencias de la computación y matemáticas, así como de gestión y habilidades del personal. Se requieren también habilidades especiales en la comprensión, por ejemplo, de cómo se componen y se estructuran los sistemas en red, y cuáles son sus fortalezas y debilidades [8].

El conjunto de recursos, procedimientos y técnicas usadas en el procesamiento, almacenamiento y transmisión de información, se ha matizado de la mano de las *ICT*, pues en la actualidad no basta apenas "hablar" de un ordenador, se hace referencia al procesamiento de la información. Internet puede formar parte de ese procesamiento que, quizás, se realice de manera distribuida y remota. Y al hablar de procesamiento remoto, es importante incorporar al concepto de telecomunicación, otros dispositivos más allá de lo que tradicionalmente se entiende por ordenador, pues podría llevarse a cabo, por ejemplo, con un teléfono móvil

o un ordenador portátil, con capacidad de operar en red mediante Comunicación Inalámbrica y con cada vez más prestaciones y facilidades.

Además, con el avance paralelo en tecnologías de instrumentación, software de análisis y el modelado matemático, la industria dispone de considerable potencial para implementar soluciones innovadoras para mejorar la operación y mantenimiento.

2.4.2 Principales Ventajas y Oportunidades de las ICT

Algunas de las principales ventajas y oportunidades de las ICT aplicadas al mantenimiento son:

- Capacidad de disponer de información en tiempo real con históricos del servicio, de la infraestructura, etc.
- Mayor y mejor visibilidad de las operaciones del negocio, trazabilidad, disponibilidad, etc.
- Control sobre la ejecución de las actividades y de los recursos asociados.
- Alineamiento con los objetivos del negocio y otros departamentos.
- Automatización y eficiencia eliminando tareas redundantes o sin valor, mejorando la productividad.
- Análisis de la interdependencia entre la infraestructura, el servicio, los procesos, etc.
- Modelado para análisis automáticos de causa raíz, cuellos de botella y cálculo de impacto en cualquier punto de la infraestructura.
- Conocimiento de los costes en las distintas actividades del mantenimiento.
- Reducir los tiempos ante emergencias o actividades no programadas.
- Gestión del conocimiento, estandarización y fuente única de información, se reducen los problemas de calidad en los datos.

Resumiendo lo que ya se ha descrito:

Dentro de este contexto innovador y con la mayor y mejor utilización de sensores inteligentes para medir y monitorizar el estado del componente y la aplicación de las *ICT* en organizaciones, nótese que habrá un mayor uso de algunas herramientas de gestión del mantenimiento, tales como: **CMMS**; el Mantenimiento Basado en la Condición (*Condition Based Maintenance* - **CBM**) o Mantenimien-

Tabla 2.1: Ventajas y Oportunidades.

Facilidades	Ventajas	Oportunidades
Computación	Reduce el coste de producción	Automatización de tareas
		Disminuye las fases en el proceso de información
		Eliminación de actividades
Comunicación	Reduce el coste de coordinación	Reducción de tiempos y distancias
		Integración de tareas y procesos
		Recopilación y distribución de información
Almacenamiento y Sistemas	Reduce el coste de la información	Monitorización de procesos y tareas
		Análisis de información y toma de decisiones
		Archivo y desarrollo de habilidades y experiencia
		Modelado y visualización de procesos

to Predictivo (*Predictive Maintenance - PdM*) y el E-Mantenimiento (*Electronic Maintenance - eMaintenance*).

El *CBM* tiene su origen en el supuesto lógico de que el momento óptimo para reparar o cambiar piezas de manera preventiva sería justo antes de que se produjera algún fallo en la máquina. El objetivo de *CBM* es conseguir la máxima vida útil de la maquinaria antes de retirarla. También es conocido como Mantenimiento Preventivo Basado en el monitorizado del funcionamiento y/o de los parámetros del elemento, y las acciones subsiguientes. Entendiendo monitorización como la actividad desarrollada manual o automáticamente, destinada a observar el estado actual de un elemento (UNE EN 13306:2011).

2.4.3 *EMaintenance y IMaintenance*

Según [73], el *Electronic Maintenance (eMaintenance)* puede ser entendido como “un concepto de gestión del mantenimiento mediante el cual los activos son controlados y gestionados a través de Internet. Introduciendo un nivel sin precedentes en la transparencia y la eficiencia de toda la industria”. En resumen tiene como acción principal, automatizar aquellas tareas que son necesarias para administrar los dispositivos en red, pero que consumen mucho tiempo, permitiéndole centrarse en aquellas actividades que sean más importantes [10].

Otro punto a destacar, es la integración y la inclusión de las diversas funciones de gestión de mantenimiento en los procesos e infraestructuras de *eMaintenance* basados en las *ITC*, y la conexión de éstos a todos los dispositivos con uso de tecnologías de comunicaciones avanzadas. A este proceso se denomina *Intelligent Maintenance (iMaintenance)*, o sea mantenimiento inteligente, integral, e inmediato.

El enfoque *iMaintenance* no es sólo para la integración de los conocimientos en la gestión del mantenimiento con las soluciones integradas (ejemplo: CMMS / CM / ERP), sino también ofrecer integración de entornos de colaboración, acceso a simulación / computación y servicios, y organizar de forma eficaz los recursos, soluciones, etc., todas direccionadas al uso eficaz a través de los diferentes niveles de la organización e interactuando con actores externos. En resumen, de un lado el *eMaintenance* puede ser considerado como un sistema para la toma de decisiones con un enfoque holístico basado en el suministro de las informaciones, y por otro lado la *imaintenance* es una extensión basado en el procesamiento y en las decisiones [61].

La figura 2.6 presenta un ejemplo de aplicación de esta herramienta. Se puede observar la conectividad de cada componente y módulo en el sistema decisorio de diferentes partes, originando una “nube de mantenimiento”.

Esta metodología de integración, al tener un enfoque modular, permite a los usuarios finales diseñar su propia configuración de herramientas y los módulos para sus necesidades y procesos, en función de sus perfiles.

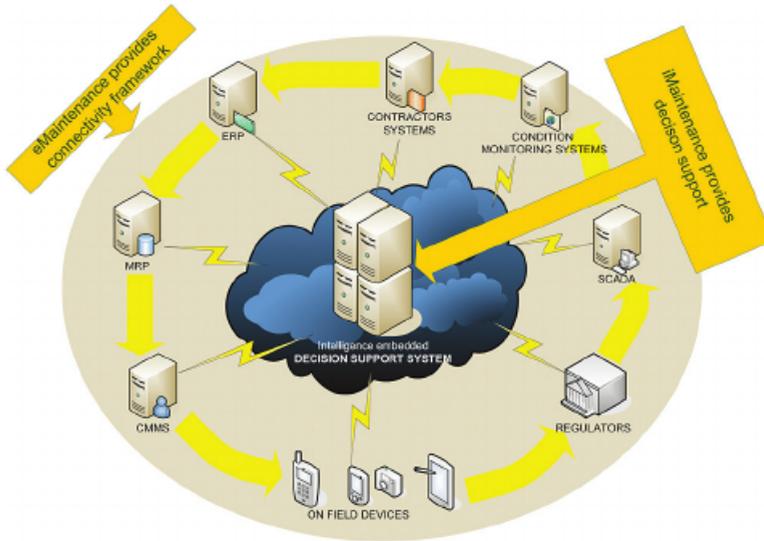


Figura 2.6: Ejemplo de aplicación conceptual: *eMaintenance / iMaintenance*.
Fuente: Galar y col. [43]

2.5 Coste de Mantenimiento

La palabra coste significa los recursos consumidos o “sacrificados” para alcanzar un objetivo. Como los recursos de los que dispone una organización son cada vez más escasos y controlados, su utilización eficiente es uno de los objetivos principales de la gestión del mantenimiento.

Según Dhillon [24], los costes de mantenimiento se definen como los costes que incluyen la pérdida de oportunidades en el tiempo de actividad, desempeño y calidad debido a equipos que operan insatisfactoriamente y equipos no operativos, sumados a los costes consecuencia de la degradación del equipo, la seguridad de las personas y el medio ambiente. Su valor puede variar de 2 a 20 veces el coste de adquisición.

Sin embargo, a menudo el coste de mantenimiento se describe simplemente como el gasto de mano de obra y materiales necesarios para mantener los equipos en estado satisfactorio de funcionamiento [8].

Conceptualmente el coste de mantenimiento está dividido en costes directos e indirectos. Los costes directos están asociados a los costes de materias primas y a los costes operacionales internos y exteriores. A los costes indirectos están asocia-

dos incluso los costes de mano de obra indirecta, costes de gestión de actividades y costes generales figura 2.7.

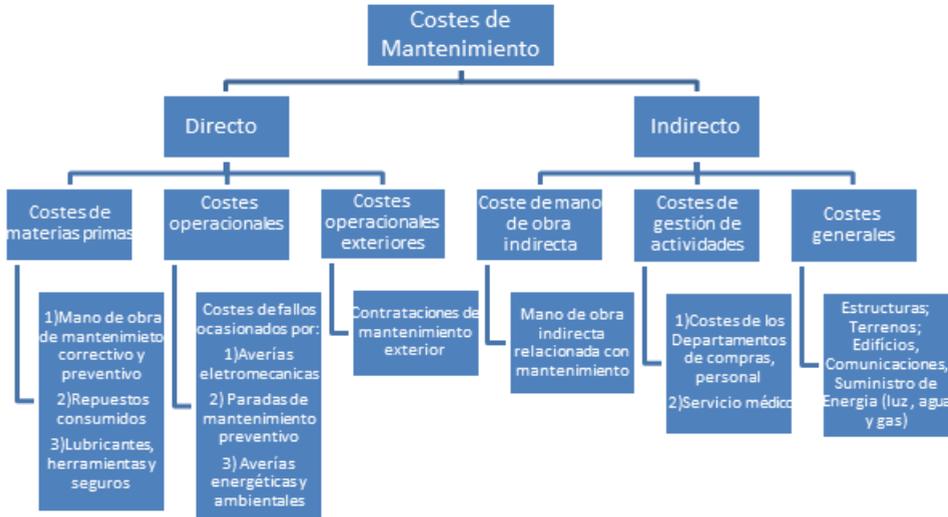


Figura 2.7: Costes de Mantenimiento.

Fuente: Fabricky [31]

Según [43], el modelo de costes mostrado está orientado a sustentar la generación de algunos indicadores económicos para un análisis basado en dos objetivos principales en la función mantenimiento, que se añan para conseguir el equilibrio entre la eficacia demandada y la eficiencia conseguida a tal fin. Ese equilibrio se define a través de la consecución de la mejoría de la disponibilidad y de los costes asociados figura 2.8.

2.6 Gestión del Mantenimiento en Flotas

Los objetivos principales de una flota de transporte de pasajeros deben ser la seguridad, la comodidad, la calidad y el cumplimiento del servicio. Un plan de mantenimiento adecuado debe posibilitar la consecución de estos objetivos. Este plan y otras actividades del mantenimiento son desarrolladas por todos los involucrados en los servicios de mantenimiento de las empresas [75]. Además, es una tarea compleja, que debe tener en cuenta diversos factores, como el tipo de vehículos que la conforman, su uso (urbano, carretera, intensivo, etc.), los planes

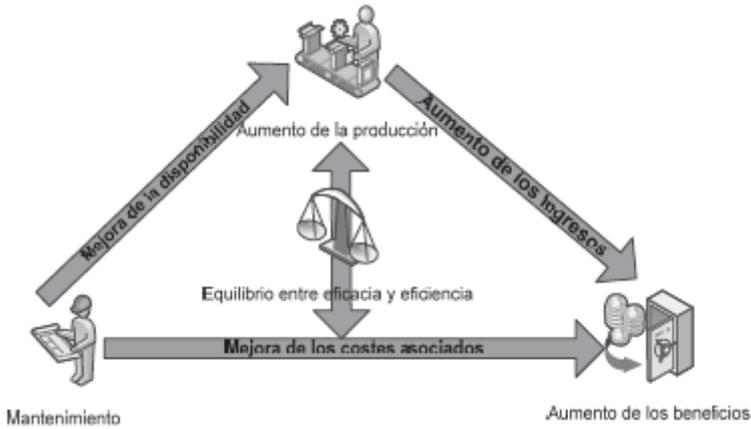


Figura 2.8: Equilibrio entre eficacia y eficiencia en la perspectiva financiera.
Fuente: Galar y col. [44]

de mantenimiento establecidos por los fabricantes de los vehículos y la realización, por medios propios o ajenos, de las operaciones en ellos incluidas para gestionar con eficiencia la flota.

Para una flota de transporte urbano, el principal objetivo de la Gestión del Mantenimiento es obtener el mínimo coste por kilómetro recorrido de los autobuses durante la vida útil, todo ello sin olvidar la influencia de la edad sobre los propios vehículos. Para obtener tal reto, la función del Mantenimiento debe asegurar que la flota de vehículos esté en condiciones de operatividad y seguridad, intentando evitar al máximo cualquier avería. Por lo tanto, un mantenimiento deficiente o incorrecto puede derivar en averías que disparen los costes y repercutan en la calidad del servicio [45].

Por regla general, existen dos políticas diferentes para abordar el mantenimiento que deben actuar de forma combinada:

- **Mantenimiento Correctivo:** La avería se repara en el momento en el que ésta se produce;
- **Mantenimiento Preventivo (Sistemático y Predictivo):** La actuación se produce antes de que se produzca la avería;

Sin lugar a duda, el Mantenimiento Correctivo es el menos recomendable, ya que provoca la aparición de costes por avería e inactividad, riesgo en el transporte y pérdida de imagen y servicio. Por todos estos motivos es clave definir

un Programa de Mantenimiento Preventivo Sistemático, basado en una revisión y sustitución periódica de piezas, ajustes y demás elementos que sean necesarios para mantener el vehículo en perfecto estado de funcionamiento, así como los cambios preceptivos de aceites, filtros y lubricantes en general. El programa debe tener tres grandes objetivos:

- Garantizar la seguridad, mediante el cumplimiento de las leyes y la reglamentación del transporte;
- Maximizar la disponibilidad de los vehículos, para no afectar a la calidad del servicio;
- Control y minimización de los costes;

Se debe definir también en el Plan de Mantenimiento la frecuencia con la que se deben hacer estas revisiones que en flotas de transporte deben expresarse en base a los kilómetros recorridos, se ha de tener en cuenta, entre otros, las recomendaciones de los fabricantes, la antigüedad de los vehículos o la frecuencia de utilización. Deberían ser programadas para momentos de no actividad, o actividad baja de los vehículos y fraccionadas para que se pueda atender correctamente el servicio. Todas estas labores preventivas de mantenimiento ayudan, como se ha comentado, a la reducción del consumo de combustible y forman parte de una gestión de cualidad y fiabilidad de la flota. Sin embargo, la aplicación de nuevas tecnologías, con la sensorización de bajo coste y el análisis de grandes volúmenes de datos, permiten una mejor adaptatividad de las políticas de mantenimiento preventivo, llegando a la aplicación del predictivo.

El Mantenimiento Preventivo Predictivo se basa en inspecciones de síntomas (monitorizado) con una frecuencia mínima que es, normalmente, submúltiplo del período base. Su objetivo es anticiparse a la aparición de averías mediante el conocimiento del estado o condición del elemento. Para ello se deben aplicar técnicas de diagnóstico, idealmente no intrusivas, para monitorizar el estado de los distintos sistemas del vehículo. La optimización de este tipo de mantenimiento requiere por una parte la determinación correcta de los síntomas a inspeccionar y sus límites de aceptación y rechazo, y por otra parte, el diagnóstico de averías. Para el diagnóstico de averías es aconsejable la combinación de diversas técnicas de monitorizado a través de un sistema experto que recoge el conocimiento de un especialista y que automatiza y homogeneiza todo el proceso. Como ejemplo, en el caso del motor el objetivo es diagnosticar su estado general (compresión, combustión, reglaje, etc.) a través del análisis de prestaciones como la potencia efectiva, compresión en cilindros y opacidad entre otros.

A parte de las técnicas anteriormente mencionadas, en los últimos veinte años ha sido posible controlar el funcionamiento de los autobuses y sus motores con niveles de rapidez y precisión impensables poco antes, gracias a la aplicación de las tecnologías electrónicas digitales de la información y de la comunicación, materializadas en los ordenadores, la fibra óptica, los satélites artificiales e Internet. Tras la difusión de estas tecnologías, se originó el concepto de “electrónica embarcada”. Esto implica en: 1)seguridad en el manejo, 2)aumento de los niveles de confort, 3)control de la potencia, 4)menores emisiones contaminantes, 5)reducción en el consumo de combustible, al mismo tiempo que el desarrollo general de la eficiencia en la gestión del transporte de pasajeros.

La electrónica embarcada, también llamada “informática embarcada”, se trata de un conjunto de sistemas de obtención y procesamiento de datos, que combina tecnologías mecánicas, eléctricas, de comunicaciones electrónicas y de computación, puesto a disposición del conductor para controlar el funcionamiento de los vehículos automotores y la operación de transporte. Entre los diversos recursos y beneficios que esta tecnología nos propicia en autobuses, podemos destacar:

- Sistemas de apoyo al conductor para proporcionarle mayor seguridad y confort en la conducción;
- Sistemas para mejorar el rendimiento de los motores y reducir la contaminación;

Estos sistemas:

- Miden las condiciones ambientales y/o funcionamiento de los vehículos, para esto utilizan sensores.
- Reciben los datos que envían los sensores, los elaboran y obtienen resultados, para esto se utilizan las **unidades de control electrónico** (en inglés *Electronic Control Unit, ECU*), verdaderos “cerebros” de cada sistema. Las unidades de control electrónico reciben los datos que toman los sensores, los procesan y obtienen resultados para ser aplicados en la utilización del vehículo.
- Convierten los resultados de las unidades de control en alertas para el conductor o en comandos para el vehículo, esto se realiza a través de **actuadores** que regulan el funcionamiento de las distintas partes del vehículo, motor, caja de cambios, frenos, luces, etc. (ver figura 2.9)

Por último, para la implantación del Plan de Mantenimiento (Correctivo,Preventivo y Predictivo), es imprescindible la utilización de herramientas informáticas para

⁴Fuente: <https://ceac.com.ar/wp-content/uploads/2010/07/COAP7.pdf>

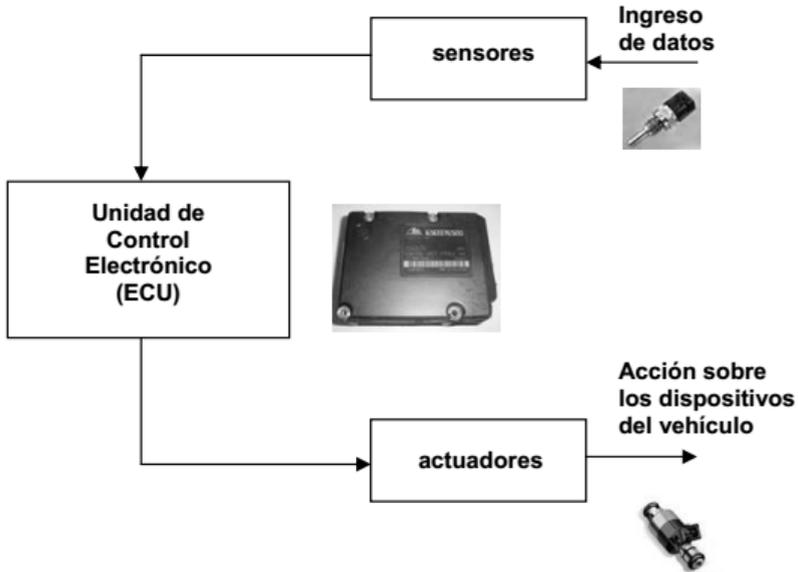


Figura 2.9: Diagrama de un sistema de control electrónico⁴.

la Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO), y otras herramientas de control de los servicios y datos, como el Mantenimiento Productivo total (TPM) y el Mantenimiento Basado en la Fiabilidad (RCM) [43].

Los procesos más importantes que contempla el sistema GMAO son:

- Planificación y priorización de revisiones. Se planifica la entrada del vehículo a Taller y priorizar por las intenciones más relevantes.
- Programación de las operaciones por vehículo.
- Control del material de repuesto, para evitar operaciones pendientes por falta de material.
- Control de Ordenes de Trabajo. Es necesario para organizar la carga del Taller en función de los recursos disponibles.
- Listados de informes a la carta. Debe contemplar la posibilidad de obtener la información que se requiera en cada momento.
- Control de los vehículos inmovilizados. Se controla para poder organizar el Servicio.

- Histórico de síntomas y anomalías. Para analizar la evolución de los mismos y mejorar el plan de mantenimiento predictivo.
- Diagnóstico de averías a través de un Sistema Experto. Los resultados de la inspección predictiva se integran con la programación de operaciones, además deben almacenarse para posteriores análisis de tendencias e información del histórico.

Estos procesos son los más usuales dentro del mantenimiento. Sin embargo existen muchos otros que resuelven las particularidades de cada empresa y que por tanto, son necesarios para la gestión de la misma.

Para que un sistema de gestión del mantenimiento para una flota de transporte urbano sea realmente efectivo, requiere la integración de una serie de aspectos que se enumeran a continuación y que involucran tanto a la parte técnica como a la parte administrativa y de gestión:

- Organigrama funcional bien definido. Planes y procesos de mantenimiento optimizados y en constante evolución.
- Indicadores claros, útiles y rápidos de obtener y definidos a niveles estratégicos o de gerencia y operativos.
- Impresos funcionales e informatizados. Metodología de trabajo rigurosa.
- Mejora continua del mantenimiento.

Entre estos aspectos, los indicadores técnicos a nivel operativo hacen referencia básicamente a la gestión a corto y medio plazo, es decir, estos indicadores son los que manejan los Responsables de Mantenimiento dentro de la gestión del mismo. El objetivo que se persigue en este nivel es asegurar la disponibilidad de la flota, que se consigue maximizando la disponibilidad de los activos y esto se consigue mediante otros objetivos secundarios que son, cumplir con los planes preventivos planificados, realizar el correctivo, detectar averías repetitivas, garantizar la calidad de la reparación y la seguridad del vehículo. Puesto que para abarcar todos estos objetivos se necesita una gran cantidad de indicadores, es preferible definir unos cuantos generales que nos adviertan y controlen el cumplimiento de los objetivos marcados.

Además, se ha de decidir dónde hacer las revisiones y otros servicios del mantenimiento. Si en taller propio o en talleres ajenos. La elección dependerá de criterios económicos, del coste que preveamos para dichas revisiones. Una fórmula mixta también puede ser aconsejable, dejando las revisiones más cualificadas y específicas en manos de terceros. Independientemente del lugar donde se produzcan las revisiones o reparaciones cada vehículo debe disponer de un informe

histórico donde consten los datos (fecha, naturaleza, lecturas, piezas sustituidas, etc.) inherentes a cada uno de ellos.

Capítulo 3

Estudio y Desarrollo de la Metodología Combinada LCC+SMC para Optimizar el Reemplazo de un Autobús

Este capítulo presenta una revisión del estado del arte de los métodos y modelos para el reemplazo de flotas de vehículos, tanto los publicados en la literatura como los realizados en la práctica, y se se presenta la definición, desarrollo y aplicación de la metodología basada en la herramienta *LCC* y en el modelo matemático Monte Carlo.

3.1 Introducción

Todos los años millones de euros son gastados para el desarrollo, fabricación y operación de los sistemas de transporte de viajeros en todo el mundo, tanto en el uso de trenes, aviones, barcos, vehículos de transporte públicos y vehículos privados. Sin embargo, el autobús continúa siendo uno de los medios de transporte más importante para los desplazamientos de las personas en centros urbanos. Como consecuencia, las empresas del sector de transporte urbano de viajeros están

cada vez más preocupados en controlar todos los costes directos e indirectos de forma más eficaz y económicamente viable. Otro punto importante es la necesidad de gestionar de manera eficiente los costes de operación y mantenimiento (O&M) de su flota. El principal objetivo de tal procedimiento es, obtener el mínimo coste por kilómetro recorrido de los vehículos durante la vida útil, pero sin olvidar la influencia de la edad sobre los vehículos con el objetivo de maximizar la disponibilidad de la flota.

Para la evaluación de los costes es importante considerar la disminución del valor monetario de un bien con el tiempo debido a su uso, el desgaste u obsolescencia. Además, para un vehículo este proceso puede ser intensificado por una serie de factores tales como: la edad; las condiciones de operación de la flota (kilometraje anual, la velocidad de funcionamiento, las condiciones climáticas, la carga de pasajeros, etc.); y políticas del mantenimiento de la flota [40, 25].

Estos factores influyen también la eficiencia y la vida útil de los componentes del vehículo, tales como sistemas de frenos, transmisiones, neumáticos y otros. La acción conjunta de estos factores influye directamente en los costes de operación y mantenimiento del vehículo, y por lo tanto el coste del ciclo de vida. Aunque los autobuses se vuelven menos fiables con la edad, los estudios muestran que es posible aumentar su ciclo de vida con una mejor gestión del mantenimiento. En general, las empresas que siguen un estricto régimen de mantenimiento preventivo pueden tener un deterioro mínimo del vehículo durante la vida útil esperada [36].

La mayoría de las técnicas de evaluación de costes toman en consideración el valor del dinero en el tiempo. Así, para propósitos de comparación, el gasto futuro, ocurrido en diferentes periodos de tiempo debe ser ajustado a un momento común en el tiempo. Este ajuste, para llevarlo a un momento común en el tiempo, es denominado análisis del valor presente, lo cual se materializa aplicando unos determinados factores de descuento que son calculados considerando una tasa de descuento y el periodo de análisis. Estos factores de descuento indican el valor presente (valor al día de hoy) de un Euro, Dólar, Libra Esterlina, etc., gastado al término de cada año, asumiendo que el descuento se aplica al final del año.

El cálculo del valor presente es una técnica usada para comparar los costes y beneficios que ocurren en diferentes periodos de tiempo. Se trata de una técnica separada de la inflación, y se basa en el principio de que, en general, las personas prefieren recibir los bienes y servicios ahora en lugar de aplazar dicho disfrute [1].

Calcular el valor presente resultante de los flujos de costes y beneficios, proporciona el Valor Actual Neto (VAN), un indicador que, según Boadway [11], sigue siendo uno de los principales criterios económicos. Para cada país, la Ta-

sa de Descuento recomendada por lo general es determinada por su respectivo Ministerio de Economía o entidad equivalente.

En el tratamiento y usos de los datos asociados al coste, habrá que prever la homogenización de la información de entrada; es decir, la normalización correspondiente a los cambios y adaptaciones requeridas para que los datos sean aplicables a un determinado modelo.

La *Society of Cost Estimating and Analysis - SCEA* [97], recomienda el proceso de normalización de datos para lo siguiente:

1. Ajustar un parámetro a un valor aceptable para ser empleado en un instrumento de medición.
2. Para que los valores de las bases de datos sean constantes o ajustados por diferencias conocidas.
3. Para los costes, significa que la moneda corriente, actual o de un año específico debe ser escalada a una base común. Esto se conoce como deflactar o indexar para llevar los datos a un año común de comparación.

Independientemente de cómo los datos se normalicen, es importante que el proceso se haya documentado de manera exacta, completa y detallada. Este es el caso, si en la normalización se utilizan datos primarios o secundarios que luego se emplearán en el proceso de estimación del coste del ciclo de vida.

Habrà que tener presente que, según a su fuente, los datos de costes pueden ser identificados como primarios o secundarios. Un dato primario proviene de una fuente original y se caracteriza por ser de calidad, por lo que es preferido sobre los datos secundarios que proceden de fuentes indirectas y cuya calidad corresponde a una aproximación de menor grado. Sin embargo, dado que los datos primarios provienen de una variedad de fuentes, en general habrá una falta de uniformidad en los datos y, por tanto, será inevitable normalizar una cierta cantidad de datos.

3.2 Histórico de los Modelos de Optimización

Los primeros modelos para optimizar las decisiones relativas a la compra de vehículos, utilización, mantenimiento y, sustitución, se presentaron en la década de 1950 [6]. Desde entonces, muchos investigadores han analizado los problemas de reemplazo en una amplia gama de tipos de flota [66, 91]. Algunos investigadores han añadido restricciones presupuestarias e incluso factores de la fabricación de los vehículos en un análisis del ciclo de vida del automóvil [60, 68]. A pesar de la gran incertidumbre asociada a las variables financieras y las previsiones, todos los

modelos mencionados han sido deterministas [64]. Varios estudios en el ámbito del transporte público han demostrado cómo cambian los costes y la eficiencia de operación y mantenimiento (O&M) de los vehículos en función de la edad, del tipo de combustible adoptado, motorización y modelos de diseño [15, 16, 17, 70, 98].

La gestión resulta más compleja cuantas más unidades hay en la flota considerada, cuanto más variada sea su edad y cuantos los más tipos de vehículos la conformen. No todos los enfoques abordan esta cuestión de la misma manera. Mientras en unos métodos se da sólo la solución para unidades similares en características y operación, otros intentan resolver el problema completo para una flota compuesta por distintas clases de vehículos.

Según la literatura, hay un gran número de modelos de optimización para la determinación de la sustitución de los vehículos. Estos modelos son de dos categorías: si los autobuses de la flota son homogéneos o heterogéneos. En los modelos homogéneos, el objetivo es encontrar la mejor edad de la sustitución de autobús para un conjunto de vehículos idénticos, en otras palabras, los autobuses con el mismo tipo y edad tienen que ser reemplazados juntos (también conocida como "*no cluster splitting rule*"). Estos modelos suelen resolverse mediante un enfoque de programación dinámica (*Dinamic Programming - DP*) [4, 5, 50, 53, 86]. La programación dinámica tiene la ventaja de permitir la consideración de las distribuciones probabilísticas para algunas variables de estado, tales como la utilización o los costes operativos.

Modelos heterogéneos son más apropiados cuando flotas de autobuses de modelos diferentes (considerando distintos modelos de autobuses y con edad diferente), tienen que ser optimizados simultáneamente o cuando se tienen restricciones presupuestarias. Estos modelos son capaces de resolver los problemas más prácticos, pero las variables de entrada suelen ser determinista. Modelos heterogéneos estocásticos son más difíciles de resolver y emplean formulaciones de programación integral (*Integer Programming - IP*) [49, 51, 52, 102]. Con supuestos adicionales un enfoque DP se puede aplicar a los problemas heterogéneos.

Varios estudios han descrito el uso de modelos de optimización para resolver problemas del mundo real. Dos de los más importantes han sido presentados por Feng y Figliozzi [36], donde adoptaron modelos de IP para estudiar una flota de vehículos de pasajeros y camiones de reparto heterogéneas con datos operativos reales. Los impactos de la política, el mercado, la utilización, las emisiones y los factores tecnológicos fueron analizados mediante análisis de escenarios y análisis de elasticidad. En otra investigación Figliozzi, Boudart y Feng [40] estudiaron cómo los factores económicos y tecnológicos afectan la edad óptima de reemplazo.

A pesar del gran número de modelos y métodos presentes en la literatura, las decisiones de renovación y los criterios utilizados suelen diferir de una institución u organización a otra, de acuerdo con su necesidad y presupuesto disponible.

3.3 Métodos y Modelos para Evaluación del Costes

De acuerdo con la OTAN [92], los métodos de evaluación se pueden clasificar en: Métodos de Optimización; Métodos de Simulación; Métodos de Apoyo a las Decisiones y Métodos de Estimación.

3.3.1 Métodos de optimización

Destaca en este caso el empleo de métodos de programación matemática (programación lineal) y de métodos heurísticos. Estos últimos corresponden a algoritmos basados en el empleo de pruebas, exámenes o aproximaciones para llegar a dar con una solución. De esta forma, sin conocer unos datos base exactos, podemos llegar a un resultado final.

- **Programación Lineal:** La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de un sistema de inecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal [54].

Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones expresadas mediante un sistema de inecuaciones lineales. Un modelo de programación lineal se compone de tres elementos básicos:

- Las variables de decisión que necesitan ser determinado.
- Objetivo (objetivo) que necesita ser optimizado.
- Las restricciones que deben ser satisfechas.

La programación lineal es particularmente útil para los problemas grandes y mediana escala en los cuales hay muchas variables y muchas limitaciones a tener en cuenta. Por lo tanto, el uso de la programación lineal es a menudo apoyado por los programas informáticos.

- **Métodos Heurísticos:** Estos corresponden a algoritmos basados en el empleo de pruebas, exámenes o aproximaciones para llegar a dar con una solución. De esta forma, sin conocer unos datos base exactos, podemos llegar a

un resultado final. Estos tipos de modelos pueden ser más fáciles de aplicar que los métodos de programación matemática [95].

3.3.2 Métodos de Simulación

Los sistemas dinámicos y la simulación de eventos discretos son formas de modelado, simulación y análisis que permiten una representación de las actividades de un sistema a través del tiempo. En cada caso, las simulaciones representan etapas o situaciones en el tiempo, lo que implica cambios en el estado del sistema. El estado final de un momento o situación determinada es el comienzo para el próximo estado.

- **Sistemas Dinámicos:** Un sistema dinámico es un sistema físico cuyo estado evoluciona con el tiempo. Siendo un sistema físico, un agregado de objetos o entidades materiales entre cuyas partes existe una conexión o interacción o un modelo matemático. El comportamiento en dicho estado se puede caracterizar determinando los límites del sistema, los elementos y sus relaciones; de esta forma se puede elaborar modelos que buscan representar la estructura del mismo sistema.

Al definir los límites del sistema se hace, en primer lugar, una selección de aquellos componentes que contribuyan a generar los modos de comportamiento, y luego se determina una estructura matemática. Esta estructura permite la representación de comportamiento complejo durante el uso de ecuaciones comparativamente simples para cada relación.

Son generalmente buenos para la construcción de modelos con un amplio alcance y comportamientos de largo plazo. Por lo general son más rápidos de construir que las simulaciones de eventos discretos y ejecutar con mayor rapidez. Los modelos por lo general no contienen elementos estocásticos (no determinista), a pesar de que se pueden ejecutar varias veces con diferentes valores de entrada para examinar la incertidumbre en torno a los insumos. Modelos de dinámica de sistemas son buenos para el ciclo de vida costando donde puede haber una amplia gama de factores de coste, un gran número de artículos y de larga duración.

- **Simulación de Eventos Discretos:** Utiliza pasos desiguales en el tiempo con el modelo que salta hasta el punto en el tiempo en el que él se producirá próximo evento. El evento causará un cambio en el estado del sistema que puede desencadenar otros eventos a ocurrir inmediatamente y / o programar otro evento que se produzca en un punto en el futuro. El modelo hace un seguimiento de cada entidad del sistema en términos de ubicación y puede

almacenar las características de cada entidad. Muchos de los modelos tienen animaciones que muestran el estado del sistema, aunque gran parte de la lógica real esta oculta por debajo de la superficie del modelo.

La simulación de eventos discretos es buena para la construcción de modelos con un alcance limitado y con duraciones de corto plazo. Por lo general se tarda más tiempo en construirlos que los modelos de sistemas dinámicos y se ejecutan más lentamente porque cada una de las entidades se representa de forma individual. Este modelo permite que los elementos estocásticos, utilicen muestreo de distribuciones de probabilidad para representar otros factores como tiempos de llegada y la duración de actividades. Debido a los elementos estocásticos en los modelos, todos los experimentos deben hacer uso de varias ejecuciones con el fin de calcular las medias y las desviaciones estándar para las variables de salida claves. Este modelo es bueno para los modelos logísticos en los que es importante entender cómo el sistema puede hacer frente a los picos y valles en la demanda.

Un modelo representativo de este método es la Simulación de Monte Carlo (SMC). La creación del método Monte Carlo suele estar vinculada a los nombres de los matemáticos norteamericanos J. von Neumann y S. Ulam, cuando trabajaban en el proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial, la idea del cálculo Monte Carlo es mucho más antigua que la aparición de los computadores y era conocido anteriormente por el nombre de “muestreo estadístico”, cuando los cálculos aún se realizaban a papel y lápiz. El método fue bautizado así por su clara analogía con los juegos de ruleta de los casinos, proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas numéricos en ciencias, ingeniería, estadística y finanzas.

La importancia actual del método Monte Carlo se basa en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilístico artificial (resolución de integrales de muchas variables, minimización de funciones, etc.). Gracias al avance en diseño de los ordenadores, los cálculos con el método Monte Carlo que en otro tiempo hubieran sido inconcebibles, hoy se presentan como asequibles para la resolución de ciertos problemas.

Según [46] G.D. y col. se puede considerar SMC como un método general, que resuelve un problema matemático a través del estudio estadístico de resultados entregados por repetición de un experimento. La Simulación de Monte Carlo no resuelve las ecuaciones que describen un modelo, solo se simula y se observa el comportamiento estocástico de estos. Por lo tanto, se

requiere considerar un periodo de tiempo suficientemente largo que asegure la convergencia de los resultados.

La base del método es la generación de números aleatorios que son utilizados para calcular las probabilidades. Conseguir un buen generador de estos números, así como un conjunto estadístico adecuado sobre el que trabajar son las primeras dificultades a la hora de utilizar este método.

3.3.3 Métodos de Apoyo a las Decisiones

Es un tipo de análisis que evalúa una serie de variables dentro de un marco general o paradigma y por ende investiga problemas de decisión con diferentes atributos, objetivos o metas. Los métodos más conocidos son: Proceso Analítico Jerárquico (AHP-Analytic Hierarchy Process), Utilidad Multiatributo (MAUT-Multi Attribute Utility Theory) y Ponderación Lineal (Scoring):

- **Proceso Analítico Jerárquico (AHP):** El Proceso Analítico Jerárquico se basa en la idea de que la complejidad inherente a un problema de toma de decisión con criterios múltiples se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados.

Este método puede considerarse, según la orientación dada al mismo, de muy diversas maneras. Su contribución es importante en niveles operativos, tácticos y estratégicos, sirviendo para mejorar el proceso de decisión debido a la gran información que aporta y a la mejora en el conocimiento del problema. Se puede entender como:

- Una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando en el modelo los aspectos tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisión.
- Una teoría matemática de la medida generalmente aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- Una filosofía para abordar, en general, la toma de decisión.

La principal característica del AHP es que el problema de decisión se modela mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, meta a alcanzar y, en la base, se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios (los cuales a su vez se pueden estructurar también en jerarquías) en base a los cuales se toma la decisión. El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento

del problema que se plantea, para lo cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

La segunda característica del método es que, en cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. La tercera característica del AHP es que la información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente.

Las aplicaciones de la AHP a situaciones complejas de decisión se han numerado en miles, y han producido resultados extensos en problemas que incluyen planificación, asignación de recursos, establecimiento de prioridades y selección entre alternativas. Otras áreas han incluido previsión, gestión de calidad total, reingeniería de procesos de negocio, despliegue de funciones de calidad y el cuadro de mando integral. Muchas aplicaciones de AHP nunca se reportan al mundo en general, porque ocurren en altos niveles de grandes organizaciones donde las consideraciones de seguridad y privacidad prohíben su divulgación. Sin embargo, algunos usos de AHP se discuten en la literatura. Recientemente fueron incluido:

- Seleccionar un tipo de reactores nucleares [74].
- Evaluación del riesgo en la explotación de oleoductos de todo el país [23].
- Selección de ubicaciones de inversión industrial en planes maestros de países [96].

En resumen, según Saaty [95] Ho, Dey e Higson [54], el método AHP es un modelo de decisión que interpreta los datos y la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida. Es un método de selección de alternativas (estrategias, inversiones, etc.) en función de una serie de criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto.

- **Utilidad Multiatributo (MAUT):**

Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial), y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación de orden” (rank preservation). La condición de

independencia preferencial mutua entre los atributos suele aceptarse casi axiomáticamente, e implícitamente es cuestionable y no refleja la estructura de preferencias del agente decisor. El rigor y rigidez de los supuestos teóricos de este método usualmente controvertidos y difíciles de contrastar en la práctica, lo que obliga a relajarlos, requiere un elevado nivel de información del agente decisor para la construcción de funciones de utilidad multiatributo, aunque permiten abordar fluidamente cuestiones de incertidumbre y riesgo [45].

■ Ponderación Lineal (Scoring):

Es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas. El método de Ponderación Lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método fácil y utilizado ampliamente en el mundo.

3.3.4 Métodos de Estimación

Los Métodos de Estimación, emplean algoritmos y cálculos matemáticos, que van desde las operaciones más simples hasta funciones econométricas. A diferencia de los anteriores métodos, esta técnica se basa en la información histórica y real, cualitativa o cuantitativa, para predecir el comportamiento de una variable.

Los métodos más importantes para desarrollar la estimación de costes han sido descritos, entre otros por Dhillon [26], Farr [33], Emblemavag [28], Pugh [88], Nassar [84]. En base a estas aportaciones, las técnicas son:

1. Estimación por analogía (*Top-Down*)
2. Estimación mediante métodos paramétricos (Estadístico)
3. Estimación mediante procedimientos de ingeniería (*Bottom-Up*)
4. Estimación mediante la contabilidad de costes (*Cost Accounting*)

1. Estimación por Analogía

El método análogo o comparativo supone que ningún nuevo proyecto representa un sistema totalmente nuevo. La mayoría de los programas nuevos se originan o se desarrollaron de uno ya existente o simplemente representan una nueva combinación de componentes existentes. Este método, también conocido como *Top-Down*, requiere una amplia experiencia y conocimiento de los estimadores.

Esta técnica compara un nuevo sistema con uno o más sistemas existentes para los que hay información exacta de los costes y los datos técnicos. El sistema histórico debe ser de tamaño similar, complejidad y alcance. Normalmente, se realiza una evaluación técnica de las diferencias entre los sistemas y sobre sus diferencias técnicas en función del coste.

La estimación por analogía tiene muchas ventajas. Es razonablemente rápida, de bajo coste y, además, fácil de cambiar. Sin embargo, una estimación generada por analogía normalmente tiene un alto grado del riesgo en el coste porque se basa en un solo punto de referencia histórico, y existe la tendencia a requerir un juicio subjetivo respecto de cuál es el sistema análogo.

2. Estimación mediante Métodos Paramétricos

Los modelos paramétricos son en muchos aspectos más avanzados a los modelos por analogía y existen tres diferencias principales. En primer lugar, un modelo por analogía depende de un factor de coste único, dominante, mientras que un modelo paramétrico puede utilizar varios parámetros. En segundo lugar, un modelo de analogía se basa en las relaciones entre los costes y los factores de coste, mientras que los modelos paramétricos se basan en uno o varios modelos de regresión más lineales. En tercer lugar, son fáciles de usar en algoritmos de optimización, dado que pueden ofrecer una visión más clara y una mayor precisión que los modelos por analogía, y por consiguiente se encuentran a menudo en la literatura de la ingeniería.

Este método de estimación se basa en una relación entre alguna variable característica y el coste del producto. Estas variables explicativas pueden relacionar características físicas (por ejemplo, peso, volumen y dimensión), o de funcionamiento (por ejemplo, velocidad, energía, empuje y MTBF) con el coste; pueden incluso relacionar otros elementos de coste. Este método puede usar técnicas estadísticas que varían desde un simple ajuste gráfico de curvas hasta un análisis de correlación múltiple. En general, se obtienen expresiones matemáticas lineales y no lineales y su objetivo es encontrar una relación funcional entre los cambios en el coste y el factor o factores de los que depende el coste. Donde sea posible, las ecuaciones matemáticas se deben utilizar para facilitar la valoración del coste.

A partir de la limitada información disponible en las primeras fases del ciclo vital, la técnica paramétrica es de gran valor y el estimador se basará en datos históricos. Sin embargo, se debe tener la precaución de cerciorarse de que los datos históricos sean aplicables al producto, el sistema o caso analizado. Aun que las técnicas paramétricas de estimación del coste son las preferidas en la mayoría de las situaciones [80], hay casos en que son precisos los métodos de ingeniería o la estimación por analogía porque no existen datos con una base

histórica sistemática. Para los productos tecnológicamente únicos, la base de datos histórica existente puede ser inadecuada, no pudiéndose determinar con exactitud la afectación de costes de tipo paramétrico. Habrá siempre situaciones en las que se necesitan métodos de analogía o de ingeniería, pero el método estadístico se considera suficiente en planificaciones a largo plazo.

Las técnicas paramétricas de estimación variarán según el objetivo del estudio y la información disponible. En el diseño conceptual, es deseable tener un procedimiento de cálculo que entregue el coste total esperado del producto.

Las reservas para imprevistos sirven para compensar los cambios que puedan surgir. Posteriormente, a medida que el producto o sistema se acerca al diseño de detalle, es deseable tener un procedimiento que ofrezca estimaciones de sus componentes. Nuevamente, es importante identificar y formalizar estos cambios en la estimación de los costes, y también concentrarse en aquellos elementos que tengan una alta contribución en el coste total (*cost drivers*).

Normalmente, este método se aplica empleando funciones ajustadas matemáticamente conocidas como Relaciones de Estimación del Coste (*Cost Estimating Relationships - CER*). Luego, una relación de estimación del coste es un modelo funcional que describe matemáticamente el coste de una estructura, sistema o servicio en función de una o más variables independientes. Por supuesto, debe existir una relación lógica o teórica de las variables con el coste, una significación estadística de la contribución de las variables, e independencia entre las variables consideradas. De acuerdo a Fabricky [31], las funciones más conocidas son las siguientes:

- Funciones lineales simples (regresión lineal).
- Funciones simples no lineales (exponenciales, parabólica e hiperbólicas).
- Funciones escalón discontinuas.
- Funciones de distribución estadística, etc.

La estimación por métodos paramétricos presenta muchas ventajas sobre otros métodos de estimación. Debido a su naturaleza, una Relación de Estimación de Coste (CER) se basa en más de un punto de referencia, por lo que tiene menos riesgo que el método por analogía. Una ventaja importante de aplicar métodos estadísticos es que uno puede también medir error de una CER y realizar fácilmente un análisis de sensibilidad del coste.

3. Ingeniería de costes

El método de ingeniería de costes es el más detallado de todas las técnicas y la más costosas de implementar. Los procedimientos de estimación de ingeniería (también conocidos como *Bottom-Up*) exigen más horas de trabajo y más datos de lo que se dispone cuando se estudia el desarrollo de algunos sistemas o productos; es decir, es necesaria una base de datos ordenada y actualizada para ser empleada, y/o utiliza los factores de coste establecidos de forma estándar (ingeniería y / o por estimación) para desarrollar el coste de cada elemento y su relación con otros elementos. Este modelo es probablemente lo que algunos se refieren como un enfoque de ingeniería industrial. Este tipo de cálculo se utiliza cuando existen datos detallados y precisos de costes del capital y operacionales para el activo o sistema en estudio, en otras palabras, todos los recursos que se necesitarán para llevar a cabo todas las actividades que se han identificado y que generarán un coste al proyecto.

4. Contabilidad de costes

Numerosos métodos en la literatura probablemente mezclan los tres métodos ya mencionados, y en particular los métodos paramétricos y de ingeniería. Ninguno de estos enfoques, sin embargo, se encarga de los gastos generales correctamente porque no capta la complejidad de las organizaciones modernas. Además, muchos de los datos pueden ser manipulados y generados de forma torcida por los sistemas de contabilidad de costes tradicionales. Además, la importancia de manejar correctamente los gastos generales es cada vez mayor debido al aumento de la automatización y el uso de tecnologías avanzadas en las empresas. Modelos de costes de ingeniería, a pesar de que ofrece mucho más discernimiento que la analogía y los modelos paramétricos, son por lo tanto también limitados en su uso. Pero, como su nombre lo indica, son particularmente útiles en situaciones de ingeniería y de desarrollo para indicar una estimación del coste inicial. Sin embargo, como a medida que la información se vuelve más y más disponible, el modelo de Contabilidad de Costes (*Cost Accounting*) es un método muy eficiente [65].

De acuerdo con Emblemavag [28], esta técnica está basada en la estimación de costes en tres grupos: Coste Basado en Volumen (*Volume Based Costing*); Coste no Convencional (*Unconventional Costing*) y Sistemas Modernos de Gestión de Coste (*Modern Cost Management Systems*).

Para este estudio, los sistemas modernos de gestión de costes se presentan como de mayor importancia. Emblemavag [28], describe cuatro de ellos: *Activity Based Costing (ABC)*, *Just In Time (JIT) Costing*, *Target Costing (TC)* y la *Strategic Cost Management (SCM)*.

Aun así, según Emblemavag, es posible mezclar y combinar los beneficios de los métodos **ABC-LCC (Life Cycle Costing)** y **Monte Carlo**. Esto resulta en un modelo con una gran cantidad de ventajas sobre los modelos existentes, para propiciar un mejor control de los costes de forma efectiva; establece una relación de causa y efecto, además estima todos los costes de forma simultánea.

El sistema de costes ABC se centra específicamente en la gestión de actividades como forma que tienen las empresas para ganar competitividad. Una actividad es una combinación de personas, tecnología, materias primas, métodos, y entorno para producir un determinado producto o servicio. Describe lo que hace la empresa: el tiempo que invierte en sus procesos y los *outputs* de los mismos. En definitiva, una empresa puede gestionar lo que hace, sus actividades. El punto de partida para gestionar actividades es conocer y comprender los recursos consumidos normalmente por las actividades que se realicen día a día (Coste de las Actividades), el volumen de *output* que produce cada actividad (Medida de Actividad o *Activity Driver*), y como se lleva a cabo la actividad (Medida del Rendimiento). Esta información es la que se extrae de un sistema de costes basado en las Actividades (ABC), y por consecuente mide el rendimiento financiero de la empresa. El sistema de costes ABC puede aplicarse en cualquier tipo de industria, ya sea fabril como de servicios.

Un sistema ABC implica el desarrollo de tres etapas clave:

1. Identificación y atribución de los recursos consumidos por las actividades cuyo coste debe determinarse.
2. Selección de las “Medidas de Actividad” para cada actividad y establecimiento del sistema para capturar datos sobre el volumen de actividad.
3. Aplicación de las “Medidas de Actividad” a las líneas de producto o servicios para generar información sobre el coste de los productos o servicios.

Los beneficios fundamentales del sistema ABC son:

- Mayor visibilidad de los costes indirectos.
- Énfasis en las actividades que se desarrollan a través de diferentes departamentos.
- Mejora de la comprensión del comportamiento de los costes indirectos por parte de los directivos de las empresas.
- Control y reducción de los costes indirectos mediante la eliminación y reorganización de las actividades.
- Aumento de los recursos en aquellas actividades críticas para el éxito.

- Nueva forma de medir los rendimientos.
- Un lenguaje común a toda la organización.

3.4 Método Life Cycle Cost (LCC)

3.4.1 Evolución histórica del LCC

Los primeros antecedentes relacionados con la aplicación del LCC surgen, durante la II Guerra Mundial, a partir de las actividades de investigación del *Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory* - USA (*RadLab*). De acuerdo con Maturana [80], en 1945 los directivos del RadLab crearon e implementaron diferentes procesos de diseño de sistemas para facilitar el desarrollo de radares de microondas para su empleo militar, entre los cuales estaba el análisis del coste del ciclo de vida.

Posteriormente, en 1960, oficiales del Departamento de Defensa de los Estados Unidos determinaron que el coste de utilización y mantenimiento de los sistemas de armas representaba el 75 % del coste incurrido durante todo el ciclo de vida [48]. Así, el *Logistics Management Institute* en 1965, por encargo de la entonces Subsecretaria de Defensa para Instalaciones y Logística de los Estados Unidos, publicó un informe, que dio una amplia difusión al concepto “coste del ciclo de vida” (Life Cycle Cost – LCC). Como resultado de este informe, a través del Departamento de Defensa se emitieron tres documentos directrices:

- Guía de Adquisiciones mediante el LCC.
- Estudio de Casos para el LCC en Adquisiciones de Equipamiento.
- Guía del LCC para el Sistema de Adquisiciones de Equipamiento.

Lo anterior, se complementó con la publicación en 1971 de la Directiva 5000.1 “Adquisición de Sistemas Principales de Defensa”, donde se estableció como requisito de adquisición que los futuros sistemas debían considerar el análisis LCC. Posteriormente, en 1975 los Ministerios de Sanidad, Educación y Bienestar de Estados Unidos, desarrollaron el proyecto titulado “Presupuestario y Costes del Ciclo de Vida en apoyo a la Toma de Decisiones” [80]. En 1978, el Congreso de Estados Unidos promulgó el Acta Política Nacional de Conservación Energética mediante la cual se estableció que la construcción de todos los edificios públicos debería considerar la evaluación del LCC.

Según Dhillon [26], a partir de los años 80 hubo un aumento de investigaciones sobre el tema, en distintas áreas de la industria. Además, según el mismo autor,

en 1989 ya había más de 500 publicaciones sobre diversos aspectos del ciclo de vida de costes.

3.4.2 Conceptos Generales del LCC

Es fundamental para el concepto del cálculo del coste del ciclo de vida una comprensión básica del ciclo de vida de un producto y de las actividades a realizar durante esas fases. También es esencial la comprensión de las relaciones de esas actividades para el funcionamiento, seguridad, fiabilidad, mantenibilidad y otras características del producto que contribuyen al coste del ciclo de vida. Hay seis fases principales en el ciclo de vida de un producto (figura 3.1).



Figura 3.1: Fases del ciclo de vida.
Fuente: UNE-EN 60300-3-3 [105]

Deberán seleccionarse las fases apropiadas del ciclo de vida o partes o combinaciones de estas fases, para adaptarse a las necesidades especiales de cada análisis específico. De forma general, los costes totales durante las indicadas fases se pueden dividir en coste de adquisición, coste de propiedad y coste de eliminación.

$$\text{LCC} = \text{Coste de adquisición} + \text{Coste de propiedad} + \text{Coste de eliminación}$$

Los costes de adquisición son generalmente evidentes, y pueden evaluarse fácilmente antes que se tome la decisión de adquisición y pueden incluir o no los costes de instalación.

Los costes de propiedad, que con frecuencia son el componente mayor del LCC exceden en muchos casos a los de adquisición y no son tan evidentes. Estos costes son difíciles de predecir y pueden incluir también costes asociados con la instalación.

Los costes de eliminación pueden representar una proporción significativa del total del LCC. Son particularmente difíciles de estimar en el momento del diseño. Sin embargo, la experiencia puede servir como guía, incluso aplicada únicamente en términos de porcentajes del coste inicial. Los costes reales que se producirán, se compensarán en alguna forma con el valor en ese momento de los componentes recuperados y de los materiales reciclados.

La normativa española UNE-EN 60300-3-3 [105], define LCC como: ‘*El cálculo del coste del ciclo de vida es el proceso de análisis económico para determinar*

el coste de adquisición, propiedad y eliminación de un producto. Puede aplicarse al ciclo de vida completo del producto o a partes o combinaciones de diferentes fases de su ciclo de vida". El análisis según esta metodología proporciona aportes importantes para el proceso de toma de decisión tanto, en el diseño, desarrollo, uso, eliminación del producto, reciclaje o venta del mismo.

Para Farr [33], Life Cycle Cost (LCC) son todos los costes previstos asociados con un proyecto o programa a lo largo de su vida. Son la suma total de los costes relacionados directos, indirectos, recurrentes, no recurrentes, y otros incurridos o estimados a incurrir, en el diseño, la investigación y el desarrollo, la inversión, las operaciones, el mantenimiento, la eliminación, y otro tipo de apoyo de un producto durante su ciclo de vida (es decir, su tiempo de vida útil esperado). Todos los costes relevantes deben ser incluidos, en un análisis LCC, independientemente de la fuente de financiación, unidad de negocio, control de gestión, etc.

De acuerdo con Dell'isola y Kirk [22], el LCC es una herramienta de gestión económica diseñada para evaluar las consecuencias económicas de un elemento, sistema o instalación sobre su vida útil, expresadas en términos de coste equivalente, utilizando líneas de base idénticas a las utilizadas para el coste inicial. El coste del ciclo de vida se utiliza para comparar diferentes opciones de productos o servicio e identificar y evaluar los impactos económicos sobre la vida de cada opción.

Kawauchi y Rausand [62], afirman que el coste total de un producto a lo largo de su ciclo de vida comprende, no sólo los costes de adquisición, sino también muchas otras categorías de costes, incluyendo tales "costes de propiedad", los costes de operación, costes de mantenimiento, los costes de logística, etc. Según estos autores, el rango típico de los costes de propiedad es en torno al 60 a 80 % del coste total del ciclo de vida. Si en la decisión de compra de un producto en particular, sólo se tiene en cuenta el coste de adquisición, es probable que después se produzca la sorpresa por los crecientes costes de propiedad que aparezcan. Por tanto, es importante tratar de conocer y prever los costes del ciclo de vida en una fase temprana del desarrollo del producto.

Sin embargo, L. [69] destaca que el objetivo fundamental del análisis LCC es identificar los generadores de coste más significativos para el ciclo de vida, de manera que permita definir la mejor combinación de recursos. Por su parte, Ferrin y Plank [39] afirma que el análisis del ciclo de vida permite que los directivos de una empresa tenga una visión a largo plazo y así tener una capacidad de decisión más certera para las futuras adquisiciones.

Tanto para Emblemvag [28] como para Dhillon [25], el LCC es una herramienta cada vez más utilizado para apoyar la toma de decisiones que directa

o indirectamente se refieren a equipos de ingeniería y sistemas, y son tres las principales áreas de actuación:

1. El LCC puede ser una herramienta de ingeniería eficaz para proporcionar apoyo a las decisiones en el diseño y/o la adquisición de productos y equipos. También interesa, como en el caso de esta tesis, para tomar decisiones ya avanzadas en el ciclo de vida del activo, si se reemplaza o si se sigue manteniendo el bien.
2. El LCC actúa como la principal herramienta de ingeniería y análisis para la evaluación de impacto medio-ambiental.
3. El LCC supera muchas de las deficiencias de la contabilidad tradicional de costes en la gestión de activos. El punto clave no es técnico, sino financiero, y tiene como objetivo principal, maximizar el retorno de la inversión sobre los activos, para que duren más tiempo, obtengan mejor comportamiento y cuesten menos de mantener.

En cualquier caso, antes de iniciar un estudio sobre LCC, se considera adecuado definir el alcance del mismo, considerando los siguientes aspectos:

- El objetivo final del estudio;
- El tratamiento de las incertidumbres;
- Los datos requeridos para el análisis y sus limitaciones (exactitud y precisión de los mismos); y
- El personal involucrado y su responsabilidad en el análisis.

3.5 Modelo LCC aplicado a Flotas de transporte

El LCC aplicado a flotas se basa en la economía de ingeniería para identificar un punto de la vida de un activo dado en el cual el coste acumulado de Operación y Mantenimiento (O&M) y Propiedad alcanza su valor mínimo. De acuerdo con Fan y col. [32], el enfoque más ampliamente aceptado se llama el “método de minimización de costes”. Gransberg y O’Connor [47] lo describen como “el método de análisis más apropiado” y propone que “produzca un ciclo óptimo de reemplazo y un correspondiente Coste Anual Equivalente (*Equivalent Annual Cost - EAC*)”. Con el fin de establecer su vida útil, en particular para los autobuses, es de importancia clave la comprensión de los conceptos explicados en la siguiente figura 3.2.

La vida teórica óptima es el momento en que la suma de los costes totales (O&M + Capital Costs) en un determinado punto es mínimo y define la vida económica. Desde un punto de vista financiero, el objeto de coste del ciclo de vida mínimo es la edad ideal de jubilación y / o reemplazo. Esta edad se puede mostrar en años de vida o kilometraje recorrida. Este análisis debe estar sujeto a las mismas condiciones de trabajo, para observar una tendencia similar. De acuerdo con el tipo de activo, las especificaciones de diseño y el servicio a realizar, es evidente que en la mayoría de los casos el kilometraje total del vehículo es una mejor indicación del envejecimiento que la edad del vehículo.

El coste de operación de un equipo o activo generalmente aumenta a medida que su condición se deteriora con el tiempo. Cuando el coste alcanza un cierto nivel, los costes a largo plazo asociados con la inversión en un nuevo equipo se hacen menores que si se mantienen los viejos equipos [60]. En este punto, la sustitución se lleva a cabo. Por lo tanto, un análisis básico de reemplazo normalmente examina tanto la tendencia de los costes operativos y de mantenimiento (O&M) como el coste neto de reposición, que se define como la diferencia entre el coste del nuevo equipo y el valor de salvamento del antiguo. En algunos casos, el análisis de sustitución también considera el valor de reventa del equipo en diversas etapas de su vida útil.

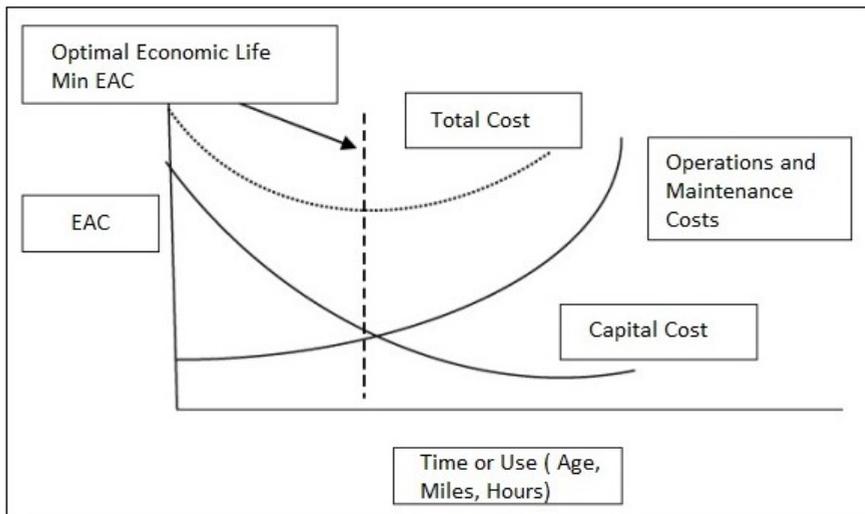


Figura 3.2: Coste Anual Equivalente (EAC).

Po último, a que se considerar que los análisis de LCC siempre incluyen elementos de incertidumbre porque una parte de los datos de entrada debe definirse sobre la base de diferentes estimaciones y suposiciones sobre el desarrollo de costes e ingresos a largo plazo. Se ha reconocido que los métodos de probabilidad son útiles para manejar la incertidumbre en los modelos de costes. Por lo tanto, en lugar de tratar las variables de entrada como fijos, como el rendimiento, la calidad, los costes y los precios, es más apropiado cuantificarlos en función de las funciones de distribución de probabilidad. Un modelo capaz de solucionar este problema es el método de Simulación de Monte Carlo, que puede encontrar soluciones aproximadas para algunos problemas, tanto matemáticos, como técnicos u operacionales. El método de Simulación de Monte Carlo implica estimar la probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos basados en estudios previos [49, 52]. Según Emblemavag [28], la Simulación de Monte Carlo es un método especialmente útil para la gestión de costes. En consecuencia, el análisis de Monte Carlo es un método ideal para cuantificar la incertidumbre de parámetros en los estudios de LCC.

3.6 Método Coste Medio Anual

El Coste Medio Anual (CMA) es un método sencillo que representa el año con el mínimo coste (de O&M + de la inversión), pero no tiene por qué ser el del momento del reemplazo. En realidad será la gerencia de la empresa la que deberá decidir qué umbrales de costes está dispuesta a asumir antes de ejecutar el reemplazo del activo, comparándolo con los costes que supondrá las posibles alternativas Matemáticamente indica el coste acumulado hasta el año de vida del vehículo dividido por el tiempo del mismo.

$$(\text{CMA})_n = \frac{[\sum \text{Inv} + \sum \text{Mant} + \sum \text{Explot} + \sum (\text{Otros costes})_n - (\text{Val Rev})_n]}{n}$$

donde:

n - son los años de explotación del vehículo;

$\sum \text{Inv}$ - Acumulado de sus costes de inversión;

$\sum \text{Mant}$ - Acumulado de sus costes de mantenimiento;

$\sum \text{Explot}$ - Acumulado de sus costes de explotación;

Val Rev - un eventual valor de reventa.

3.7 Métodos Basados en la Optimización de Costes

Para una mejor comprensión de los otros modelos más detallados utilizados en la definición del reemplazo de un vehículo, es conveniente conocer otros aspectos y características.

3.7.1 *Coste Total de Propiedad*

El Coste Total de Propiedad (TCO - *Total Cost of Ownership*), se define como el coste de posesión desde el momento que se adquiere hasta el momento de descarte [45]. Su expresión se puede definir por:

$$TCO_{tp} = \int_0^{tp} (CC(t) + CO\&M(t))dt$$

donde:

(tp) - periodo de explotación;

$CC(t)$ - Costes de Capital;

$CO\&M(t)$ - Costes de Operación y Mantenimiento.

Como TCO es la suma de todos los costes en un período de tiempo, también se puede determinar a través de un valor medio de tiempo (t).

$$\overline{TCO} = \frac{TCO(t)}{t}$$

3.7.2 *Coste Total de Propiedad Descontado*

El Coste Total de Propiedad Descontado (TDCO - *Total Discounted Cost of Ownership*), es usado como medida financiera para valorar un proyecto de inversión. Lo que se evalúa es el valor actual de los flujos de fondos futuros, descontándolos a una tasa de descuento que refleja el coste del capital aportado y el riesgo de la inversión.

El cálculo del TDCO está basado en la fórmula del Valor Actual (PV - *Present Value*) de un flujo de fondos futuros:

$$PV = \frac{CFn}{(1+r)^n}$$

Donde, CF_n son los Costes fijos anuales del año n , descontado a una tasa de descuento r .

La fórmula para el cálculo representa la suma de los costes anuales totales para cada año dentro del período u horizonte temporal n considerándolos descontados según una tasa de descuento r :

$$TDCO(tp) = \frac{CT_1}{(1+r)} + \frac{CT_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CT_n}{(1+r)^n}$$

$$TDCO = \sum_{t=0}^N \frac{CT(t)}{(1+r)^t};$$

$TDCO(tp)$ - Coste total descontado de posesión;

$CT(t)$ - Coste anual total;

r - Tasa de descuento;

N - Tiempo de reposición

Todos los modelos basados en la optimización de los costes tienen como función objetivo la minimización de este parámetro a lo largo de un horizonte temporal, mediante el uso de TCO , el \overline{TCO} o el $TDCO$.

3.7.3 Tasa y Factor de Descuento

La tasa de descuento o tipo de descuento o coste de capital es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro. Así, si A es el valor nominal esperado de una obligación con vencimiento de un periodo específico y la tasa de descuento es r y su valor actual que puede ser reconocido por una persona o entidad tomadora es B :

$$A = \frac{B}{(1-r)}$$

Para esta investigación A y B son representados en las formulas como los costes anuales totales (CT). La tasa de descuento se diferencia de la tasa e interés, en que esta se aplica a una cantidad original para obtener el incremento que sumado a ella da la cantidad final, mientras que el descuento se resta de una cantidad esperada para obtener una cantidad en el presente.

El análisis del *TCO* como inversión a través del *TDCO* no persigue el mismo objetivo que el análisis de una inversión clásica, en la que se espera el retorno de una suma de dinero para el inversor, ya sea la misma empresa o privado. Simplemente se usa como una medida para comparar los costes en el tiempo, sin esperar que dichos activos provoquen un flujo de dinero entrante, excepción hecha del valor residual o reventa.

No se debe confundir el concepto de Tasa de Descuento con el de Factor de Descuento f . Éste es el que realmente se utiliza en los modelos lineales de optimización de la literatura, siendo un coeficiente que multiplica al *CT* anual. Simplemente, hay que tener en consideración que, que los Factores de descuento para cada año son los coeficientes de los *CT* para cada año de la ecuación del *TDCO*, en los que está incluida la tasa de descuento r .

$$f_i = \sum_{t=0}^i \frac{1}{(1+r)^t}$$

Donde f_i es el factor de descuento del año i .

3.7.4 Vida Útil y Vida Económica

Referida generalmente a los equipos industriales, se denomina vida técnica o vida útil de un vehículo en una flota, al número de años que se estima que lo mismo podrá funcionar normalmente. Por tratarse de una estimación que se formula ex ante o a priori, la vida técnica de un vehículo nunca podrá conocerse con exactitud. Tomando como base la experiencia y las características técnicas siempre se podrá formar una idea, aproximada al menos, de cuál va a ser (salvo imprevistos) la su duración. La vida técnica no siempre coincide con la vida económica. La vida técnica se puede alargar, aumentando los gastos de conservación y reparación, o acortar, según convenga. Se denomina vida económica de un vehículo aquella duración que, desde el punto de vista estrictamente económico, a la empresa le resulta más beneficiosa, bien sea porque le reporta un valor actualizado neto (valor capital) máximo un coste anual medio mínimo. Además, hoy en día, antes de alcanzar la obsolescencia funcional y la obsolescencia económica, lo que primero aparece es una obsolescencia tecnológica.

3.7.5 *Horizonte Temporal*

El horizonte temporal tiene un significado distinto dependiendo del método o modelo usado. En ciertos sectores, el horizonte temporal es fijado a priori debido a decisiones políticas, lo que puede conllevar a un resultado poco alineados con la optimización de costes. En él se calcula una política óptima para cada H , es decir, una edad óptima de renovación para un horizonte temporal fijado. Esto equivale a decir que para pequeños H , la política óptima indicaría la utilización del vehículo hasta el final del horizonte, momento en el que es reemplazado, resultando realmente costoso. Sin embargo, a medida que H aumenta este efecto disminuye y los vehículos son reemplazados de manera que el TDCO repartido a lo largo de H presenta una tendencia decreciente. Recomienda-se elegir el segundo mínimo de esa función.

A pesar de la existencia de tal método para hallar un óptimo H , los modelos de optimización de PFRP (*Parallel Fleet Replacement Problem*) que consideran horizonte temporal finito, lo toman suficientemente largo para observar varios ciclos de renovación de toda la flota entera, los necesarios para observar dos ciclos completos de renovación. Estos modelos resultan más complejos de resolver cuanto mayor es el horizonte temporal, por lo que algunos autores establecen el doble de la vida útil máxima como H para hallar la resolución de su modelo. En los modelos PFRP, todos los vehículos son vendidos al final de H .

No cabe duda, que la elección de H es clave para hallar una solución adecuada, por lo que, eligiendo un H según o estableciéndolo suficientemente largo, se debe estar seguro de que no repercute en la edad de renovación, tiempo de explotación o calendario de reemplazo óptimo que sea la solución del modelo adoptado.

3.7.6 *Método del Coste Anual Equivalente*

El método del Coste Anual Equivalente (*EAC - Equivalent Annual Cost*) es una evolución del modelo básico del LCC. Es usado como herramienta de decisión cuando se quiere comparar inversiones con distinto periodo de vida útil. Para el caso de la renovación vehicular, se emplea para comparar la rentabilidades que tendría las inversiones para $n = 1; 2; 3; 4 \dots$ años, siendo aquí n la edad de reemplazo, que se correspondería con la duración de la inversión.

Es una medida de la distribución anual del Coste Total de Propiedad (TDCO), a lo largo del periodo de explotación. Para su cálculo, se divide el valor de TDCO entre el Valor Actual del factor de Anualidad $A_{n,r}$ que para una tasa de descuento r y un periodo de vida de n se calcula como:

$$A_{n,r} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1+r)^k}$$

Para las mismas condiciones de r y n se calcula el EAC como:

$$EAC = \frac{TDCO_{(n)}}{A_{n,r}}$$

Según este método, el procedimiento para hallar la edad óptima de renovación consistiría en utilizar una tasa de descuento dada, el valor de $n = t_p$ que hace que EAC sea mínimo. EAC se suele expresar en unidades monetarias anuales. Si se desea expresarlo en otra unidad de tiempo distinta se debe tener en cuenta que es preciso recalcular los valores $TDCO$ y $A_{n,r}$ según los períodos considerados.

3.7.7 Modelos de Minimización de Costes

En estos modelos, la renovación está basada en los procesos de Compra, Venta y Operación, o como se denomina en la literatura, *Parallel Fleet Replacement Problem*. Aquí se concluye el método definiendo un calendario de reemplazo, en el que, para cada año del horizonte temporal considerado, se hallan los vehículos a comprar, a renovar y a mantener en la flota.

La toma de decisiones es tomada en paralelo, pues se deben aplicar sobre un conjunto de individuos, que se consideran independientes por una o varias razones:

- Existen para satisfacer un determinado nivel preestablecido de demanda.
- Las renovaciones atienden a un presupuesto común limitado.
- Se asocia una economía de escala con los costes de inversión en el equipo.

Se toman como variables de decisión:

v_{ij} : Vehículos en uso de edad j en el periodo i ;

a_{ij} : Vehículos adquiridos de edad j al inicio del periodo i ;

s_{ij} : Vehículos vendidos de edad j al final del periodo i ;

Los índices representan:

i : Período, donde $i = 1; 2; \dots H$ siendo H el horizonte temporal.

j : Edad, donde $j = 0; 1; 2; \dots N$ siendo N la máxima vida útil de un vehículo.

El enfoque utilizado en el modelo es sencillo: minimizar el TDCO de la flota entera a lo largo de un horizonte de H años, o lo que es lo mismo, minimizar los valores de compra y de costes de O&M y maximizar los valores de reventa:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^{H-1} \sum_{\forall j} f_i A_{ij} V A_{ij} - \sum_{i=0}^{H-1} \sum_{\forall j} f_i s_{ij} V R_{ij} + \sum_{i=0}^{H-1} \sum_{\forall j} f_{i+1} v_{ij} C O \& M_{ij}$$

v_{ij} : Vehículos operados de edad j en el periodo i : **variable de decisión**;

a_{ij} : Vehículos nuevos de edad j adquiridos al inicio del periodo i : **variable de decisión**;

s_{ij} : Vehículos vendidos de edad j vendidos al final del periodo i : **variable de decisión**;

$V A_{ij}$: Valor de Adquisición de los vehículos de edad j en i ;

$V R_{ij}$: Valor de Reventa de los vehículos en i de edad j ;

f_i : Factor de Descuento;

$C O \& M_{ij}$: Coste de O&M de un vehículo de edad j en el periodo i .

En el modelo las adquisiciones y ventas se consideran al principio del periodo, quedando dichas componentes multiplicadas por f_i , mientras que los costes de explotación se consideran al final del periodo y se utiliza como factor de descuento el del periodo posterior f_{i+1} . Hay un conjunto de restricciones que se le aplican a esta fórmula (figura 3.3).

1. Equilibrio en el flujo de vehículos

El número de vehículos operados en un periodo son iguales a los que se operaban el periodo anterior, menos los que se vendieron, más lo que se han comprado.

2. Demanda y Servicio

La flota operada en cada periodo debe satisfacer la demanda del usuario, que se toma como el número total de los kilómetros anuales:

$$\sum_i v_{ij} k_{ij} \geq K_i \quad i = 0, 1, \dots H$$

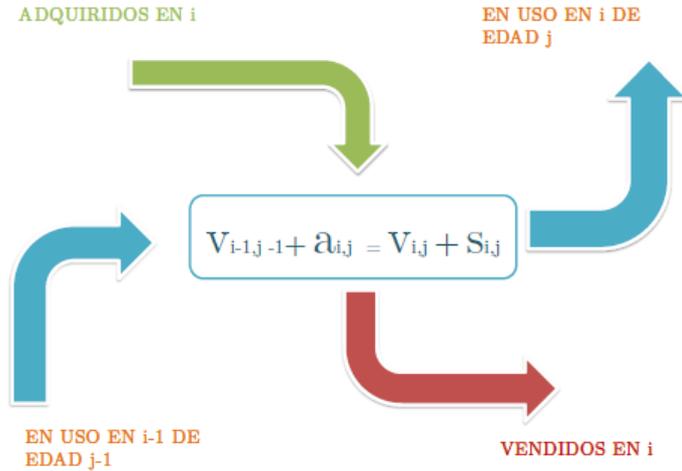


Figura 3.3: Restricciones en TDCO.

donde:

k_{ij} : kilómetros medios recorridos por un vehículo de edad j en el periodo i ;

K_i : Kilómetros anuales que se deben recorrer.

3. Presupuesto

Existe un presupuesto anual disponible para renovar las unidades. Esta restricción hace que cada año se renueven tantos vehículos como presupuesto se tenga disponible. Además, hay que analizar otros factores como las condiciones óptimas para el cambio y/o factores políticos.

$$\sum_j a_{ij} V A_{ij} \leq V A_i^{MAX}$$

4. Todos vehículos vendidos al final del horizonte temporal

Para que los modelos sean consistentes se debe incorporar una restricción que obligue a la venta de todos los vehículos, los que había inicialmente y los adquiridos, al final del horizonte temporal H . En realidad esto correspondería a un valor residual, equivalente al coste de la desincorporación (aunque con signo negativo) al final del ciclo de vida.

$$\begin{aligned} V_{0j} - s_{ij} &= 0 \quad \text{para } i = H \quad \forall j \\ v_{i-1,j-1} &= 0 \quad \text{para } i = H \quad \forall j \end{aligned}$$

5. Naturaleza de las variables de decisión

Restricciones para indicar que las variables de decisión son enteras.

$$v_{ij}, s_{ij}, a_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

Estas son las más comunes y que se repiten para todos los modelos exhaustivos de optimización de costes. Aparte también existirán otras en función de cómo el autor aborde el problema específico que estudie. El *Fleet Parallel Replacement Problem* resulta amplio, en el sentido de que, al tratarse de un modelo de optimización, se pueden estudiar infinidad de posibilidades. No obstante, cuanto más complejo resulte el modelo, más dificultosa será su resolución. De especial interés resulta la política de empresa en la renovación, que afecta de manera significativa al modelo.

A veces, suele ocurrir que las decisiones de compra y venta no sólo dependen del gestor de la flota, sino que atienden a ciertos criterios empresariales. Se tendrán entonces ciertas reglas de decisión que repercutirán en las prácticas de renovación. Así, podemos encontrar políticas de empresa en la que sólo se compren vehículos nuevos, en las que se renueve sólo por bloques u otras priorizaciones a la hora de renovar.

3.7.8 Modelo de Optimización Dinámica Determinista

Este modelo de sustitución de flota tiene como objetivo proporcionar respuestas acerca de cuándo y qué comprar / reemplazar o salvar / desechos con el tiempo en función de los costes y su utilización. El objetivo es presentar un modelo que pueden evaluar los impactos de las tecnologías de vehículos nuevos, los costes de operación y mantenimiento, y las condiciones del mercado.

Figliozzi, Boudart y Feng [40] llevaron a cabo un estudio de caso en el estado de Washington, E.U., comparando, por la aplicación de un modelo de optimización de la sustitución de la flota, dos modelos de autobuses diferentes: los que son alimentados con diesel convencional e híbrido. Para el análisis de datos, los autores desarrollaron un modelo de optimización dinámica determinista considerando diversos escenarios y análisis de sensibilidad de las variables.

El modelo se plantea según los autores en los siguientes parámetros y características:

Índices

Tipo de vehículo/motor: $k \in \mathbf{K} = \{1, 2, \dots, K\}$

Edad del vehículo en el año: $ki \in \mathbf{A}_k = \{0, 1, 2, \dots, A_k\}$

Los períodos de tiempo, las decisiones se toman al final de cada año: $y_j \in \mathbf{T} = \{0, 1, 2, \dots, T\}$.

Variables de decisión

X_{ijk} = Edad de los vehículos en uso de un tipo k desde finales de año j hasta el final del año $j + 1$,

Y_{ijk} = Valor residual o de reventa de un tipo de vehículo k en i de edad j ,

P_{jk} = Número de vehículos nuevos del tipo k adquiridos al final del año j .

Parametros

■ Restricciones

A_k = edad máxima del vehículo k (debe ir a la reventa cuando llega a esta edad),

u_{ik} = utilización (kilómetros recorridos por año, por tipo de vehículo),

d_j = demanda (kilómetros recorridos por todos los tipos de vehículos) desde finales de año j hasta el final del año $j + 1$

b_j = presupuesto (disponible para la compra de vehículos nuevos) la restricción de la final del año j ,

■ Costes o ingresos

v_k = coste de compra de un tipo de vehículo, k

f_{ik} = ahorro de combustible (mpg - *miles per gallon*) por años de edad y tipo de vehículo ik

fc_j = precio del combustible en el año j ,

om_{ik} = coste de operación y mantenimiento por milla para i años de edad del tipo de vehículo k ,

s_{ik} = valor de los ingresos (coste negativo) de la venta de un tipo de vehículo k de edad i ,

ec = coste de emisiones por toneladas de gases de efecto invernadero (GHG - *Greenhouse Gas Emissions*),

δ = tasa de descuento.

■ Emisiones

e_{ik} = cantidad de las emisiones producidas en equivalente toneladas por kilómetro asociada a un tipo de vehículo k con i años de edad,

■ Condiciones iniciales

h_{ik} = número de vehículos k con i años de edad disponibles al principio.

3.7.9 Función objetivo minimizada

$$\min Z = \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{k=1}^K \left[v_{jk} P_{jk} + \sum_{i=0}^{A_k-1} \left(\frac{fc_j}{f_{ik}} + m_{ik} + ec.e_{ik} \right) u_{ik} X_{ijk} \right] (1 + \delta)^{-j} + \sum_{j=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{A_k} s_{ik} Y_{ijk} (1 + \delta)^{-j} \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^K v_{jk} P_{jk} \leq b_j, \forall j \in \{0, 1, 2, \dots, T-1\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=0}^{A_k-1} \sum_{k=1}^K X_{ijk} u_{ik} \geq d_j, \forall j \in \{0, 1, 2, \dots, T-1\} \quad (3.3)$$

$$P_{jk} = X_{0jk}, \forall j \in \{1, 2, \dots, T-1\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.4)$$

$$P_{0k} + h_{0k} = X_{00k}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.5)$$

$$X_{i0k} + Y_{i0k} = h_{ik}, \forall i \in \{1, 2, \dots, A_k\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.6)$$

$$X_{(i-1)(j-1)k} = X_{ijk} + Y_{ijk}, \forall i \in \{1, 2, \dots, A_k\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, T\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.7)$$

$$X_{iT_k} = 0, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, A_k - 1\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.8)$$

$$X_{A_k j k} = 0, \forall j \in \{0, 1, 2, \dots, T\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.9)$$

$$Y_{0jk} = 0, \forall j \in \{0, 1, 2, \dots, T\}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (3.10)$$

$$P_{jk}, X_{ijk}, Y_{ijk} \in \mathbf{I} = \{0, 1, 2, \dots, T\} \quad (3.11)$$

La función objetivo, la Ecuación 3.1, minimiza la suma de la compra, el coste de energía (combustible), los costes de operación y mantenimiento, el valor residual, y los costes de las emisiones durante el período de análisis, es decir, desde el momento cero (actual) hasta el final del año T.

El gasto de compra no puede exceder el presupuesto anual, Ecuación 3.2.

El número de vehículos de la flota en todo momento debe ser igual o superior al mínimo necesario para cubrir la demanda en términos de número anual de autobuses o kilometrajes anuales recorridas, Ecuación 3.3.

El número de vehículos adquiridos debe ser igual al número de vehículos de cada tipo y año del vehículo, a excepción de la hora actual, Ecuación 3.4.

El número de vehículos utilizados durante el año cero debe ser igual a la suma de los nuevos vehículos existentes más vehículos adquiridos, la Ecuación 3.5.

Del mismo modo, la Ecuación 3.6 se asegura la conservación de vehículos (es decir, los primeros vehículos no 0-edad-los hay que ya sea usado o vendido). La edad de un vehículo en uso se incrementará en 1 año después de cada período de tiempo Ecuación 3.7.

Al final del último período de tiempo, no habrá ningún vehículo en uso para cualquier edad o tipo de vehículos (es decir, todos los vehículos serán vendidos en el valor de rescate correspondiente, que es una función del tipo de vehículo y la edad), Ecuación 3.8.

Cuando el vehículo alcanza la edad máxima permitida, en función del tipo de vehículo, el vehículo debe ser vendida en el valor residual correspondiente, Ecuación 3.9.

Un vehículo recién comprado no se debe vender antes de su uso, Ecuación 3.10.

Por último, las variables de decisión relacionados con la compra, utilización y decisiones de salvamento deben ser números enteros positivos, la Ecuación 3.11.

Aunque el modelo es capaz de proporcionar la solución óptima para un determinado conjunto de insumos, la incertidumbre asociada al valor futuro de algunos factores (por ejemplo, los precios del combustible, costes de mantenimiento) son necesarios varios escenarios para que se ejecuten y ser estudiados.

3.8 Definición y desarrollo de modelo matemático combinado entre Life Cycle Cost y Simulación de Monte Carlo para flota de transporte urbano

3.8.1 Modelo Matemático LCC + SMC

Sea $f(x, y)$ una función que representa el coste total de mantenimiento y operación de un único autobús, se convierte en valor real desde el inicio de su vida útil, hasta alcanzar simultáneamente la edad “ x ” y el kilometraje total “ y ”. Por lo tanto, la descripción del problema consiste en encontrar el mejor ajuste entre la edad y el kilometraje (x^*, y^*) que viene a ser el punto óptimo de reemplazo de la flota utilizando el análisis del coste del ciclo de vida (*LCC*), así como el método de Monte Carlo, que inserta variables aleatorias en el modelo de mantenimiento total y coste operacional. Para el análisis *LCC*, el primer paso es definir el flujo de efectivo en función de la edad y kilometraje (x, y) , como se muestra en la Ecuación 3.12:

$$G(x, y) = f(x, y) + Vc - VR \quad (3.12)$$

Siendo:

Vc : Coste de la compra

VR : Valor de reventa

Una vez definido el flujo de caja, es necesario conocer la edad y el kilometraje (x^*, y^*) para la sustitución óptima de la flota, lo que significa encontrar los valores

más bajos del coste medio anual por kilómetro (*AAC* - *Average Annual Cost*), definidos en la ecuación siguiente:

$$H(x, y) = \frac{G(x, y)}{xy} \quad (3.13)$$

Así pues, el problema se puede escribir como:

$$(P1) \left\{ \begin{array}{l} \text{Encontrar } (x^*, y^*) \in \mathbb{R}^2, \text{ tal que} \\ (x^*, y^*) = \arg \min [H(x, y)] \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Siendo:

$$x \in [x_{min}, y_{min}]$$

$$y \in [y_{min}, y_{max}]$$

$$x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max} \in \mathbb{R}$$

El problema estudiado en este trabajo considera variaciones en la función de costes que no tienen predictibilidad o un patrón bien definido. Por lo tanto, debido a la incertidumbre en la predicción de algunos valores y costes, tales como los futuros precios de combustible, costes de mantenimiento y la utilización, se plantean diferentes escenarios con valores para probar el modelo. El problema se define como $(x, y)X(\Omega, F, P)$, en el cual “ Ω ” es el un muestra del espacio de los acontecimientos “ F ” el álgebra de los acontecimientos y “ P ” una medida de probabilidad. A partir de este planteamiento, las siguientes hipótesis son necesarias:

H1) La función de coste total es diferenciable;

H2) Las variables aleatorias que definen la función de coste son limitadas y estadísticamente independientes [3].

Como resultado, el problema *P1* se reformula de la siguiente manera:

$$(P2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Encontrar } (x^*, y^*) \in [\mathbb{R}^2, P], \text{ tal que} \\ (x^*, y^*) = \arg \min [H(x, y, w)]; \\ (x, y, w) \in \mathbb{R}^2 \mathbf{X}(\Omega, \mathbf{F}, \mathbf{P}) \end{array} \right. \quad (3.15)$$

El problema definido en la Ecuación 3.15 se resolverá mediante métodos basados en la Simulación de Monte Carlo. Este tipo de método se desarrolla en tres etapas:

1. Generar, de acuerdo con las funciones de probabilidad de cada parámetro, N - muestras de variables aleatorias que modelan la incertidumbre sobre los parámetros que definen la función coste total;
2. Para la muestra de los parámetros, resuelva el siguiente problema:

$$(P3) \begin{cases} \text{Encontrar } (x_i^*, y_i^*) \in [\mathbb{R}^2, P], \text{ tal que} \\ (x_i^*, y_i^*) = \arg \min [H(x, y, w)]; \\ (x, y, w) \in \mathbb{R}^2 \mathbf{X}(\Omega, \mathbf{F}, \mathbf{P}) \end{cases} \quad (3.16)$$

3. Con todos estos resultados, se analiza el resultado final con la distribución gráfica de la función $H_i^*(x_i^*, y_i^*)$ y las variables “ x_i^* ” y “ y_i^* ”.

Con el fin de generar un modelo que pronostique el coste total de mantenimiento y funcionamiento simultáneo en función de la edad y el kilometraje $f(x, y)$, se desarrolló un análisis de regresión. Además, este análisis empleando algoritmos de distancia mínima se llevó a cabo utilizando el software Minitab[®], con el fin de encontrar la mejor disposición a través de una función matemática. El tipo de ecuación elegida para ser utilizado en este modelo se hizo con respecto a la calidad y la cantidad de datos disponibles. Para la flota española, en la que los datos eran más abundantes en términos de años, se aplicó una función cuadrática (Ecuación 4.2). Sin embargo, como la flota brasileña carece de la misma cantidad de datos, se empleó una función exponencial para tener una función representativa (Ecuación 4.4). Con el fin de analizar las variaciones de los parámetros que el enfoque determinista no puede evaluar, se emplea la simulación de Monte Carlo.

En otras palabras, el modelo matemático propuesto para este trabajo se basa en una simulación no cronológica [100] a través de tres pasos principales: definición de los parámetros, generación de las variables aleatorias (escenarios de simulación) y resolución de los problemas para todos los escenarios generados figura 3.4.

Para la definición de los parámetros, fueron utilizados tres tipos de informaciones, siendo el primer referente a las características constructivas y técnicas del vehículo, las cuales ya fueron previamente evaluadas, como por ejemplo: el valor de las constantes que define la función coste total de operación y mantenimiento en relación a la edad y al kilometraje medio de un vehículo; el valor de adquisición de un nuevo vehículo; el valor residual de venta de un vehículo después del término de su vida útil y la edad máxima de utilización del vehículo.

El segundo tipo de información está relacionado a los parámetros internos a la simulación, como por ejemplo los límites superiores e inferiores que definen el intervalo en el cual la función coste total de mantenimiento y operación fue

evaluada , el número de simulaciones que fueron realizadas y el grado de variación que fue adoptado para las variables aleatorias.

El último nivel de parámetros abarca solamente parámetros internos de la propia simulación y no interfieren al resultado. Dentro de esta categoría, cabe comentar algunos contadores y definiciones de pasos para análisis de redes, tales como una matriz de resultado, donde cada línea representa un escenario de simulación y las columnas valoran informaciones de este mismo.

Las seis primeras columnas abarcan los valores de las variables aleatorias para el escenario que fue analizado, la séptima columna indica el valor de la edad recomendada para el reemplazo, la octava columna advierte el valor del kilometraje medio anual indicado para el reemplazo . La novena y última columna representa el coste medio generado por el kilómetro AAC de un vehículo sometido a los demás parámetros de este escenario. Una vez sean los parámetros definidos, se generará una muestra aleatoria de combinaciones de variables aleatorias “ A_i ”.

Para cada escenario creado, se producen parámetros de simulación (variables aleatorias), las soluciones antes descritas (edad y kilometraje en el momento de reemplazo) y el resultado de coste medio por kilómetro.

Después de obtener los escenarios generados y con sus respectivos resultados registrados, se realizará un análisis de histograma con los resultados. De esta forma, se estudia la función de distribución de coste medio anual AAC “ $H(x, w)$ ” y de las coordenadas óptimas de edad y kilometraje para el reemplazo del vehículo “ (x^*, w^*) ”.

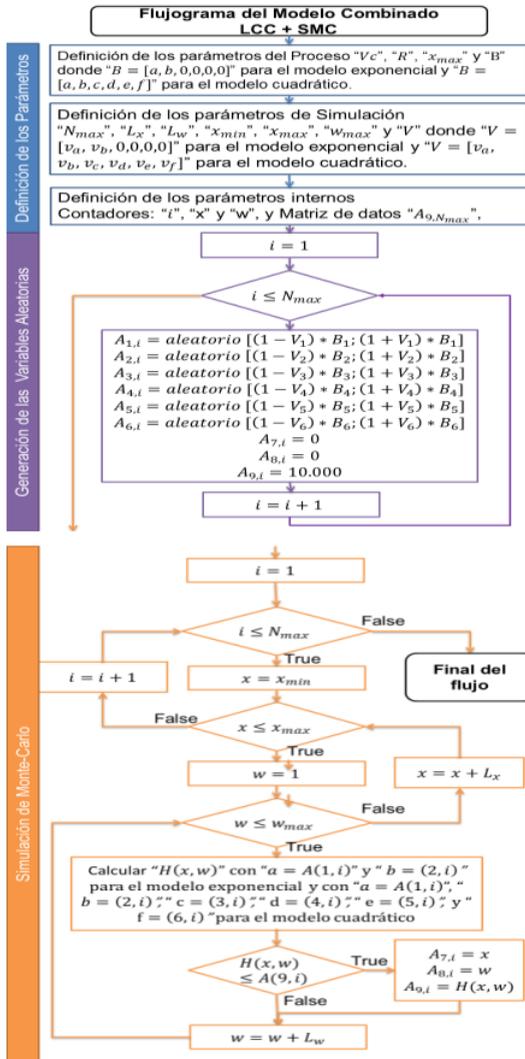


Figura 3.4: Flujograma del Modelo Combinado LCC + SMC.

Capítulo 4

Análisis y validación de la metodología aplicada para la optimización del reemplazo de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los diferentes trabajos realizados para el proceso de análisis y validación de la metodología desarrollada en el capítulo anterior. En primer lugar, este trabajo comprende un estudio pormenorizado de la solidez, calidad y capacidad de las fuentes de datos disponibles para una validación fiable, dentro de las opciones disponibles. Para ello, se ha realizado un “*screening*” de diferentes flotas de autobuses para comprobar unos parámetros de idoneidad determinados.

A continuación, y para comprobar la solidez de los datos obtenidos de una de las fuentes, se ha realizado un análisis comparativo entre los costes de manteni-

miento y operación de dos tipos de autobús para el transporte público en una flota española, con motorización Diésel (gasoil convencional y biodiesel) y Gas Natural Comprimido (GNC), a través de los principios y aplicaciones de la herramienta gerencial de análisis del coste del ciclo de vida, con la finalidad de comprobar su aplicación, eficiencia, y debilidades. Gracias a las conclusiones obtenidas en este análisis previo, se decidió aumentar la capacidad del modelo y validar su aplicación en dos casos reales de flotas de transporte urbano, en diferentes condiciones de trabajo, entorno laboral, condiciones climáticas, tipo de servicio, etc., con el objetivo de validar completamente la nueva herramienta y evaluar las similitudes y discrepancias entre las flotas.

4.2 Estudio comparativo de costes de explotación en flotas de autobuses

4.2.1 Antecedentes

El desarrollo de un modelo para la optimización del reemplazo de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros requiere de una serie de etapas y de unos elementos imprescindibles para una finalización satisfactoria. El desarrollo habitual de un modelo en cascada se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1: Etapas de desarrollo de un modelo en cascada¹.

Para un desarrollo satisfactorio del modelo, es necesario afrontar el trabajo de análisis de los diferentes agentes presentes en el desarrollo de éste. Para conocer

¹Fuente: United States, Navy Mathematical Computing Advisory Panel (29 June 1956), Symposium on advanced programming methods for digital computers, [Washington, D.C.]: Office of Naval Research, Dept. of the Navy, OCLC 10794738

en profundidad las características intrínsecas de la población objeto del modelo, el primer desarrollo ha consistido en un estudio pormenorizado de diferentes flotas de autobuses con un enfoque primordial en los diferentes gastos de explotación, incluyendo las áreas de operación y mantenimiento.

Con el objetivo de asegurar un estudio completo, se han escogido una serie de ejes directores:

- Tecnología de motorización del vehículo
- Coste de compra de un autobús
- Combustible: Consumo y coste
- Condiciones de contorno ambiental
- Características constructivas del vehículo
- Personal de conducción
- Políticas de formación
- Infraestructura
- Impuestos y tasas

4.2.2 Desarrollo del estudio

4.2.2.1 Tecnología de motorización del vehículo

La renovación de un vehículo de una flota representa también una oportunidad para adquirir nuevas unidades tecnológicamente más evolucionadas que las que se renuevan. Se deben buscar soluciones que contemplen y realicen con éxito cuatro objetivos:

- Mayor eficiencia energética.
- Reducción de las emisiones locales y globales.
- Reducción del consumo de combustible.
- Ahorro en lo coste total de propiedad.

Según Garvin [45], a partir de estos objetivos nace el concepto de *Green Fleet Management*, y por extensión a la renovación, el de *Green Fleet Replacement*, lo que implica que la toma de decisiones considera las alternativas más eficientes y

con menos emisiones. Esta nueva perspectiva para el reemplazo de flotas, implica algunas modificaciones en el diseño de los vehículos que se están llevando a cabo:

- **Disminución y reducción del peso de los vehículos:** Mediante el uso de materiales cada vez más ligeros, como el aluminio o aleaciones ligeras, se consigue reducir el consumo y, por lo tanto, las emisiones de CO_2 (dióxido de carbono). No obstante, la incorporación de sistemas de seguridad en la estructura compensa la poca rigidez de estos materiales, sin comprometer la seguridad del vehículo.
- **Mejora de la eficiencia del motor:** Mayor en los motores Diésel, mediante la inyección directa. Menor consumo, emisiones de CO_2 y peso del vehículo.
- **Catalizadores:** Producen reacciones en los gases de escape antes de liberarlos a la atmósfera, consiguiendo una reducción de las emisiones de HC (hidrocarburos inquemados), CO (monóxido de carbono) y NO_x (óxidos de nitrógeno). Obligatorios en todos los vehículos desde 1992.
- **Recirculación de gases de escape:** Se reenvían los gases de escape al conducto de admisión, consiguiendo una reducción de las temperaturas máximas durante la combustión, responsables de la formación del NO_x .
- **Reducción catalítica selectiva:** Tecnología más eficiente para reducir las emisiones de NO_x en los motores Diésel. Catalizador avanzado que elimina a posteriori este componente de los gases de escape. Más caro que el sistema anterior.
- **Filtros de partículas diésel:** El filtro de partículas, también conocido como FAP o DPF por sus siglas en francés (Filtre à Particules Diésel) o inglés (Diesel Particulate Filtre), eliminan las partículas de los gases de escape por filtrado, capturando hasta un 90 % de las mismas [2].

Dicho de otra forma, se encarga de retener el denso humo negro que deja a su paso cualquier coche diésel en plena aceleración. Este particular fenómeno exclusivo de los vehículos diésel tiene una explicación. Se debe a que el gasóleo está formado por cadenas de hidrocarburos muchos mayores y pesadas que la gasolina. Cuando el motor trabaja a cargas medias y bajas, del modo que se inyecta muy poco combustible en comparación con el aire introducido en los cilindros. Esto produce que en el volumen de la cámara haya una gran cantidad de oxígeno para completar la combustión.

Sin embargo, cuando se hace trabajar el motor a pleno rendimiento (por ejemplo, en una aceleración), puede ocurrir que una parte de la gran cantidad

de combustible inyectada no encuentre un volumen suficiente de oxígeno. Esto produce que la oxidación no se complete. Como resultado, quedan tras la combustión largas cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidadas. Éstas tienden a reagruparse y formar el hollín característico que sale del tubo de escape de un diésel.

Situado en el sistema de escape del vehículo, el filtro de partículas contiene unas paredes porosas que son las encargadas de retener las partículas sólidas (figura 4.2). Éstas, cada cierto tiempo, son eliminadas en lo que se conoce como “fase de regeneración”. Los filtros pueden ser pasivos (utilizan catalizadores de oxidación para conseguir disminuir la temperatura a la que se oxida el hollín) o activos (incrementan la temperatura de los gases hasta que se alcanza el valor suficiente para quemar las partículas de los filtros).

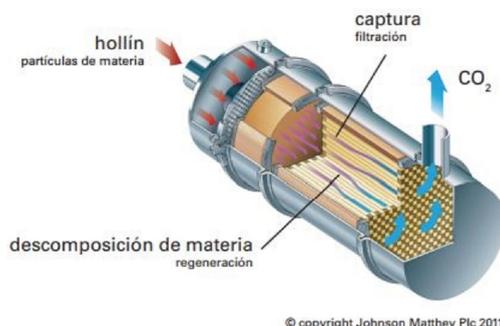


Figura 4.2: Filtro de Partículas Diésel².

- **Sistema eléctrico de 42 V:** Para reducir las pérdidas eléctricas, ante la mayor demanda de electricidad en los vehículos.
- **Combustión de encendido por compresión de carga homogénea:** En la combustión, la mezcla aire-combustible es lo más homogénea posible. Se comienza a inyectar el combustible mucho antes del punto muerto superior, para que tenga tiempo suficiente para mezclarse con el aire. Se consigue una reducción simultánea de PM (Partículas de hollín diésel) y NO_x , pero aumentan las de emisiones de HC y CO .
- **Sistema de parada y arranque (*start and stop*):** Permite parar el motor del vehículo cuando éste se detiene y mientras el freno esté pisado, y ponerlo otra vez en marcha con levantar el pie del freno y pisar el acelerador. Se reduce el consumo y las emisiones de CO_2 .

²Fuente: https://www.arb.ca.gov/msprog/truckstop/spanish/pdfs/dpf_handbook_sp.pdf

- **Sistemas de control de la presión de los neumáticos:** Un sistema de control de la presión permite aumentar la seguridad de los vehículos, ahorrar en combustible y la reducción de emisiones de CO_2 .
- **Uso de aceites de baja viscosidad o *Fuel Economy* (FE):** Los aceites de baja viscosidad basan su aportación a la mejora de la eficiencia energética en la reducción de las pérdidas mecánicas asociadas a la fricción viscosa en régimen hidrodinámico. Así, se consigue reducir el consumo de energía utilizado para hacer funcionar el sistema, y lleva asociada una reducción de las emisiones contaminantes para el mismo desempeño [89].

Muchas de estas tecnologías de reducción de emisiones ya están disponibles actualmente. Algunas están ampliamente implantadas, como los catalizadores o los sistemas de recirculación de gases de escape. Otras se están incorporando paulatinamente en los nuevos modelos, como los filtros de partículas diésel, los sistemas parada y arranque, los sistemas de control de presión de los neumáticos y la tecnología de reducción catalítica selectiva.

En ciertas ocasiones puede convenir incorporar estas posibilidades en la política de renovación de la flota. Mediante estas mejoras se podría reducir el consumo de combustible y el coste asociado a este. No obstante, este ahorro debe ser compensado por la inversión que se debe hacer para realizar las modificaciones, lo que normalmente no resulta ser lo más conveniente. Otras veces, habrá que actualizar la flota para cumplir ciertas normativas y que resulte más económicamente viable reformar el vehículo actual que adquirir uno nuevo.

Según los expertos en transporte urbano en España, hace años hubo un consenso que los nuevos autobuses tendrían como combustible el Biodiésel, el Gas Natural Comprimido (GNC) o una tecnología híbrida (motor diésel y motor eléctrico), favoreciendo el medio ambiente. Dichos autobuses están saliendo a las calles de forma progresiva. Entre las alternativas propuestas, los autobuses propulsados por gas natural comprimido como fuente de energía respetuosa con el medio ambiente y que cumplen con la normativa europea de emisiones de baja contaminación, de acuerdo con la EURO VI, son una opción cada vez más solicitada por los operadores europeos. Según Sánchez Sanz [103], el sector del transportes es el responsable directo del 30 % de consumo de energía final en la UE y por los costes de combustible representan entre un 30-40 % del precio final del servicio. Este coste representa la mayor partida de gasto de la estructura de las flotas de transporte y, como consecuencia, es está la que mayor relevancia y margen de mejora puede aportar. Para Sánchez Sanz, los principales factores que hacen del gas natural un combustible muy económico y competitivo son: su precio, que no está vinculado al del petróleo; y su gran diversidad de orígenes y formas de transporte.

Además, un litro de gas natural, con la eficiencia de un motor de clase media y al precio actual de mercado en €/km, es aproximadamente similar al consumo de dos litros de GLP, un litro y medio de gasolina o a tres litros de diesel. Es decir, el gas natural supone un ahorro en carburante frente a la gasolina de entre un 20-30 %, del 40-50 % respecto al gasoil y del 30-40 % respecto al GLP.

Otros estudios realizados por los analistas del sector del automóvil en España aseguran que crecerá el número de vehículos. En 2016 ya había aproximadamente 4.600 vehículos a gas natural [103]. Una cifra que comparada a la del año 2008, se observa que se ha duplicado el número de automóviles que usan este tipo de combustible. Por una parte, casi 7 de cada 10 vehículos a GNC cumplen funciones de servicios municipales: autobuses urbanos (40 %) o camiones de recogida de basura (29 %). Según la Dirección General de Tráfico (DGT) del Ministerio del Interior, había en 2016 en España un total de 61838 autobuses, siendo la mayoría con motores diésel [99] (tabla). La figura presenta el aumento de los autobuses no convencionales (Autobuses Otros: Vehículos GNC, Eléctricos e Híbridos) en los últimos años frente a los modelos Gasoil:

Tabla 4.1: Parque por carburante y años de antigüedad (Años 2016)³.

Año matriculación	Autobuses Gasolina	Autobuses Gas-oil	Autobuses Otros	Autobuses Total
Total	241	59944	1653	61838

Según la EMT de Madrid, desde 2012, muchos autobuses híbridos, con un motor eléctrico y otro diésel que, además de reducir las emisiones de CO_2 , son menos ruidosos y consumen mucho menos combustible, circulan ya por las carreteras madrileñas como parte de la flota de las empresas concesionarias de líneas interurbanas. La ventaja de estos autobuses híbridos es que el inicio de la marcha se realiza con el motor eléctrico, el cual alimentado por las baterías que lleva el vehículo, y, solo cuando se va necesitando más potencia, entra en funcionamiento el motor diésel. En condiciones de aceleración normal, este paso de uso eléctrico a diésel se produce en el entorno de los 15 a los 20 kilómetros por hora. Además, las baterías eléctricas, una vez se esté usando el motor diésel, se van recargando por las frenadas del vehículo. Según datos del fabricante (21), optimizando el uso del vehículo y atendidas las recomendaciones del programa de mantenimiento, se puede reducir en promedio el consumo de combustible un 14 %, con mayor eficiencia energética y mayor respeto al medio ambiente (figura 4.4).

³Fuente: <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>

⁴Fuente: <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>

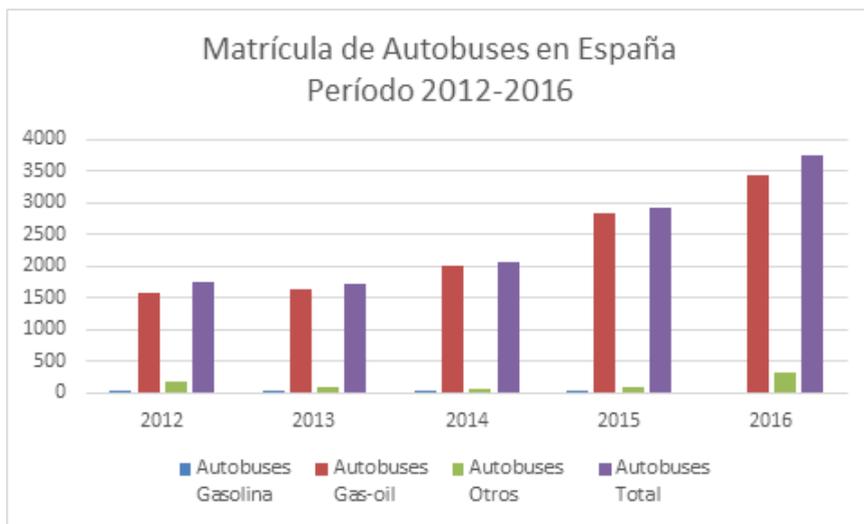


Figura 4.3: Matrícula de Autobuses en España⁴.

Sin embargo, también hay apuestas en otras tecnologías como los autobuses 100 % eléctricos que ya son una realidad en Barcelona. La empresa de Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB) y la eléctrica Endesa han presentado en 2016 el primer cargador “ultrarrápido” para los dos primeros autobuses articulados 100 % eléctricos de España. Su funcionamiento se resume en una sola imagen: el autobús llega a su última parada de línea, de su capota sale un brazo mecánico que se conecta a un cargador, parecido a una farola e instalado en la propia parada en solo cinco minutos la batería del vehículo se carga hasta el 80 %, ya está listo para circular 14 horas más por la ciudad (figura 4.5).

Otro ejemplo destacable en España es la ciudad de Valladolid, que utilizan autobuses alineados con la concienciación del medioambiente: 103 autobuses accionados por GLP, 41 por Biodiésel y 6 Híbridos, incorporados a la flota de AUVA-SA (Autobuses Urbanos de Valladolid). Entre los cinco nuevos vehículos híbridos adquiridos en 2016, dos de ellos son parte de lo establecido en el Proyecto REMOURBAN, que también incluye el sistema de recarga en línea. REMOURBAN es un proyecto estratégico en el ámbito de la movilidad sostenible, donde varias entidades españolas bajo supervisión de la Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía (EnerAgen) y otros seis países europeos trabajan con-

⁵Fuente: <https://madridmobilitate.com/2016/04/22/la-emt-de-madrid-adjudica-nuevos-autobuses/>



Figura 4.4: Autobús Marca Scania – Modelo N280 UB GNC⁵.

juntamente para desarrollar modelos de regeneración urbana. Este proyecto se encuentra enmarcado en la iniciativa Smart City [55].



Figura 4.5: Autobús Articulado de la empresa TMB⁶.

Según la empresa AUVASA, los vehículos híbridos están accionados por un sistema diésel-eléctrico que, junto con la incorporación de baterías, permite reducir el uso energético y las emisiones de CO_2 en hasta un 40 %, además de establecer un nivel de eficiencia ecológica por encima de lo establecido en la legislación Euro 6. Aprovechan la energía generada en el frenado del vehículo para reanudar la mar-

⁶Fuente:<https://www.endesa.com/es/proyectos/a201610-autobus-electrico-barcelona.html>

cha, sin que sea necesaria la intervención del motor diésel. Además, incorporan un conjunto de baterías para aumentar el tiempo de actividad en régimen eléctrico. Sin embargo, la principal característica diferenciadora de estos cinco vehículos es que permitirán su evolución a tecnología eléctrica, dotándoles de la capacidad de operar parcialmente en modo 100 % eléctrico, gracias a la posibilidad de realizar carga eléctrica mediante un sistema de captación de energía en línea. Mediante este sistema el autobús podrá recargar desde la red eléctrica la energía necesaria para poder realizar parte del recorrido en funcionamiento exclusivamente eléctrico, por lo que el motor diésel solamente se usa cuando es necesario, pudiéndose establecer zonas del viario con funcionamiento 100 % eléctrico con cero emisiones.

Pero el uso de nuevas tecnologías de control con electrónica embarcada en autobuses y nuevos sistemas de propulsión tiene sus límites. Desarrollar nuevas clases de motores ha costado tanto dinero y esfuerzo, que los fabricantes están poniendo sus miras en otros combustibles y formas de propulsión. La principal dificultad aún es el coste. Hay que tener en cuenta que los autobuses son una inversión considerable y el mercado no es muy grande. Por ahora, cada fabricante tira por su lado, algunos apuestan por los autobuses a gas natural, otros por los de gas licuado, otros por los híbridos, otros eléctricos, etc. Aún es pronto para saber cuántas emisiones pueden reducirse usando estas nuevas tecnologías. Los expertos sí están de acuerdo en una cosa: queda mucho para el autobús 100 % eléctrico, sin emisiones in situ. Otro punto frágil es el mismo que del coche 100 % eléctrico: el coste y la escasa autonomía de las baterías. En un autobús normal, de 12 metros de largo, solo con el espacio que ocupan las baterías deberíamos renunciar a entre 30 y 50 pasajeros por viaje. Factor este que obviamente disminuye el potencial beneficio de las empresas.

4.2.2.2 Coste de Compra de un Autobús

Como un autobús es un producto altamente personalizado, y tiene que atender una serie de requisitos tanto en sus características estructurales como de acabado, los principales factores que contribuyen a esta personalización y consecuentemente en el precio de adquisición son:

- Legislaciones y normas: son específicas para cada país, provincia y ciudad, imponiendo condiciones para el sistema estructural de la carrocería, accesibilidad, capacidad de transporte, emisiones atmosféricas, normas medioambientales para el uso de materiales, dimensiones de la carrocería, garantías y sistemas de seguridad para conductores y pasajeros y ergonomía.
- Tipo de aplicación: autobuses para transporte urbano, transporte interurbano, transporte escolar, turismo, etc.

- Características físicas del producto: cantidad y tipo de asientos, tipos de ventanas, sistema de confort térmico, longitud, número y tipo de accesos (puertas), opcionales de confort y decoración, sistemas de maletero, sistemas de iluminación (internos y externos).
- Chasis: fabricante y modelo de chasis;
- Sistema de propulsión, transmisión, combustible a ser utilizado;
- Características físicas de la región de actuación: de las carreteras (calzadas o no),
- Condiciones de clima y ambiente (ambientes más o menos corrosivos, por ejemplo);
- Necesidades del cliente y características del mercado: de productos sofisticados con alto valor agregado hasta transportes colectivos de bajo coste operacional, acabados (pintura) que evidencian la marca del cliente y las características y costumbres de los clientes de la región de actuación;

Los elementos relacionados previamente demuestran el alto grado de personalización del producto, de donde en muchos casos, existen clientes que poseen productos tan exclusivos que una vez producidos ya no se repetirán.

En resumen, el coste de la compra del vehículo (chasis), además de los elementos para completarlo (carrocería, asientos de pasajeros, accesorios, etc.) y el nivel de detalle de estos gastos debe ser compatible con el tipo de inversiones y la forma de pago. Los precios de compra de los autobuses no pueden considerarse constantes. Esta variación depende directamente de la cantidad de la producción y los posibles cambios tecnológicos causados por los requisitos legales y la innovación.

Adicionalmente, a nivel transnacional, nacional o regional se pueden impulsar campañas de incentivación de determinadas soluciones tecnológicas (fundamentalmente sistemas de propulsión alternativos) y combustibles alternativos. Como botón de muestra para incentivar las empresas concesionarias en transporte de pasajeros, el gobierno de España a través del **Real Decreto 617/2017, de 16 de junio**, tiene por objeto regular las bases para la concesión directa de ayudas para la adquisición de vehículos eléctricos, de gas licuado del petróleo (GLP/Autogás), de gas natural comprimido (GNC) y licuado (GNL), vehículos que se propulsen con pila de combustible y motocicletas eléctricas, fomentando con ello la sostenibilidad en el sector del transporte, la disminución de las emisiones de contaminantes y la mejora de calidad del aire, así como la diversificación de las fuentes energéticas en el transporte y la infraestructura. Entre estas actuaciones cabe destacar la

aprobación del Real Decreto 1053/2014, de 12 de diciembre, por el que se aprueba una nueva Instrucción Técnica Complementaria (ITC) BT 52 «Instalaciones con fines especiales. Infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos», así como los continuados Programas MOVELE lanzados en el año 2011.

Tras la aprobación en junio de 2015 de la Estrategia de Impulso del Vehículo con Energías Alternativas (VEA) en España 2014-2020, liderada por dicho Ministerio de Industria, Energía y Turismo, se puso en marcha el Plan de Impulso a la Movilidad con Vehículos de Energías Alternativas (MOVEA) para el año 2016, como una medida que formaba parte de dicha Estrategia. El objeto de este plan era la unificación de los distintos programas y planes dirigidos a apoyar la adquisición de los vehículos más eficientes que se han desarrollado hasta el momento, al tiempo que ampliaba los vehículos objeto de apoyo incluyendo no solo los vehículos eléctricos, sino también los vehículos propulsados por Gas Licuado del Petróleo, Gas Natural y motocicletas eléctricas, así como puntos de recarga para vehículos eléctricos en zonas de acceso público.

En este contexto, y atendiendo al elevado coste que todavía tienen este tipo de vehículos a día de hoy respecto a los vehículos de tecnologías convencionales, así como a la elevada demanda generada por el Plan MOVEA 2016, se estima conveniente y necesario dar continuidad al mismo, para promover la adquisición de vehículos de energías alternativas mediante la regulación de concesión directa de subvenciones, establecida por este real decreto [19].

4.2.2.3 Combustible: Consumo y coste

Combustible: En las flotas de transporte, el combustible tiene especial relevancia en su estructura de costes, por lo tanto, para el adecuado desarrollo de su actividad económica, se hace necesaria la realización de una gestión eficiente del combustible en las mismas [15].

Se entiende por gestión eficiente del combustible el diseño y la puesta en práctica de un sistema de control, supervisión y, muy especialmente, de seguimiento del consumo de carburante global e individualizado de los vehículos de una flota de transporte. La gestión del combustible permite aprovechar de la manera más rentable cada litro de combustible adquirido, contribuyendo con ello no sólo a la economía de la empresa, sino también al ahorro energético y a la mejora de la conservación del medio ambiente. Una adecuada gestión del combustible está además ligada a:

- Una adecuada planificación de rutas y de vehículos.
- La utilización de las técnicas de conducción eficiente.

- Un correcto mantenimiento de los vehículos.
- La calidad del servicio prestado al cliente.

La contribución de los costes de carburante respecto a los costes totales de operación varía según la naturaleza de la flota. Por un lado, para una flota de vehículos pequeños que habitualmente realizan bajos kilometrajes anuales, esta proporción puede suponer algo más del 5 % del total. Sin embargo, en el otro extremo, para una flota de vehículos de gran tonelaje y largo recorrido, la proporción puede alcanzar hasta el 30 % del coste total. Entre estos dos extremos, la partida media de coste de carburante para una flota de transporte ocuparía en torno al 15 % de los costes totales.

En la actualidad, la conciencia sobre los problemas del medio ambiente va calando en la sociedad y se ha de tener en cuenta que la reducción de consumo de combustible va ligada a la disminución de las emisiones a la atmósfera, sobre todo las que tienen relación con el calentamiento global de la atmósfera. La combustión del carburante en el motor emite a la atmósfera cantidades importantes de dióxido de carbono (CO_2), unos 2,6 y 2,35 kilogramos por cada litro de gasóleo y de gasolina consumidos respectivamente. La reducción de las emisiones es un aspecto novedoso en la gestión empresarial que, empleado adecuadamente, puede contribuir a la mejora de la imagen de la empresa y a la ampliación de la cartera de clientes.

Por último, el establecimiento de un adecuado sistema de gestión del combustible dará lugar a un ahorro de carburante y, por lo tanto, a una mayor eficiencia energética en la realización de sus servicios, a través de dos vías:

- Por un lado, mejorar la eficiencia de cada vehículo, a través del control y seguimiento individualizado de los mismos, así como del establecimiento de programas de formación a los conductores en las técnicas de conducción eficiente.
- Por otro lado, a través del establecimiento de un sistema global de control y seguimiento del consumo de carburante de la flota; de la programación de las rutas y de la asignación adecuada a las mismas de los vehículos, en función de sus características y consumos. Se logrará además un ahorro de carburante y por lo tanto, una mayor eficiencia energética para el conjunto de la flota.

Si nos centramos en el consumo de combustible, en la Unión Europea y consecuentemente en España, los precios de los combustibles que desde el inicio de la crisis de 2008 sufrían un crecimiento importante, empezaron a decrecer en 2014, lo que permitió una reducción significativa en los costes operativos de las flotas

de transporte (figura 4.6, figura 4.7 y figura 4.8) [19]. Si por un lado este factor reduce los costes finales operativos, por otro lado, exige a los responsables de la decisión de renovación de las flotas, criterios más precisos en la elección del modelo de vehículos a la hora de comparar los vehículos convencionales a diésel con los de combustibles alternativos, los cuales son subvencionados en España.

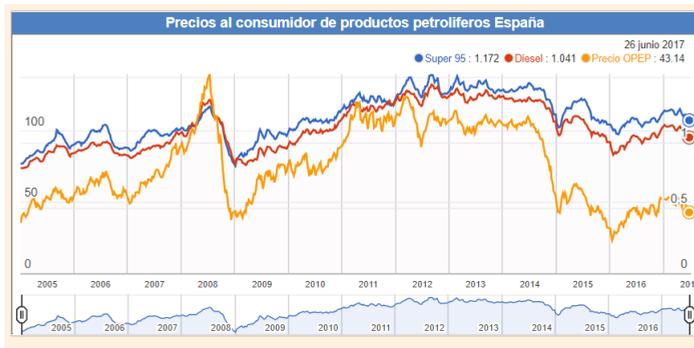


Figura 4.6: Precios con Impuestos del Gasóleo de Automoción en España (2005-2017)⁷.

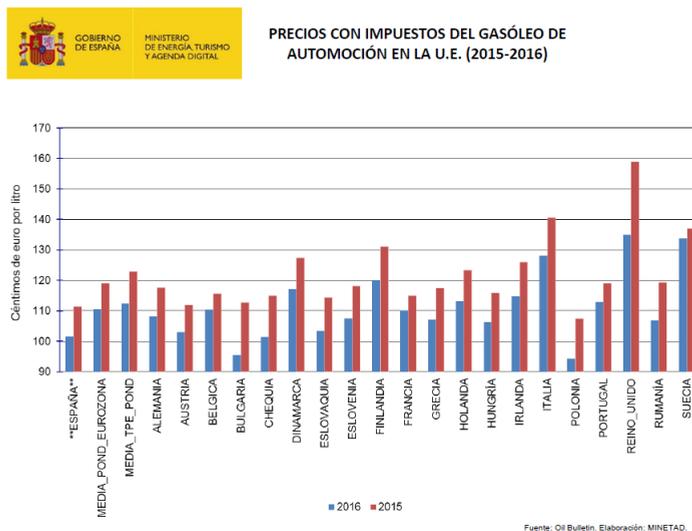


Figura 4.7: Precios con Impuestos del Gasóleo de Automoción en la U.E.⁸

⁷Fuente:<http://www.minetad.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesAnuales>

⁸Fuente:<http://www.minetad.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesAnuales>

⁹Fuente:<http://www.minetad.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesAnuales>

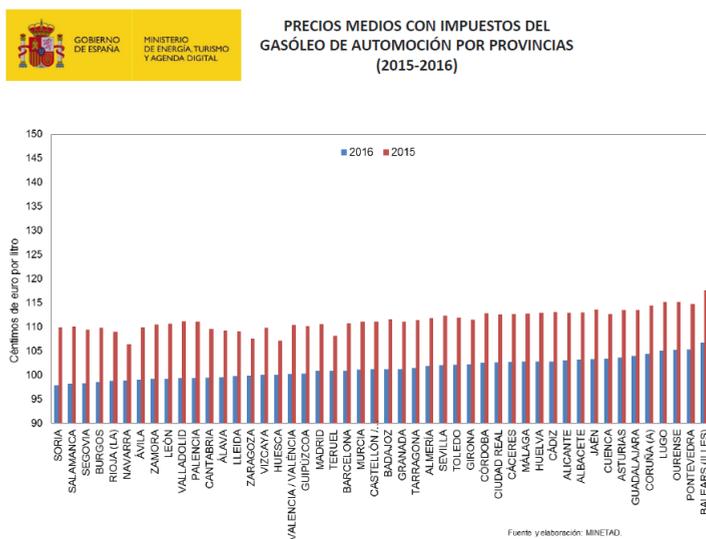


Figura 4.8: Precios Medios con Impuestos del Gasóleo en España⁹.

El precio final a ser pagado por las empresas es una función de la cantidad y valor del combustible fijado en el contrato con los operadores. En estos casos, da lugar generalmente a un precio más barato en comparación con el mercado convencional (consumidores individuales o minoristas), debido a los ahorros que se pueden lograr teniendo en cuenta la gran cantidad de combustible negociado para las flotas urbanas [13, 7].

4.2.2.4 Condiciones de contorno ambiental

La orografía de la calzada contribuye al consumo en la medida que, cuánto más montañosa sea la ruta realizada mayor será éste. Rutas tortuosas, lentas y empinadas harán por ejemplo, que el consumo se dispare. Como regla general, mientras más veces tenga que cambiar de marcha, acelerar o frenar, mayor será el consumo de combustible. Las ciudades congestionadas también hacen que se consuma más. Las variaciones del tráfico, incluso circulando por la misma ruta, pueden ser considerables, sobre todo si se conduce de noche o de día y pueden hacernos consumir menos/más combustible de lo previsto. El estado de la superficie también influye, pues el consumo se ve incrementado cuando las condiciones de la carretera no son buenas (pavimento irregular, baches, etc).

Las condiciones atmosféricas y la estacionalidad también influyen en el consumo, en este caso son factores externos. El tiempo es sobre todo importante tenerlo en cuenta cuando se comparan datos en las que las condiciones climatológicas son diferentes. La estacionalidad afecta siempre al rendimiento, en la mayoría de los países se dan consumos mayores en invierno debido a que las temperaturas son más bajas y que los días son más cortos, hay un mayor uso de los equipos auxiliares y a que los conductores dejan el motor a ralentí cuando aparcan para mantener la cabina caliente. El consumo de invierno a verano también puede variar en torno a un 3% debido a la variación de peso específico que sufre el combustible. Por otro lado en países con entornos cálidos el uso de Aire Acondicionado en los vehículos luce lo contrario.

4.2.2.5 Características del Vehículo

La potencia requerida para la propulsión de un vehículo se ve influenciada por las resistencias aerodinámicas al avance, la resistencia a la rodadura y la resistencia gravitatoria. Cada uno de estos factores contribuye de manera incremental al consumo, por lo que se debe intentar minimizarlos lo máximo posible.

Con relación a la resistencia aerodinámica, el diseño de los vehículos en los últimos años tiene como uno de sus principales objetivos obtener la máxima eficiencia en la relación: autonomía/combustible. La tecnología de los años setentas con sus autobuses en forma de lámina corrugada con gran resistencia mecánica (figura 4.9) ha evolucionado hacia la actual fibra de vidrio, mucho más ligera, dejándoles a los largueros metálicos del esqueleto, la función de proteger la integridad de la carrocería del autobús. Además, ya se puede observar el uso de materiales compuestos como los que ahora se emplean en aviación, más ligeros y resistentes. Actualmente, se busca un autobús que pese lo menos posible, gaste menos combustible por la misma distancia recorrida, o mejor aún tenga más alcance con el mismo combustible. Para lograr esto, se ha tenido que usar una nueva forma en las carrocerías, suaves curvas aerodinámicas que ofrecen la mínima resistencia al aire, al mismo tiempo que usan la forma del flujo para aumentar el agarre a la carretera (figura 4.10).

La Resistencia a la Rodadura se ve afectada por factores concernientes a:

1. Diseño y construcción del neumático
2. Condiciones operativas

¹⁰Fuente:https://i.ytimg.com/vi/4dom_oUpFyg/hqdefault.jpg

¹¹Fuente:<http://www.ascabus.es/gestion/descargas/docs/Informe.pdf>



Figura 4.9: Autobús años 70¹⁰.



Figura 4.10: Autobús años 2015¹¹.

3. Características de la superficie de rodadura

Una presión excesivamente baja de los neumáticos redonda en una mayor resistencia a la rodadura, un peor comportamiento en curvas y un aumento de su temperatura de trabajo por lo que, además de aumentar el consumo, aumentan las posibilidades de un reventón, o desprendimiento de la banda de rodadura en caso de neumáticos con banda de rodadura no original.

Además, la presión excesivamente baja respecto a la recomendada por el fabricante provoca desgastes anormales y no uniformes sobre las partes laterales

de la banda de rodadura. En montajes de ruedas gemelas podría ocurrir que la deformación de la parte del neumático que apoya en cada instante en el suelo fuese tan abultada que tocara con el neumático gemelo, dando esto lugar a fenómenos de rozamiento que aumenten notablemente la temperatura de trabajo, produciendo un desgaste anormal en los flancos del neumático. Por otro lado, una presión excesivamente alta en los neumáticos produce, además de rebotes innecesarios en la suspensión, desgastes a saltos del mismo, principalmente concentrados en la zona central de la banda de rodadura, lo que incrementa el consumo y produce un desgaste prematuro del neumático.

La Resistencia gravitatoria se debe a la fuerza que se debe vencer cuando se sube por una pendiente. Depende directamente de la masa total del vehículo y de la inclinación de la pendiente. El vehículo precisa disponer de una mayor fuerza de propulsión para vencer la resistencia ofrecida por la pendiente. Es necesario contar por lo tanto con una mayor potencia de motor para evitar un descenso de la velocidad y compensar la potencia de pendiente. Esta resistencia puede minimizarse si:

- Se engrana oportunamente la relación de transmisión adecuada antes de comenzar la subida.
- Cambiar la velocidad lo menos posible durante la subida.
- Utilizar el motor dentro de los límites fijados.

4.2.2.6 Personal de Conducción

La evolución tecnológica ocurrida al largo de los últimos años ha modificado en gran medida el diseño de los vehículos y se han introducido importantes modificaciones en el motor y en los distintos sistemas destinadas a aumentar su rendimiento, reduciendo su consumo de carburante y sus emisiones. Estas mejoras tecnológicas demandan al conductor un nuevo estilo de conducción acorde con ellas, aprovechando todas las ventajas que ofrecen los motores modernos. A este nuevo estilo de conducción se le denomina “conducción eficiente” [56]. Es preciso, por lo tanto, que el personal de conducción esté bien formado en técnicas de conducción eficiente.

La conducción eficiente de autobuses consiste en una serie de técnicas que, unidas a una adecuada actitud del conductor, dan lugar a un nuevo estilo de conducción que logra importantes ahorros de carburante y reducción de emisiones al medio ambiente, así como una mejora en la seguridad. Estos logros se concretan en mejoras de distintos aspectos que se citan a continuación:

- Ahorro de energía en el ámbito nacional.
- Reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2).
- Ahorro económico en las empresas de transporte.
- Reducción de contaminación atmosférica.
- Mejora del confort y disminución del estrés en la conducción.
- Reducción del riesgo y gravedad de los accidentes.
- Reducción de los costes de mantenimiento.

Como en todo proceso de aprendizaje, la experiencia es necesaria para alcanzar los objetivos deseados; así pues, una vez formado el conductor en las técnicas de la conducción eficiente, asimilará y perfeccionará las técnicas a través de su propia experiencia.

La conducción eficiente ofrece las siguientes ventajas:

- Ahorro de energía: el conductor, con su comportamiento, tiene una gran influencia sobre el consumo de carburante del vehículo, dando lugar a ahorros medios de carburante del orden del 10 al 15 %. Esto supone un considerable ahorro energético para nuestro país, mejorándose además la balanza de pagos y reduciéndose la dependencia energética del exterior.
- Ahorro económico: como consecuencia del apartado anterior. El carburante supone la principal partida en los gastos que genera la actividad de un vehículo. Una mayor eficiencia en el consumo de carburante incidirá en un ahorro de costes y, por tanto, en un mayor beneficio económico para la empresa.
- Ahorro en mantenimiento: el efecto de reducción de consumo está asociado no sólo a un menor coste en carburante, sino también a un menor coste en mantenimiento del vehículo, ya que las nuevas pautas a seguir provocan que los distintos sistemas del vehículo (frenos, embrague, caja de cambios, motor...), estén sometidos a un esfuerzo inferior al que soportarían en el caso de la conducción convencional.
- Reducción de emisiones: la reducción del consumo de carburante a través de la puesta en práctica de la conducción eficiente va ligada a una reducción de las emisiones de CO_2 y de contaminantes al medio ambiente. Con la reducción de emisiones lograda por la conducción eficiente se contribuye a la resolución de los problemas del calentamiento de la atmósfera y al cumplimiento de los acuerdos internacionales en esta materia.

- Reducción del riesgo de los accidentes: la conducción eficiente incrementa la seguridad en la conducción, ya que estas técnicas de conducción están basadas en la previsión y en la anticipación. Esta mejora en la seguridad está constatada a través de distintos estudios realizados en países europeos donde lleva tiempo implantada, con reducciones en las cifras y gravedad de los accidentes de tráfico.
- Aumento del confort en la conducción: además de todos los sistemas de mejora del confort que incorporan los vehículos modernos, se puede hacer que el viaje sea aún más cómodo mediante la nueva conducción eficiente. Ante todo, la conducción eficiente es un estilo de conducción impregnado de tranquilidad y sosiego que reduce las tensiones y el estado de estrés producido por el tráfico al que están sometidos los conductores.

4.2.2.7 Las políticas de formación

La capacitación es un conjunto de actividades de instrucción-aprendizaje estructuradas de tal forma que conduzcan a alcanzar una serie de objetivos previamente determinados. La capacitación está directamente relacionada con las habilidades, el conocimiento y las estrategias necesarios para realizar un trabajo determinado. Puede abarcar la enseñanza de nuevas habilidades a miembros del personal, la presentación de ideas innovadoras, la oportunidad de practicar y recibir una retroalimentación sobre técnicas o estilos particulares de trabajar con la gente o simplemente alentarlos a debatir sobre su trabajo entre sí. Además, puede, y debería, tener continuidad mientras dure el empleo.

En flotas de transporte urbano, donde la tecnología de vehículos se ha convertido en un desafío cada vez mayor todo aquellos involucrados en mantenimiento, pues aprender y mantenerse al tanto de las tecnologías que cambian rápidamente (especialmente la electrónica embarcada) se han convertido en una necesidad para la industria del motor. Desde la perspectiva de los talleres, el acceso a especificaciones del fabricante, software, códigos de diagnóstico, diagramas de cableado y herramientas especiales, modelo preciso del vehículo en reparación son de importancia crítica en la actualidad para un adecuado mantenimiento de vehículos, al mismo tiempo que se hacen necesarios servicios de mantenimiento al menor coste posible.

La práctica actual con respecto a la reparación de los vehículos ligeros se basa en reemplazar módulos completos, mientras que, para los vehículos pesados, los módulos son frecuentemente desmontados, reparados y reutilizados. En general, el tiempo para completar las tareas de mantenimiento y reparación ha disminuido

considerablemente a lo largo de los años, pero el personal de mantenimiento debe poseer un mayor conjunto de habilidades para realizar su trabajo.

Para las nuevas tecnologías, como el GNC, Híbridos, Eléctricos y otros tipos, es necesaria una mayor dedicación de todos los involucrados en la operación y mantenimiento de los vehículos, por lo tanto, se requiere una formación continua. Una de las ventajas es que muchos de estos trabajadores ya tienen un excelente conocimiento en los sistemas convencionales, tales como los vehículos Diésel, lo que facilita el aprendizaje adicional. Además, para asegurar la efectividad de los programas de mantenimiento de las flotas de transporte urbano, una disponibilidad estable de mecánicos cualificados y capaces debe ser una prioridad fundamental para la empresa.

Por último, hay que considerar que el coste para la formación a menudo se expresa en términos financieros relacionados con el nivel de la inversión, pero el coste de la capacitación es relativamente bajo en comparación con el total de los gastos de personal.

4.2.2.8 *Infraestructura*

Los costes de infraestructuras tales como: abastecimiento de combustible y mantenimiento, son parte de los costes totales de una flota de autobús. Una flota de transporte de autobuses urbanos por lo general tiene el taller de mantenimiento y reparación localizado junto a otras instalaciones operativas, tales como la estación de suministro de combustible. El tamaño del taller y de los equipos se determina en función del número, tipos de acciones y el régimen de mantenimiento y operación, pudiendo incluir: controles de vehículos (mantenimiento preventivo); reparación; engrase; materiales y componentes; comunicación con los conductores y de gestión.

El mantenimiento y la reparación de los vehículos no necesariamente tienen que ser realizadas por el propio operador de la empresa de transporte. Cuando la flota es pequeña, el mantenimiento propio no suele ser rentable, ya que la inversión requerida (formación de personal, equipos de reparación, adquisición de repuestos, etc.) no se justifica. Una solución alternativa puede ser la de realizar sólo los trabajos de mantenimiento básico en los propios talleres, mientras que las acciones y las reparaciones, tales como reparaciones más grandes pueden ser prestados por el proveedor del vehículo o mediante externalización. Por otro lado, si el operador posee un taller bien equipado, puede ofrecer servicios de mantenimiento y reparación a otras flotas de transporte. Hoy en día, un número creciente de fabricantes ofrecen sus vehículos a través de un contrato que incluye actividades de mantenimiento [71].

4.2.2.9 Impuestos y tasas

Tasas de inflación

Este es el índice que se utiliza para actualizar los costes hasta la fecha de análisis, si es necesario, tales como el precio de compra, el coste de inversión, y el coste de la infraestructura. Habitualmente se utiliza la tasa de inflación del país de estudio. Cuando hablamos de *la inflación en España o en Brasil*, nos referimos a menudo al índice de precios al consumo, abreviado como IPC. El IPC muestra la evolución de los precios de una serie definida de productos y servicios que adquieren los hogares en España o Brasil para su consumo. Para determinar la inflación, se analiza cuánto ha aumentado porcentualmente el IPC en un período determinado con respecto al IPC en un período anterior (tabla 4.2 y tabla 4.3).

Tabla 4.2: IPC España actual e histórico¹².

IPC ES últimos meses		IPC ES últimos años	
Período	Inflación	Período	Inflación
julio 2017	1,548 %	julio 2017	1,548 %
junio 2017	1,510 %	julio 2016	-0,594 %
mayo 2017	1,936 %	julio 2015	0,068 %
abril 2017	2,554 %	julio 2014	-0,340 %
marzo 2017	2,290 %	julio 2013	1,774 %
febrero 2017	2,967 %	julio 2012	2,207 %
enero 2017	2,975 %	julio 2011	3,092 %
diciembre 2016	1,570 %	julio 2010	1,916 %
noviembre 2016	0,675 %	julio 2009	-1,369 %
octubre 2016	0,679 %	julio 2008	5,273 %

¹²Fuente:<http://es.global-rates.com/estadisticas-economicas/inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipc/espana.aspx>

¹³Fuente:<http://es.global-rates.com/estadisticas-economicas/inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipc/brasil.aspx>

Tabla 4.3: IPC Brasil actual e histórico¹³.

IPC ES últimos meses		IPC ES últimos años	
Período	Inflación	Período	Inflación
julio 2017	2,712 %	julio 2017	2,712 %
junio 2017	2,998 %	julio 2016	8,736 %
mayo 2017	3,597 %	julio 2015	9,558 %
abril 2017	4,083 %	julio 2014	6,502 %
marzo 2017	4,571 %	julio 2013	6,271 %
febrero 2017	4,759 %	julio 2012	5,198 %
enero 2017	5,354 %	julio 2011	6,873 %
diciembre 2016	6,288 %	julio 2010	4,601 %
noviembre 2016	6,987 %	julio 2009	4,499 %
octubre 2016	7,874 %	julio 2008	6,367 %

Impuestos

Para este estudio, que se ha centrado en el mercado español, los impuestos considerados han sido los siguientes:

- Impuesto de matriculación: se aplica en el momento de la compra al precio de compra del vehículo.
- Impuestos de Circulación de Vehículos: este es un impuesto municipal anual y cuya tasa varía según el municipio de la empresa propietaria en todo el país.

Seguro Obligatorio

El seguro obligatorio es cualquier tipo de cobertura de seguro que es requerido por la ley, tanto para los individuos como para ciertas actividades de las empresas. La idea tras este tipo de cobertura obligatoria es proteger el bienestar de los que, de otro modo, se verían afectados negativamente si los eventos cubiertos en los términos de las pólizas tuvieran lugar. Es común que el gobierno regional o local requiera que todas las entidades que operan un determinado servicio público tengan seguro de responsabilidad civil. Los precios pueden variar según el tipo de vehículo, combustible, uso y ubicación.

4.2.3 Conclusiones

Aunque existe mucha información disponible públicamente sobre las flotas, el principal problema observado durante este trabajo es la dificultad a la hora de encontrar y obtener los datos necesarios para el desarrollo de un estudio completo, desagregado y fiable. Es decir, el acceso a los costes de explotación de las flotas de autobuses urbanos es un trabajo cuasi imposible, ya que existen una serie de factores que conducen a esto:

- La empresa tiene un celo profesional a la hora de mostrar datos económicos de cualquier tipo, ya que éstos pueden ser utilizados por otros agentes de interés públicos y privados para afectar el funcionamiento de la empresa. Además, en el caso de que haya una empresa pública gestora, existen aspectos de interés político.
- Los sistemas de gestión de los datos (GMAO y otros), ampliamente utilizados en la industria, presentan una dificultad inherente a la hora de extraer datos de interés para este trabajo. Las estructuras de base de datos de este tipo de servicios presentan una complejidad y profundidad de difícil comprensión por parte de personal externo a la empresa. Por tanto, requiere de un contacto interno que dedique tiempo y recursos para realizar la minería de datos necesaria para el desarrollo del trabajo de análisis. Además, se han detectado casos de pérdida sensible de datos en procesos de actualización de los sistemas software, llevando a series de datos incompletas. Por último, la compatibilidad entre diferentes programas y versiones también provoca dificultades a la hora de introducir los datos de manera correcta, resultando en datos anómalos y descartables.

Por ello, los datos a los que se ha tenido acceso en este trabajo han sido conseguidos después de un arduo proceso, realizado durante meses con el objetivo de obtener datos fiables, precisos y de interés real para esta Tesis.

- España: Durante el desarrollo de la Tesis se realizaron contactos prospectivos con la gran mayoría de flotas de transporte urbano de gran tamaño presentes en el estado. Debido a las buenas relaciones del Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos con dos de las flotas, con la que ha realizado una serie de proyectos de investigación y tiene una relación muy longeva, se obtuvo sendos permisos parciales para la obtención de ciertas series de datos de manera confidencial, y con la responsabilidad del IU CMT-Motores Térmicos de su uso correcto.
- Brasil: Ante la presencia de las mismas dificultades anteriores, y añadiendo la presencia de un gestor público de flotas privadas en la ciudad de Curitiba,

se optó por una vía alternativa. Durante el desarrollo de la Tesis, el alumno escogió realizar una estancia de doctorado de 4 meses en una empresa consultora especialista en asesoramiento a flotas de transportes urbanos. Desde su posición en esta empresa y valiéndose de las buenas relaciones entre las flotas de autobuses y UTFPR, donde el candidato ejerce de profesor, consiguió obtener una serie de datos de una subflota seleccionada por parte de una de las empresas privadas de la ciudad de Curitiba. Existe una particularidad principal en el caso brasileño. Las flotas de transporte urbano son privadas pero concesionarias del servicio público a través de URBS, la cual es la responsable final del transporte.

El **URBS** (nombre comercial: URBS - Urbanización de Curitiba S/A), es una sociedad anónima que controla el sistema de transporte público en la ciudad de Curitiba. El sistema de transporte público de Curitiba es uno de los más eficientes de Brasil, que se ha demostrado por una serie de premios internacionales. La empresa fue inaugurado en año 1960 con la preocupación de dar prioridad al transporte público, el sistema es reconocido por la combinación de bajos costos de operación y servicio de buena calidad. Alrededor de 1,9 millones de pasajeros son transportados al día, con un grado de satisfacción del 64,07 % de los usuarios, de acuerdo con los datos manejados por URBS [106].

El gran diferencial del transporte curitibano es disponer de tarifa integrada, permitiendo desplazamientos para toda la ciudad pagando apenas un pasaje, pero que actualmente puede ser considerada superada. Cada persona puede componer su propio recorrido, ya que el sistema es integrado por medio de Terminales y Estaciones-Tubo. Quien recorre trayectos largos, lo que es más común entre la población de menor poder adquisitivo, es subsidiado por aquellos que realizan recorridos menores. Esta solución, sin embargo, implica desplazamientos mucho más grandes que lo necesario porque la integración se realiza sólo en algunos puntos específicos. Se calcula que diariamente el 80 % de los usuarios utilizan integración. Actualmente, la Red de Transporte Integrado opera 1.877 autobuses, que llevan unos catorce mil viajes al día, un total de 316.000 km [106].

4.2.4 Descripción de las flotas utilizadas según los ejes directores

A continuación en la tabla 4.4, se muestra información relacionada con las flotas seleccionadas para esta investigación, según los ejes directores definidos anteriormente.

Tabla 4.4: Datos seleccionados con las empresas de transporte.

Ítem		Flota A	Flota B*	Flota C
Información general	Origen	España-Alicante	Brasil-Curitiba	España- Valencia
	N° Autobuses	80	300	485
	Km recorridos diarios (promedio)	165 km	200 km	180 km
	N° líneas	17	71	59
	N° pasajeros diarios de la ciudad (promedio)	40.000	325.000	255.000
	Velocidad media	12,0 km/h	17 km/h	12,78 km/h
Tecnología de motorización del vehículo de la muestra para el análisis: D = Diésel; GNC = Gas Natural Comprimido		Total: 34 autobuses Diésel EURO 3: 2007-12; 2005-5; 2004-5; 2003-6; 2002-6	Total: 33 autobuses Diésel B7R EURO 3 - 2011;	Total: 20 autobuses 1) D: 10 autobuses EURO 3 - 2004; 2) GNC: 10 autobuses EEV-2006;
Precio de compra de un autobús nuevo similar de la muestra para el análisis: D = Diésel; GNC = Gas Natural Comprimido;		D: 240.000,00 €	D: 120.000,00 €	D: 240.000,00€; GNC: 260.000,00€
Condiciones de contorno ambiental		Clima: Semiárido cálido Temperatura media: 18, 1°C; La precipitación media = 344 mm	Clima: Cálido y Templado Temperatura media: 17, 2°C; La precipitación media = 1300 mm	Clima: Templado; Temperatura media: 17, 4°C; La precipitación media = 445 mm
Edad media de la flota		10 años	08 años	12 años

*Los datos de la flota brasileña son para la empresa en análisis, pero la flota de la ciudad es de 1877 autobuses, para 1.9 millones de pasajeros/día

*1euro = R\$4,33, valor adoptado para cambio del valor de compra de autobús en Brasil.

4.3 Estudio Comparativo entre Autobuses Diésel y GNC

4.3.1 Antecedentes

Siguiendo las conclusiones obtenidas en el estudio de “screening” de los costes de explotación de diferentes flotas de autobuses, se decidió seleccionar una de las flotas y la serie de datos disponibles para un estudio previo de idoneidad, capacidad y calidad de éstos. Para ello, el objetivo de este estudio fue realizar un análisis comparativo entre dos diferentes tecnologías de vehículos con datos reales de explotación y mantenimiento, que permitió determinar ventajas e in-

convenientes, limitaciones potenciales y aspectos de mejora en cada una de ellas. Finalmente, fue desarrollado un análisis objetivo de las mismas con la posibilidad de identificar el momento óptimo de reemplazo de los vehículos. Además, este estudio hizo posible [76]:

- Analizar y estimar el coste de operación de un servicio de autobuses durante el ciclo de vida;
- Determinar el tipo de vehículo más rentable (s);
- Analizar la idoneidad en el momento de reparar o renovar la flota de la empresa.

4.3.2 Desarrollo del Estudio

4.3.2.1 Definición inicial e hipótesis

La metodología adoptada para este estudio fue un modelo adaptado del libro "Life Cycle Costing for Engineers"[25], basada en una hoja de cálculo que permitió analizar y controlar los costes de la flota de transporte de autobuses urbanos, a partir de datos de los costes para los distintos tipos de autobuses durante parte del ciclo de vida completo se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$LCC_{bus} = VPC + TIC + IOC + FC + CMC + PMC + GOC + CIC + TC + IC \quad (4.1)$$

Dónde:

VPC precio de compra del vehículo

TIC coste de neumáticos

IOC coste de revisiones intermedias

FC coste del combustible

CMC coste de mantenimiento correctivo

PMC coste de mantenimiento preventivo

GOC coste de revisiones generales

CIC coste del seguro obligatorio

TC costes de los impuestos

IC costes de la infraestructura

4.3.2.2 Resultados del estudio previo

A continuación, se muestra una serie de hipótesis consideradas para aplicación de la metodología:

- Los autobuses considerados en este estudio han sido expuestos a condiciones de operación similares, tales como: velocidad media, paradas previstas, carga de pasajeros, condiciones climáticas, etc.
- Los autobuses han llevado un mismo programa de mantenimiento, sugerido por el fabricante del vehículo.
- La base de datos de gestión permite una comparación de costes de los vehículos con diferentes motorizaciones (Diésel y GNC) basada no sólo en el precio y el consumo de combustible, sino también en el mantenimiento, en la reparación, y en los costes de fallos en el servicio.
- Para el análisis final de los datos, los costes de los autobuses fueron clasificados en tres tipos:

I) Costes Generales: Precio de compra; infraestructura; formación; seguros, impuestos y tasas;

II) Costes de Operación: costes de combustible y de neumáticos;

III) Costes de Mantenimiento: Los costes de mantenimiento (incluyendo tanto mantenimiento correctivo como preventivo). Se desagregan en dos elementos de costes separados: coste total de mano de obra y coste total del material.

4.3.2.3 Vehículos seleccionados para la Investigación

Para el desarrollo de esta investigación se eligieron dos tecnologías de motorización disponibles en una flota de referencia de transporte urbano: Diésel (con uso de combustible convencional y biodiésel) y Gas Natural Comprimido (GNC).

El combustible Diésel sigue siendo un combustible predominante en el transporte público urbano en Europa, debido a su alta densidad de energía, que significa que necesita un menor volumen de combustible para recorrer el mismo trayecto respecto a otros combustibles. Debido a la preocupación del agotamiento de los recursos de petróleo crudo mundiales, se están explorando combustible alternativos, que pueden tener distintas características de emisiones [15].

El biodiésel, elaborado por lo general a partir de aceite de soja o de colza, aunque se dispone de otros orígenes, es producido a través de un proceso denominado transesterificación, que combina el aceite con un alcohol (metanol) y un catalizador para producir biodiésel [75]. El biodiésel tiene de forma natural una menor cantidad de azufre que el gasoil, lo que también puede reducir las emisiones de partículas.

Las emisiones de gas natural comprimido (GNC) son fundamentalmente metano y óxidos de nitrógeno (NO_x). En comparación con el Diésel, las emisiones de partículas y NO_x del GNC son menores, aunque la cantidad varía según el tipo de tecnología del motor [102]. Por lo general, el GNC tiene un bajo índice de emisión de partículas, aunque el combustible sigue produciendo emisiones nocivas.

Para llevar a cabo este estudio preliminar, se ha considerado sólo una pequeña parte de la flota (subflota), desde una base de datos informatizada que permite gestionar el día a día de una flota de 410 autobuses Diesel y 75 autobuses de GNC (Total 485 autobuses).

Para este análisis, se han utilizado **10 autobuses GNC EEV del año 2006** (tabla 4.5 e figura 4.11) y **10 autobuses Diesel EURO3 del año 2004** (tabla 4.6 y figura 4.12) de la flota de la Empresa Municipal de Transportes de Valencia (EMT-Valencia), teniendo en cuenta las observaciones presentadas anteriormente, se han considerado un período de evaluación de dos años, 2012 y 2013.

Tabla 4.5: Autobus GNC EEV 2006.

Características Técnicas	Valor
Marca	IVECO
Modelo	IRISBÚS City Class GNC
Largo (mts)	12,00
Ancho (mts)	2,55
Alto (mts)	3,370
Altura de piso (mm)	320
Altura al primer escalón (mm)	320
Plazas	90+2PMR*
Potencia del motor CV	240

*PMR - Plazas de Movilidad Reducida

¹⁴Fuente:https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com_content&view=article&id=152&Itemid=151

¹⁵Fuente:[Fuente:https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com_content&view=article&id=152&Itemid=151](https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com_content&view=article&id=152&Itemid=151)



Figura 4.11: Autobus GNC EEV 2006¹⁴.

Tabla 4.6: Autobus Diesel Euro 3 Año 2004.

Características Técnicas	Valor
Marca	IVECO
Modelo	IVECO Diesel Euro 3
Largo (mts)	12,00
Ancho (mts)	2,55
Alto (mts)	3,370
Altura de piso (mm)	320
Altura al primer escalón (mm)	320
Plazas	90+2PMR*
Potencia del motor CV	250

*PMR - Plazas de Movilidad Reducida



Figura 4.12: Autobus Diesel Euro 3 Año 2004¹⁵.

4.3.2.4 Costes del mantenimiento

Los costes del mantenimiento (correctivo y preventivo) se componen de dos elementos separados: el coste de mano de obra total y coste total de materiales.

Para el cálculo de los costes de la mano de obra para esta evaluación se ha considerado un valor promedio recomendado por la propia empresa de €35/hora para todas las actividades de mantenimiento.

4.3.2.5 Costes operacionales (de combustible y neumáticos)

a) Costes del combustible

Los costes de combustible se calcularán mediante el producto de kilometraje anual recorrido, el consumo de combustible calculado (1/100 km), y el precio promedio anual de combustible. Es importante apuntar que los precios obtenidos por la empresa son menores que los precios convencionales en las estaciones de abastecimiento común. Además, el precio se obtiene con un promedio anual. El precio del litro de gasoil considerado en el período, fue de €1,10 en 2012 y €1,11 en 2013, valores obtenidos de la aplicación de gestión que lleva coste total del combustible Diesel presentado en la tabla 4.7. Además, los costes de combustible GNC se promediaron durante el periodo de evaluación teniendo en cuenta no sólo el coste propio de gas (en € por metro cúbico) y además añadiendo el coste de la energía eléctrica requerida para la compresión de gas realizada en las propias instalaciones de la empresa. Los resultados se presentan en la tabla 4.8

Tabla 4.7: Coste del combustible de los 10 autobuses Diesel.

Año	Total kms	Consumo (litros)	Coste Total
2012	458751	255067	€280.573,70
2013	445449	258546	€286.986,06

Tabla 4.8: Coste del combustible de los 10 autobuses GNC.

Año	Total kms	Consumo (m^3)	Coste Com- bustible	Coste de Energía	Coste Total
2012	388801,27	288877,38	€166.228,74	€3.437,56	€169.666,31
2013	423249,99	296090,04	€170.379,12	€3.502,61	€173.881,73

b) Costes de los Neumáticos

Los dos grupos de autobuses fueron sometidos a similares condiciones de trabajo; mismas rutas; mismas condiciones climáticas, etc.; y teniendo en cuenta

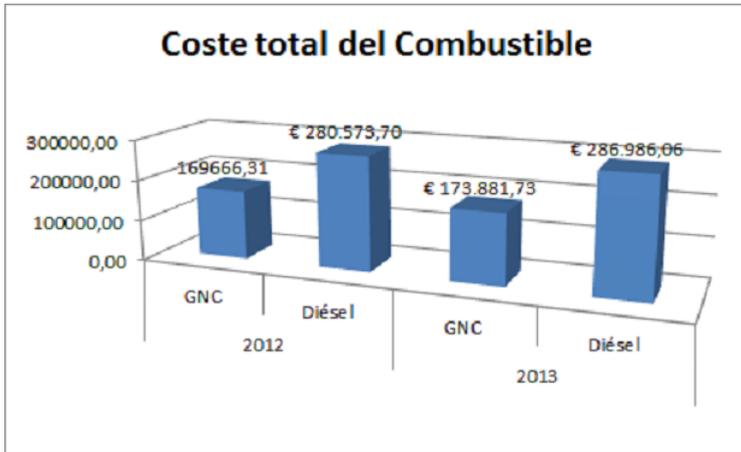


Figura 4.13: Comparación del Coste del Combustible (euros).

que las dimensiones de los neumáticos y la calidad son los mismos; los costes relacionados con los neumáticos fueron considerados iguales y no influirán en el análisis final del LCC.

4.3.2.6 Coste de la Infraestructura

El coste de infraestructura se obtuvo mediante un análisis financiero de la empresa, y este coste se ha dividido por el número total de autobuses que componen la flota, el cual se considera como una constante de operación durante toda la vida útil de la infraestructura. Para la determinación del valor del coste/vehículo, se han adoptado las siguientes hipótesis:

- Siguiendo la literatura [16, 17, 63, 71], se ha supuesto el número de autobuses de la flota como una constante durante la vida útil de las instalaciones.
- Estimando una vida útil de las instalaciones de 30 años y la vida media de los autobuses en 15 años y una sustitución automática de los autobuses cuando cumplan su ciclo de vida útil. Los valores adoptados son basados en estudio ya realizados en otras partes del mundo [63], y en lo histórico de la empresa estudiada.
- El valor inicial de la infraestructura en año 1997 fue de €20.134.675,00.

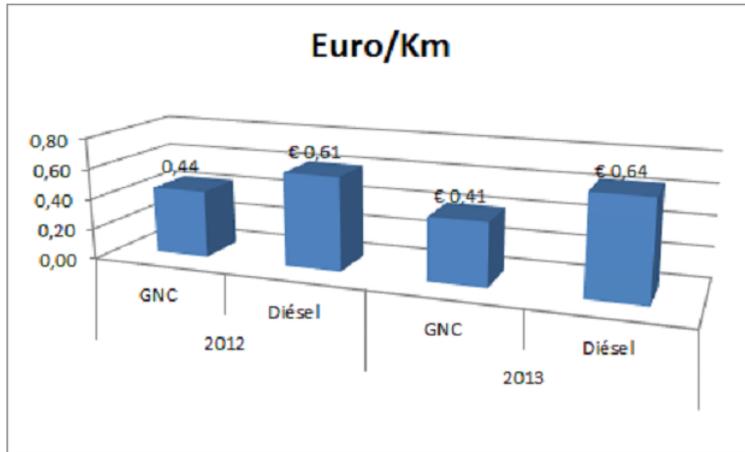


Figura 4.14: Comparación del Coste del Combustible por km (euros/km).

- El valor ha sido actualizado para el año 2012 (sobre la base de 1997) con el indicador español de precios al consumo (IPC) , con índice de 51,1 %, resultando un valor de €30.403.359,25.
- El valor ha sido actualizado para el año 2013(sobre la base de 2002) con el indicador español de precios al consumo (IPC) [57], con índice de 51,4 %, resultando un valor de €31.007.399,50.

Tabla 4.9: Coste de la Infraestructura (euros).

Coste Total In- fraestructura	Infraestructura /1997	Infraestructura /2012	Infraestructura /2013
Coste Total	€20.134.675,00	€30.403.359,25	€31.007.399,50

- Teniendo en cuenta que ha sido realizado obras de infraestructura a posterior de las instalaciones da empresa en el año 1997 para los autobuses GNC, y el uso de gas requiere: inspección específica a cada tres años, servicios adicionales de mantenimiento para los compresores y tuberías, así una mano de obra específica, estimase un coste adicional del 10 % (sobre el valor total de la infraestructura) para cada vehículo GNC, indicado por el sector financiero de la flota en análisis.
- La fórmula utilizada para el cálculo del coste/vehículo fue:

$$\text{Coste/Vehiculo} = \text{Coste Total}/(\text{NTA}*\text{VU})$$

Donde:

Coste Total = Coste Total de la Infraestructura

NTA = Número total de autobuses en la Flota = 485

VU = Vida útil de las instalaciones = 30 años

Tabla 4.10: Coste/vehículo (euros).

Autobús	Coste/vehículo 2012	Coste/vehículo 2013
Autobús Diesel	€2.089,58	€2.131,09
Autobús GNC	€2.298,54	€2.344,20

4.3.3 Análisis de los resultados

A continuación, las tabla 4.11 y tabla 4.12, y figura 4.15, figura 4.16, figura 4.17 y figura 4.18 muestran los datos y resultados derivados:

Tabla 4.11: Datos y resultados.

Elementos del Coste		10 Autobus GNC		10 Autobus Diesel	
		2012	2013	2012	2013
Costes Operacionales	Total Kms	388801	423250	458751	445449
	Consumo	288877m ³	296090m ³	255067 litros	258546 litros
	Coste total del Combust.	€169.666,31	€173.881,73	€280.573,70	€286.986,06
	Euro/Km	€0,44	€0,41	€0,61	€0,64
Costes del Mantenimiento	Total de horas	2511,76	2548,30	1852,70	1983,58
	Coste total de horas	€87.911,60	€89.190,50	€64.844,50	€69.425,30
	Coste del Material	€67.526,12	€60.122,93	€42.704,73	€54.048,28
	Coste total del Manteni.	€155.437,72	€149.313,43	€107.549,23	€123.473,58
	Euro/Km	€0,40	€0,35	€0,23	€0,28
Costes Generales	Infraestructura	€22.985,40	€23.442,00	€20.895,80	€21.310,90
	Tasas	€43.506,93	€43.738,03	€30.536,10	€30.767,20
	Coste total General	€66.492,33	€67.180,03	€51.431,90	€52.078,10
	Euro/Km	€0,17	€0,16	€0,11	€0,12
	Total Euro/km	€1,01	€0,92	€0,96	€1,03
	Coste Total	€391.596,36	€390.375,19	€439.554,83	€462.537,74

La tabla 4.12 resume el coste total de cada grupo principal de los costes considerados para el período considerado.

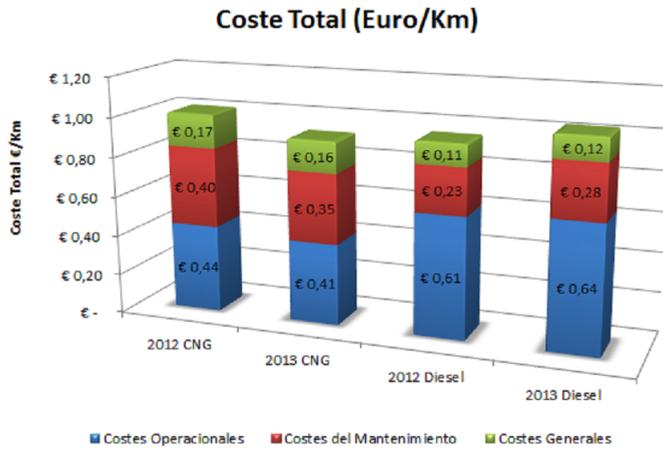


Figura 4.15: Coste Total (euros / km).

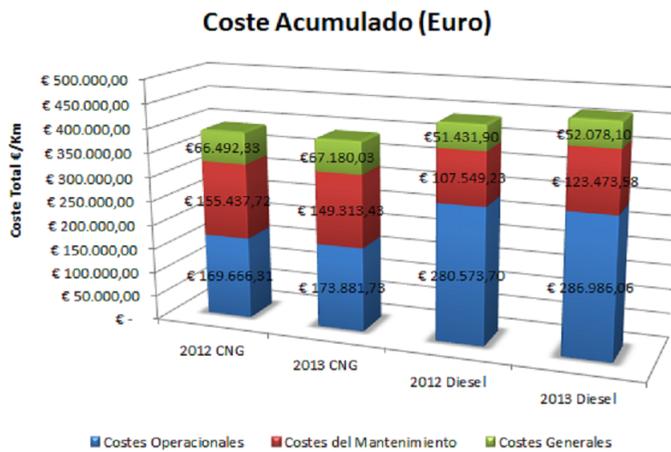


Figura 4.16: Coste Acumulado (Euros).

Tabla 4.12: Coste total 2012-2013.

Costes	Coste Total GNC	Coste Total Diesel
Costes Operacionales	€343.548,04	€567.559,76
Costes del Mantenimiento	€304.751,15	€231.022,81
Costes Generales	€133.672,36	€103.510,00
Coste Total	€781.971,55	€902.092,57



Figura 4.17: Distribución de los costes para autobús GNC (%).

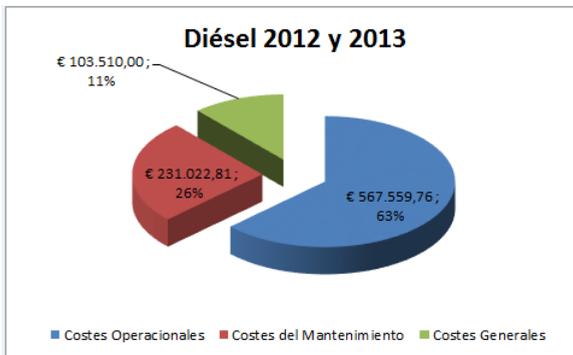


Figura 4.18: Distribución de los costes para autobús Diesel (%).

4.3.4 Conclusiones

Una vez realizado el análisis de los datos, el estudio presentó que:

- En relación con el mantenimiento durante el período considerado, la tecnología GNC presenta unos mayores costes. Además esta diferencia está presente tanto en mano de obra como en material.
- Los costes operativos de estos dos años han sido mayores para el autobús Diésel, y la contribución principal de esta diferencia proviene del coste de combustible. Hay que tener en cuenta que el GNC se encuentra subvencionado.
- Para un mejor análisis y más detallado sería necesario tener acceso a una cantidad mayor de datos en un período largo.
- Es necesario una desagregación de los tipos de mantenimiento (correctivo y/o preventivo y predictivo), para un análisis más detallado.

Por último, se ha visto a lo largo del estudio realizado que el LCC es una herramienta de gestión que puede contribuir de manera efectiva a las tareas de departamento de mantenimiento. Pero, para obtener una previsión más eficiente del período óptimo de reemplazo, es necesaria una mayor cantidad y calidad de los datos. Por ello, es necesario combinar el LCC con un modelo matemático que considere las variables e incertidumbres presentes en los datos operacionales y de mantenimiento de las flotas de transporte. Este estudio permite la generación de algunos de los fundamentos primordiales del modelo combinado LCC+SMC desarrollado en el Capítulo 3.

4.4 Estudio Comparativo entre dos Flotas de Transporte Urbano con uso de la Metodología Combinada entre LCC y SMC

4.4.1 Antecedentes

Esta parte del desarrollo de la tesis tiene como origen diferentes factores. Los resultados obtenidos en el desarrollo del estudio comparativo señalan que es necesario una ampliación del modelo LCC para poder predecir adecuadamente el reemplazo de la flota con los datos disponibles [77, 93, 94].

La revisión de la calidad de los datos reales obtenidos después de un arduo trabajo de negociación entre las partes generó un resultado positivo, por lo que se procedió a la aplicación del nuevo modelo combinado para las flotas B y C.

Basándose en el desarrollo original de este modelo combinado, se propuso realizar el proceso de validación de esta nueva herramienta mediante su aplicación en estas dos flotas para poder explotar el modelo en escenarios diferentes en términos de costes y entornos de trabajo.

4.4.2 *Desarrollo del Estudio*

Una gestión eficiente de los activos físicos y los autobuses de transporte urbano en particular, tiene como objetivo principal la optimización de su coste del ciclo de vida, siendo la optimización de sus costes de operación y mantenimiento y la determinación del momento preciso de su retirada o su renovación, elementos esenciales para la optimización de las inversiones de capital [90]. Estos aspectos están relacionados con la determinación de la dimensión de la flota, con el objetivo de maximizar su disponibilidad y la minimización de la inversión. Esto puede ser a través de varios algoritmos que llevan en consideración principalmente aspectos como los costes de mantenimiento, los costes de explotación, el valor de reventa, la inflación, entre otros. Esto se alcanza a través de políticas de mantenimiento adecuadas, siendo estos mantenimientos programados y / o preventivos y teniendo en cuenta el mantenimiento correctivo, para lo cual, conocer la tasa de fallo de los activos junto con el coste de penalización que supone éste, es fundamental. Este tipo de decisiones son determinantes para maximizar el LCC y, por consiguiente, la dimensión de la flota. Es a través de esta perspectiva que la identificación del momento de sustitución o renovación total de un activo puede ser elemento estratégico en la competitividad de las organizaciones como consecuencia de la reducción de los costes que pueden provenir de allí.

En este estudio, la validación de la metodología implementada, que es un modelo combinado de apoyo a la gestión de activos, basado en la asociación entre la herramienta *Life Cycle Cost* y el modelo matemático de Simulación de Monte Carlo, mediante la realización de un análisis estocástico, considerando tanto la edad, kilometraje promedio anual para la sustitución óptima de un vehículo, se llevó a cabo utilizando datos reales para el análisis comparativo de los costes de operación y mantenimiento entre dos flotas de transporte urbano en dos países: España y Brasil. Para un mejor entendimiento, el momento de reemplazo óptimo se determinó en primer lugar mediante el uso de la metodología convencional de Análisis de Ciclo de Vida (LCC). Posteriormente, se realizó un análisis utilizando el método combinado con la Simulación de Monte Carlo.

4.4.3 Introducción a la Metodología

En la primera etapa del trabajo se recogieron los datos de las flotas española y brasileña, para definir la extensión de las informaciones y los límites de los análisis. La curva de los costes de mantenimiento y operación se definió en función de la edad de los vehículos y del kilometraje recorrido por los mismo.

Posteriormente, con la base de datos analizada, se desarrolló el modelo matemático representativo del flujo de caja de un activo, según lo considerado por el LCC. De este modelo matemático, se creó el problema de optimización propuesto, en el cual se buscó encontrar el punto de mínimo valor del coste promedio anual, el cual coincide con el punto óptimo de sustitución de un activo, bajo el aspecto económico. Para ello, se desarrolló la función del coste de operación y mantenimiento de un vehículo en función de su edad y de su utilización (kilometraje promedio anual). En esta misma fase, también se determinó que modelo de depreciación del activo debería ser considerado para este trabajo.

Con el modelo matemático definido, el proceso se realizó en dos etapas. Inicialmente, se realizó un análisis del punto óptimo de cambio para un autobús a través de la herramienta LCC. A continuación, fue agregado al modelo matemático, el concepto de variables aleatorias, para que el mismo, pudiera ser resuelto a través del abordaje estocástico con la Simulación de Monte Carlo, posibilitando el análisis del impacto de la variabilidad en el resultado final. La Simulación de Monte Carlo se realizó para 10.000 escenarios diferentes. El número de escenarios definidos se mostró adecuado, ya que no se encontraron diferencias significativas en análisis comparativos con muestras mayores. Por otro lado, simulaciones con muestras de tamaño inferior no son recomendadas, ya que pueden acercarse a la totalidad de combinaciones posibles de las variables aleatorias. Después del análisis de los modelos de LCC tradicional y LCC con Simulación de Monte Carlo, se desarrolló un estudio comparativo entre los resultados de los dos modelos. Es importante apuntar que esta secuencia fue realizada em separado para las dos flotas. La metodología está representada en el figura 4.19.

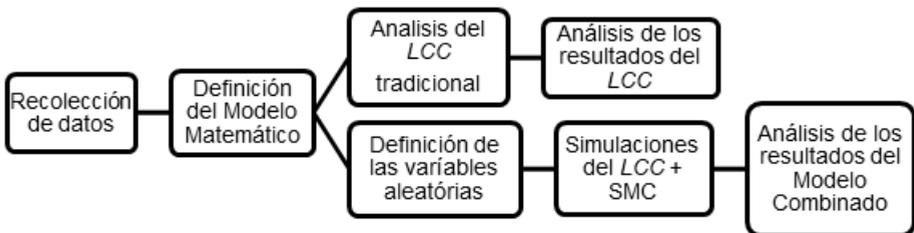


Figura 4.19: Flujograma de la Secuencia de la Metodología.

4.4.4 Generación de la función de costes de mantenimiento y explotación

Para la flota española, en la que los datos eran más abundantes en términos de años, se aplicó una función cuadrática (Ecuación 4.2). Sin embargo, como la flota brasileña carece de la misma cantidad de datos, se empleó una función exponencial para tener una función representativa (Ecuación 4.4). Con el fin de analizar las variaciones de los parámetros que el enfoque determinista no puede evaluar, la simulación de Monte Carlo se empleará.

I) Flota española de transporte urbano

$$f(x, y) = a^*x^2 + b^*y^2 + c^*x^*y + d^*x + e^*y + f \quad (4.2)$$

Dónde:

$$a, b, c, d, e, f \in \mathbb{R}$$

De acuerdo con esto, las constantes de la función cuadrática serán consideradas como variables aleatorias uniformes con una “p” variación del campo de datos:

$$X_i \in [(1 - p)x_i; (1 + p)x_i] \quad (4.3)$$

Dónde:

X_i : Conjunto de resultados posibles para una variable aleatoria x_i .

Dónde: $x_1 = a$; $x_2 = b$; $x_3 = c$; $x_4 = d$; $x_5 = e$; $x_6 = f$ y $p \in [0; 1]$.

II) Flota brasileña de transporte urbano

$$f(x, y) = axe^{(by)} \quad (4.4)$$

Dónde:

$$a, b \in \mathbb{R}$$

Las constantes de la función exponencial serán consideradas como variables aleatorias uniformes con “p” variación del campo de datos:

$$X_i \in [(1 - p)x_i; (1 + p)x_i] \quad (4.5)$$

Dónde:

X_i : Conjunto de resultados posibles para una variable aleatoria x_i .

Dónde: $x_1 = a$; $x_2 = b$ y $p \in [0; 1]$.

A continuación, con las ecuaciones definidas, se empleará la metodología combinada LCC+SMC, conforme presentado en subsección 3.8.1 de esta tesis.

4.4.5 Generación de base de datos

4.4.5.1 Flota española de transporte urbano

Una muestra de 34 vehículos fue seleccionada y nombrada como vehículos de “**Tipo A**” (tabla 4.13 y figura 4.20).

Tabla 4.13: Autobus Tipo A.

Características Técnicas	Valor
Marca	Mercedes
Modelo	O-530 CITARO Euro 3
Largo (mts)	12,00
Ancho (mts)	2,50
Alto (mts)	3,07
Altura de piso (mm)	320
Altura al primer escalón (mm)	320
Plazas	105+2PMR*
Potencia del motor CV	279

*PMR - Plazas de Movilidad Reducida



Figura 4.20: Autobus Tipo A¹⁶.

¹⁶Fuente:Fuente:<https://www.revistaviajeros.com/noticia/2235/34-nuevos-autobuses-mercedes-benz-para-subus>

Los autobuses pertenecientes a esta muestra tienen las mismas características técnicas, configuraciones mecánicas, combustible y están expuestos a condiciones de operación similares, tales como velocidad media, paradas por kilometraje, carga de pasajeros, condiciones climáticas y el mayor kilometraje durante la vida útil. El período de análisis considerado fue de 10 años (2005-2014), y todos los costes se convirtieron y actualizaron utilizando los indicadores económicos españoles. Los resultados obtenidos se extrapolaron a toda la vida útil de los vehículos. Se aplicaron las siguientes restricciones y se consideraron:

1. El consumo promedio de combustible se consideró como una constante a lo largo de la vida útil del vehículo.
2. A la hora de determinar los costes de operación, se tuvieron en cuenta los costes de combustible, seguro y tributarios.
3. Valor de reventa (**VR**) se calculó mediante un modelo lineal utilizado por la empresa y basado en su propia experiencia, que se obtiene mediante la Ecuación 4.6:

$$VR = R + \left[\frac{Vc - R}{N} 0,7778Rv \right] \quad (4.6)$$

Dónde:

0,7778: Factor dependiente de las condiciones de servicio.

Rv: Vida del vehículo restante.

R - Valor Residual: En la contabilidad, el valor residual es otro nombre para el valor de salvamento, el valor remanente de un activo después de ser totalmente depreciado. La fórmula para calcular el valor residual para este estudio de caso se estableció en el 10 % del coste de compra.

Vc - Coste de adquisición: el coste de inversión considerado para adquirir un vehículo nuevo, similar al tipo A. Para simplificar, la inversión se consideró pagada en su totalidad en el momento de la compra. Valor: **€240.000,00**.

N - Estimación de la vida útil: La edad estimada indicada por la empresa y adoptada para este estudio fue de **14 años**, que es similar a las utilizadas por otras empresas españolas. Obsérvese que este parámetro está por encima del valor medio en otros países como los Estados Unidos, donde la duración de los vehículos considerados es de 12 años [70]. Probablemente, la crisis económica muy importante sufrida por España en este período puede ser la justificación de este aumento en la vida útil estimada.

El promedio anual de kilometraje fue constante y se determinó a través de todos los autobuses de selección de muestras. La figura 4.21 presenta los análisis del kilometraje:

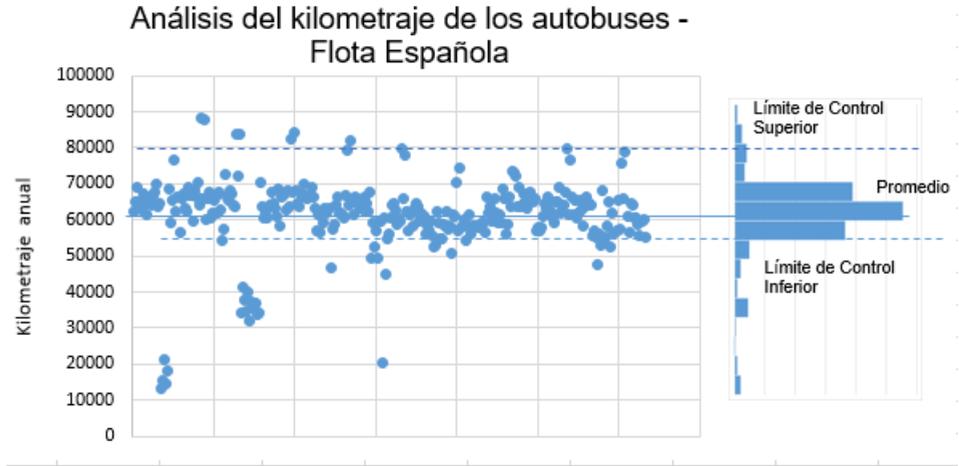


Figura 4.21: Análisis del kilometraje – Flota Española.

En función de este análisis, el kilometraje promedio anual se tomó como 61.597 km / año, como el valor para el LCC, y para el modelo combinado (LCC + SMC), el método se desarrolló considerando una limitación en el kilometraje anual entre 55.000 km y 80.000 km para la flota española (Escenario1).

4.4.5.2 Flota brasileña de transporte urbano

Una muestra de 33 vehículos fue seleccionada y nombrada como vehículos de “**Tipo B**” (tabla 4.14 y figura 4.22).

Los autobuses pertenecientes a la muestra tienen las mismas características técnicas, configuraciones mecánicas, combustible y están expuestos a condiciones de operación similares como velocidad media, paradas por kilometraje, carga de pasajeros, condiciones climáticas y el mayor kilometraje durante la vida útil. El período de análisis considerado fue de 5 años (2011-2015). Los resultados obtenidos se extrapolaron a toda la vida útil de los vehículos. Se aplicaron las siguientes restricciones y se consideraron:

1. El consumo promedio de combustible se consideró como una constante a lo largo de la vida útil del vehículo.

¹⁷Fuente:Fuente:<https://onibusbrasil.com/empresa/auto-viacao-redentor/HL300/>

Tabla 4.14: Autobus Tipo B.

Características Técnicas	Valor
Marca	VOLVO
Modelo	BR 7 290
Largo (mts)	12.00
Ancho (mts)	2.60
Alto (mts)	3.560
Altura de piso (mm)	320
Altura al primer escalón (mm)	320
Plazas	92
Potencia del motor CV	290

*PMR - Plazas de Movilidad Reducida



Figura 4.22: Autobus Tipo B¹⁷.

2. Para determinar los costes operativos, sólo se tuvo en cuenta el coste del combustible, tal como la empresa había decidido previamente..
3. Valor de reventa (VR), tomó de la misma forma que en la fórmula de la flota española, y:

(Vc) Coste de compra: Valor €103.926,10.

(N) - Estimación de la vida útil: La edad estimada indicada por la empresa y adoptada para este estudio fue de **12 años**, que se establece por la legislación local.

El promedio anual de kilometraje fue constante y se determinó a través de todos los autobuses seleccionados por muestra. La figura 4.23 presenta este análisis.

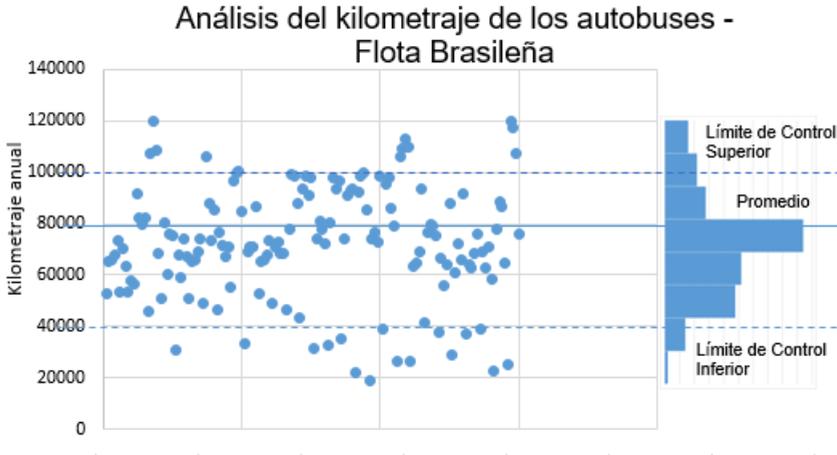


Figura 4.23: Análisis del kilometraje – Flota Brasileña.

En función de este análisis, el kilometraje promedio anual se tomó como 80.620km/ año, como el valor para el LCC, y para el modelo combinado (LCC + SMC), el método se desarrolló considerando una limitación en el kilometraje anual entre 40.000 km y 100.000 km para la flota brasileña (Escenario2).

4.4.6 Resultados

4.4.6.1 Análisis del coste del ciclo de vida (LCC)

Para este estudio de caso, hay que tener en cuenta algunos aspectos:

- Los costes de mantenimiento fueron seleccionados y ajustados en base a la Técnica de Matemáticas de Extrapolación, con el fin de obtener un conjunto de observaciones y ampliar este patrón en el futuro.
- El Coste Total Acumulado (TAC) hasta un determinado año fue el resultado del coste total de inversión más los costes de mantenimiento y operación. Todos los costes se acumularon hasta ese año menos el valor de reventa del mismo año.

- El Coste Anual Promedio (AAC) indica el coste acumulado hasta la vida útil del vehículo, dividido por su vida útil, de manera que el coste medio anual mínimo determina el tiempo óptimo para la renovación del vehículo, que presenta el menor coste posible para la operación del vehículo Ecuación 4.7.

$$AAC = \frac{\sum \text{Inversión} + \sum \text{Manteni.} + \sum \text{Operación} - \text{Valor de reventa}}{n(\text{year})} \quad (4.7)$$

\sum Inversión - Acumulado de sus costes de inversión;

\sum Manteni. - Acumulado de sus costes de mantenimiento;

\sum Operación - Acumulado de sus costes de operación;

Valor de reventa - un eventual valor de reventa.

4.4.6.2 Resultados del método LCC

El desarrollo y análisis de costes para las flotas españolas y brasileñas se muestran en la tabla 4.15 y la tabla 4.16, respectivamente.

Tabla 4.15: Flota Española.

Año(n)	\sum Inversión	\sum Manteni.	\sum Operación	Valor de Reventa	TAC	AAC	AAC/km
1	€240.000,00	€8.581,30	€30.143,09	€180.656,22	€98.068,16	€98.938,36	€1,61
2	€240.000,00	€17.913,63	€62.778,49	€168.612,43	€152.079,69	€76.475,59	€1,24
3	€240.000,00	€28.062,72	€96.514,27	€156.568,64	€208.008,36	€69.627,09	€1,13
4	€240.000,00	€39.100,07	€129.365,81	€144.524,84	€263.941,04	€66.203,87	€1,07
5	€240.000,00	€51.103,41	€166.922,78	€132.481,05	€325.545,15	€65.284,25	€1,06
6	€240.000,00	€64.157,28	€196.474,96	€120.437,25	€380.194,99	€63.512,15	€1,03
7	€240.000,00	€78.353,63	€229.795,11	€108.393,46	€439.755,29	€62.947,89	€1,02
8	€240.000,00	€93.792,45	€267.635,53	€96.349,66	€505.078,32	€63.245,05	€1,03
9	€240.000,00	€110.582,47	€307.604,76	€84.305,87	€573.881,36	€63.862,86	€1,04
10	€240.000,00	€128.841,96	€346.550,49	€72.262,08	€643.130,38	€64.401,73	€1,05
11	€240.000,00	€148.699,52	€384.039,34	€60.218,28	€712.520,58	€64.855,48	€1,05
12	€240.000,00	€170.295,02	€423.066,24	€48.174,49	€785.186,77	€65.506,63	€1,06
13	€240.000,00	€193.780,56	€462.093,14	€36.130,69	€859.743,00	€66.203,00	€1,07
14	€240.000,00	€219.321,56	€501.120,04	€24.086,90	€936.354,70	€66.946,73	€1,09

En resumen, los resultados indican que el coste medio anual por kilómetro (AAC/km) mínimo se demuestra para la flota española en el 7º año (1,02 €/km), y para la flota brasileña en el quinto año (0,393 €/km).

Tabla 4.16: Flota Brasileña.

Año(n)	∑ Inversión	∑ Manteni.	∑ Operación	Valor de Reventa	TAC	AAC	AAC/km
1	€103.926,10	€2.572,82	€17.106,53	€77.080,43	€46.525,02	€46.525,02	€0,575
2	€103.926,10	€5.688,04	€33.525,86	€71.017,90	€72.122,10	€36.061,05	€0,446
3	€103.926,10	€9.460,03	€50.845,89	€64.955,37	€99.276,64	€33.092,21	€0,409
4	€103.926,10	€14.027,23	€69.013,23	€58.892,84	€128.073,72	€32.018,43	€0,396
5	€103.926,10	€19.557,31	€88.432,13	€52.830,31	€159.085,23	€31.817,05	€0,393
6	€103.926,10	€26.253,25	€108.447,57	€46.767,78	€191.859,14	€31.976,52	€0,395
7	€103.926,10	€34.360,85	€128.463,01	€40.705,25	€226.044,70	€32.292,10	€0,399
8	€103.926,10	€44.177,71	€148.478,45	€34.642,73	€261.939,53	€32.742,44	€0,405
9	€103.926,10	€56.064,19	€168.493,89	€28.580,20	€299.903,98	€33.322,66	€0,412
10	€103.926,10	€70.456,61	€188.509,33	€22.517,67	€340.374,37	€34.037,44	€0,421
11	€103.926,10	€87.883,28	€208.524,77	€16.455,14	€383.879,00	€34.898,09	€0,431
12	€103.926,10	€108.983,88	€228.540,20	€10.392,61	€431.057,57	€35.921,46	€0,444

4.4.6.3 Simulación del Monte Carlo

El método se desarrolló considerando una limitación en el kilometraje anual entre 55.000 km y 80.000 km para la flota española (Escenario1), y entre 60.000 km y 100.000 km para la flota brasileña (Escenario 2). Esta técnica proporciona una base matemática confiable para soluciones derivadas de escenarios individuales y puede aplicarse a problemas lineales para mejorar el análisis de escenarios puros. Los datos utilizados para el desarrollo de la metodología de Monte Carlo se procesaron mediante el uso de software MATLAB®.

4.4.6.4 Resultados del Modelo Combinado LCC + SMC

I) Edad indicada

Las edades indicadas para la flota de reemplazo que provenían de esta metodología se representan gráficamente en un histograma figura 4.24.

El análisis de los histogramas para ambos escenarios nos muestra cuál de ellos es la mejor opción para la decisión de sustitución, teniendo en cuenta las restricciones previamente definidas. Para la flota española, el 8° año es claramente la opción más conveniente. Para la flota brasileña, el año 3,98 es el valor más alto, aunque por razones prácticas el 4to año es una aproximación exacta.

II) Kilometraje indicado

Los kilómetros indicados para la flota de reemplazo se obtuvieron usando este método y se representan gráficamente como se muestra en el histograma figura 4.25.

El análisis del escenario 1 del histograma, que presenta el mejor kilometraje a utilizar por el vehículo, muestra que los valores en km están sesgados hacia el

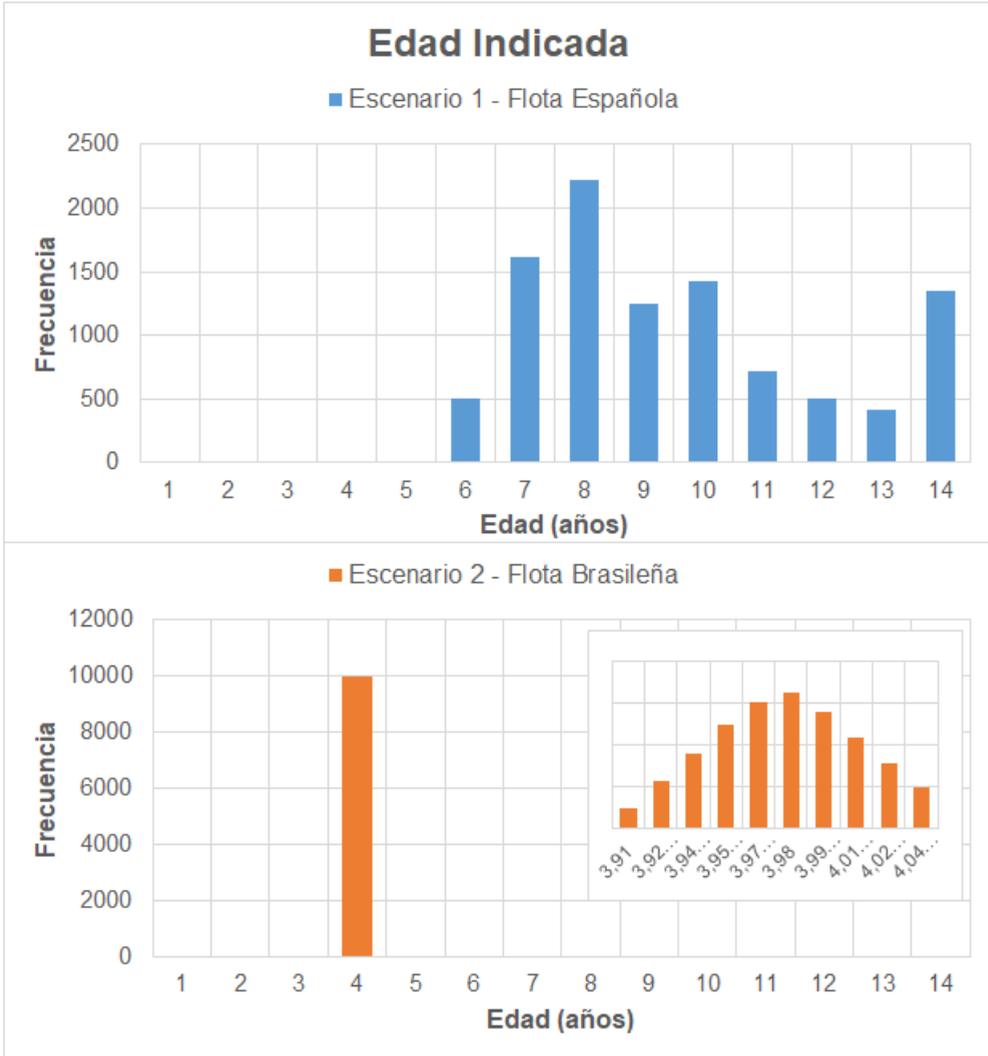


Figura 4.24: Años de Edad.

valor máximo establecido de 80.000km (condición de restricción de la simulación) y la misma tendencia ocurre en el segundo escenario, que obtiene 100.000Km para el kilometraje anual ideal. Esto indica que las condiciones de restricción no representan los puntos reales de coste mínimo de un escenario sin restricciones.

III) Análisis general de costes

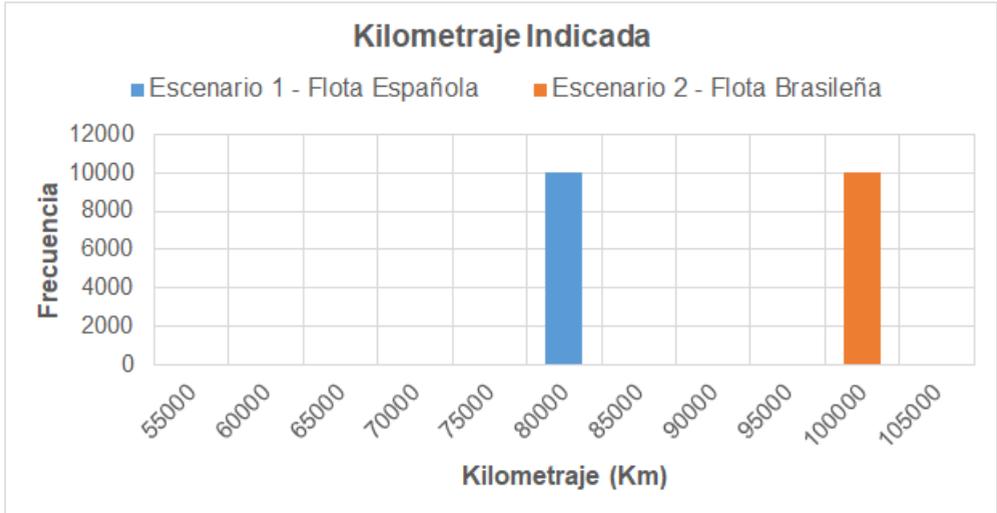


Figura 4.25: Kilometraje indicado.

Este análisis muestra qué parámetros serían los mejores para el uso del vehículo de la flota durante su vida útil para optimizar sus costes. Para este análisis, algunos parámetros están correlacionados: kilometraje Anual, Edad del Vehículo y Coste Anual Promedio (AAC). La figura 4.26 muestra una representación de las diez mil posibilidades obtenidas en el escenario 1 (flota española). Además, la figura 4.27 muestra el análisis similar para el escenario 2 (flota brasileña). Para ambas figuras, la edad de reposición está representada en el eje de las abscisas, mientras que el kilometraje medio anual está representado en el eje de las ordenadas y se representa el coste medio anual (AAC) calculado por la función mencionada en la Ecuación 3.13.

Por clasificación de color del punto de intersección, que van desde el azul oscuro para reducir los costes hasta el amarillo para los costes más altos. Además, la figura 4.26 y la figura 4.27 indican el mejor ajuste entre la edad y el kilometraje, que minimizar el valor de la AAC.

El resultado principal del modelo arroja una serie de informaciones de alto interés para el análisis del tiempo de reemplazo óptimo. El punto óptimo, señalado con una X, es la combinación ideal de edad y kilometraje anual para la optimización de los costes de explotación, dentro de los rangos de control de ambas variables definidos previamente. Por ello, el punto óptimo que se encuentre en los límites de estos rangos. Esto demuestra la subutilización de las flotas en la actualidad.

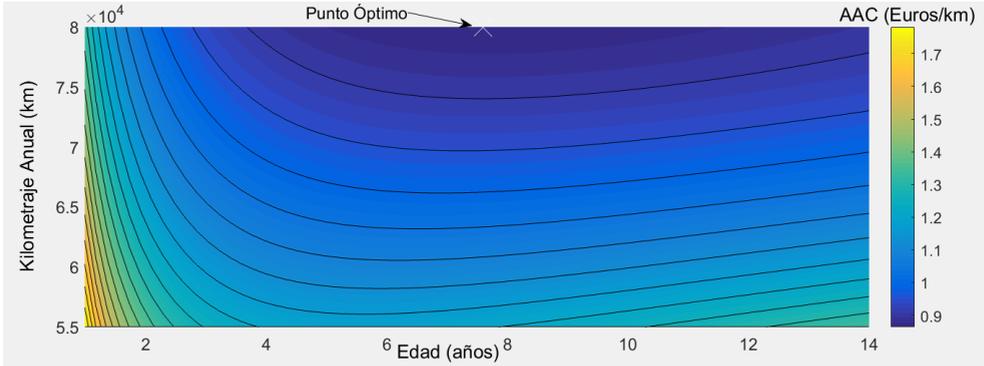


Figura 4.26: Muestra de la flota española.

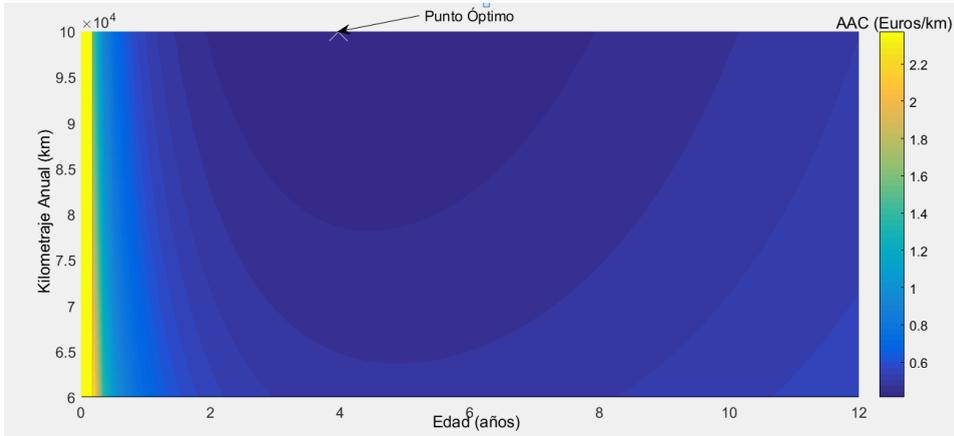


Figura 4.27: Muestra de la flota brasileña.

Es importante señalar el aumento local de los costes en el primer año de vida. Esto es debido al coste de inversión y a la baja edad del vehículo, que combinados aumentan de manera sustancial el factor de compra en el cálculo del coste por kilómetro.

Otra información importante es el estudio de los costes AAC para un kilometraje determinado durante la edad útil del vehículo. En el caso de que el kilometraje anual se encuentre lejos del óptimo propuesto, la gráfica contiene información sobre la evolución del coste y la ventana de reemplazo adecuada para estas condiciones.

A pesar de la capacidad de indicar el punto óptimo, este análisis también demuestra otras combinaciones a lo largo de su vida útil, y podría apoyar efectivamente a los gestores de flotas para desarrollar sus estrategias y actividades, especialmente cuando los gestores de flotas necesitan acceder a la compensación entre costes y beneficios relacionados con diferentes parámetros.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se van a presentar las conclusiones finales del trabajo descrito durante esta tesis. Las conclusiones generales se han organizado siguiendo la secuencia de los objetivos presentados en el capítulo 1. Del mismo modo, los resultados y análisis obtenidos de los en capítulo IV. A continuación, los trabajos futuros se presentan a través de la revisión de la literatura y la experiencia adquirida durante el desarrollo de la tesis. El modelo propuesto fue validado a través de un ejemplo con datos reales que identifica el momento de la toma de decisiones.

5.1 Conclusiones

Primeramente, es importante mencionar que los estudios de optimización de reemplazo son altamente dependientes de la disponibilidad, fiabilidad y precisión de los datos reales que se manejen. Así, en el primer contacto con las empresas, emergieron las primeras dificultades y limitaciones para obtener un histórico de los datos de costes de mantenimiento al largo de la vida de los vehículos, que fuese completo y significativo, debido a una política interna de las mismas las cuales se mostraron muy reticentes en hacer públicos los datos requeridos. No obstante,

finalmente, se llegó a un acuerdo para el acceso a los datos de mantenimiento y explotación para los vehículos de las flotas.

Los primeros datos analizados fueron de una flota española durante un período de 2 años, así este primer estudio se llevó a cabo desde dos perspectivas: en primer lugar, para analizar y comparar los costes de operación y mantenimiento (O&M) de vehículos de las mismas características de diseño (modelo, año, la capacidad de pasajeros, etc.), para los mismos tipos de servicio, pero con dos tipos de motorización diferentes: vehículos Diésel y a Gas Natural Comprimido (GNC); y, en segundo lugar, a partir de los datos obtenidos, se construyó un modelo analítico del ciclo de vida para la definición de un momento óptimo para reemplazar el vehículo. Teniendo en cuenta que hay varios estudios comparativos entre los distintos tipos de motor, con énfasis en los aspectos medioambientales de forma aislada, este estudio con datos de mantenimiento preventivo y correctivo, revela la grand importancia para el sector de una óptima gestión del mantenimiento de estos vehículos. Los resultados obtenidos mostraron los mayores costes de mantenimiento para los autobuses de GNC en relación con los autobuses Diésel, pero siendo los costes de operación mayores para los Diésel, y la contribución principal de esta diferencia proviene del coste de combustible. Además, este trabajo inicial fue la base de desarrollo de dos artículos presentados en Congresos científicos de Mantenimiento en Europa y en Brasil.

A continuación se realizaron diversas visitas técnicas adicionales a flotas españolas y brasileñas, con el objetivo de obtener datos reales para el desarrollo de otros estudios, siendo elegido una en cada país que, de común acuerdo, se mantuvieran en el anonimato para el trabajo.

Con el acceso a los datos reales de operación y mantenimiento (con las limitaciones existentes) de las dos flotas española y brasileña, fue desarrollado e implementado la metodología combinada entre la herramienta gerencial *Life Cycle Cost* (LCC) y el modelo de Simulación de Monte Carlo, para hacer estudios comparativos con diferentes condiciones de trabajo, entorno laboral, condiciones climáticas, diferente tipo de servicio, etc.; con el reto de evaluar las similitudes y las discrepancias. Esta metodología combinada tubo como uno de sus principales objetivos el perfeccionamiento del proceso de toma de decisión en la planificación de sustitución de flota de empresa de transporte urbano. Como primera etapa, se analizaron los datos económicos y técnicos, con el uso del método tradicional determinista basado en LCC y luego con el modelo matemático estocástico combinado de LCC y SMC. Se utilizó la SMC en el tratamiento de las variables, ya que, la simple adopción del método determinístico no se muestra eficiente, debido a la gran amplitud del análisis realizado. El análisis de los costes es una activi-

dad gerencial compleja, que requiere disciplina, determinación y precisión, pero proporciona informaciones seguras y esenciales para la gestión de las empresas.

El estudio demostró que la inclusión de las variables aleatorias en el proceso de determinación de la edad óptima de cambio, junto con la mejor tasa de utilización de los vehículos, en función del kilometraje medio, aporta ventajas al proceso de sustitución, al permitir una perspectiva más confiable a los futuros escenarios, mediante el análisis probabilístico, dependiente de las variables económicas y técnicas. Además, el conocimiento detallado de la estructura de costes es un factor determinante e imprescindible para averiguar el uso optimizado de la flota. Los aspectos económicos y técnicos fueron definidos, en concordancia con la empresa estudiada como, los costes asociados a la adquisición, depreciación, mantenimiento y operación de los vehículos.

Para este estudio de caso, el coste por kilómetro es mucho menor en la flota brasileña debido al menor precio de compra, menor coste con mano de obra de la flota, combustible, así como menores costes directos de mantenimiento, si se compara con los costes en España. Además, es importante considerar el tipo de cambio devaluado Real / Euro ($\text{€}1,00 = \text{R\$ } 4,33$), y la inferioridad en términos de tecnología disponible y equipamiento de la flota brasileña en comparación con el español.

En cuanto al reemplazo, ocurrió más temprano en la flota brasileña, básicamente debido a las difíciles condiciones ambientales y al tráfico que la flota está sujeta. Por lo tanto, estas características y un mayor nivel de uso sobrecargan la flota.

El estudio presentado permite la evaluación del ciclo de vida del vehículo por los gestores y es una herramienta de apoyo a la decisión de sustitución de la flota. La decisión final de sustitución debe tener en cuenta no sólo criterios económicos, sino también una variedad de factores distintos de los anteriormente estudiados, como el tamaño de la flota, el kilometraje real, el número de trabajadores y pasajeros, la calidad del servicio, las políticas gubernamentales de transporte, presupuesto anual, y probablemente los estratégicos y administrativos de las empresas, y también el valor del reemplazo y los costes que supondrá éste (que también variarán con el tiempo).

En realidad se trata de comparar y elegir el caso más favorable, no sólo tomar la decisión en el mínimo de la curva de costes.

5.2 Trabajos futuros

Los gestores de las empresas de transporte urbano en todo el mundo están cada vez más presionados a sustituir los autobuses convencionales de transporte urbano, los que utilizan los derivados del petróleo como combustible, por modelos eléctricos y híbridos de forma cada vez más rápida. Estudios ya realizados en Estados Unidos indican que los autobuses híbridos tienen emisiones de dióxido de carbono moderadamente más bajas durante la vida útil que los autobuses Diésel, mientras que los autobuses totalmente eléctricos tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono, hasta un 75%. Pero, en la decisión final de cambiar de tecnología, habrá que tener en cuenta otros factores de costes aparte de los medioambientales. El análisis del coste del ciclo de vida indica que los autobuses híbridos Diésel ya son competitivos con los autobuses Diésel y de Gas Natural Comprimido. Los altos costes de las celdas de combustible y los sistemas de baterías son los principales retos para los autobuses híbridos de celdas de combustible, con el fin de reducir los costes del ciclo de vida a niveles más competitivos.

Es puntualmente en este escenario que el modelo presentado en la tesis podrá ser utilizado de forma intensa tanto en España como en Brasil, desde que se tengan datos en cantidad y confiabilidad suficiente, auxiliando a las tomas de decisiones.

Apéndice: Artículos científicos relevantes

Artículo A: Time Replacement Optimization Model: Comparative Analysis of Urban Transport Fleets Using Monte Carlo.

Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability

DOI: 10.17531/ein.2017.2.1

Authors: Vicente Macian, Bernardo Tormos, Jorge Riechi

Abstract: This paper presents a comparative analysis of operation and maintenance costs of the transport fleets in two countries: Spain and Brazil. For this analysis, the research proposed an optimization model which is a combination of the traditional Life Cycle Cost Analysis methodology (LCC) and simulation model Monte Carlo. The results indicated the successful of model and show the lower cost in the Brazilian fleet. The evidences may be useful for other practices and researches.

Artículo B: Urban Fleet Cost Optimization Using a Life Cycle Cost and Monte Carlo Simulation Hybrid Model

Revista Produção Online

DOI: 10.14488/1676-1901.v17i2.2627

Authors: Bernardo Tormos, Jorge Riechi, Marcos Hillebrand

Abstract: The optimization of the annual average cost for a bus fleet had become an important issue for the managers of transport companies worldwide. Currently, there are several available tools to support managerial decision making. One of the most used techniques to analyze is the deterministic method named “Life Cycle Cost” which allows the user to assess the replacement moment. However, this method is limited because it does not consider all the possible intrinsic variations in the equipment or the possible modifications in the utilization level. This paper objective is to develop a tool to support asset’s management through the combination of the Life Cycle Cost and the Monte Carlo Simulation approaches, which forms a stochastic analytical model that considers age, annual mileage for the optimal replacement fleet. For this paper’s development, data obtained from a Brazilian company were employed. The results show that the use of this combined tool is more efficient than the deterministic model.

Artículo C: Optimal Fleet Replacement: A Case Study on a Spanish Urban Transport Fleet.

Journal of the Operational Research Society

DOI: 10.1057/s41274-017-0236-1

Authors: J. Riechi, V. Mácian, B. Tormos, C. Ávila

Abstract: Optimizing the average annual cost of a bus fleet has become an increasing concern in transport companies management around the world. Nowadays, there are many tools available to assist managerial decisions, and one of the most used is the cost analysis of the life cycle of an asset, known as “life cycle cost”. Characterized by performing deterministic analysis of the situation, it allows the administration to evaluate the process of fleet replacement but is limited by not contemplating certain intrinsic variations related to vehicles and for disregarding variables related to exigencies of fleet use. The main purpose of this study is to develop a combined model of support to asset management based in the association of the life cycle cost tool and the mathematical model of Monte Carlo simulation, by performing a stochastic analysis considering both age and average annual mileage for optimum vehicle replacement. The utilized method was applied in a Spanish urban transport fleet, and the results indicate that the use of the stochastic model was more effective than the use of the deterministic model.

Ponencia en Congreso: Urban bus fleet Maintenance costs: comparative analysis between Diesel and CNG fuelled vehicles

EUROMAINTENACE 2014 - Helsinki, Finlandia – 05 - 07 May 2014

ISBN 978-952-67981-4-1

Authors: Vicente Macian, Bernardo Tormos, Santiago Ruiz, Jorge Riechi

Abstract: The purpose of this paper is to compare and analyse maintenance and operation costs between two technologies of urban buses: Diesel and Compressed Natural Gas (CNG) fuelled vehicles, with the same or nearly identical characteristics and exposed to similar operating conditions such as service speed, stops per kilometre, and passenger loading and sustained under the same maintenance program. Data from a real fleet were analysed from the management tool Life Cycle Cost. Results obtained show that maintenance costs have been higher for CNG vehicles but operating cost have been lower regarding the period considered that it has been two years. This analysis can help maintenance managers obtain an accurate evaluation of the trade-off between costs and benefits related to alternative vehicle technologies.

Ponencia en Congreso: Optimisation Approach for Fleet Replacement Under Uncertainty

EUROMAINTENANCE 2016

Atenas,Grecia - 30 May - 01 June 2016

Authors: Vicente Macian, Bernardo Tormos, Claudio Ávila, Jorge Riechi

Abstract: The usual models to manage the fleet replacement in function of the operation and maintenance costs (O&M) are deterministic. The conventional life cycle cost (LCC) analysis does not involve a quantitative uncertainty analysis and can be easily assumed the random nature of parameters used for any economic analysis. On this work, the authors have proposed a combination between a classical LCC method approach and the Monte Carlo technique in order to quantify and update the uncertainty of the results. A case study for an optimum fleet replacement period was developed using real data of a Spanish urban transport fleet.

Bibliografía

- [1] Angelina Lázaro Alquézar y Ramón Barberán Ortí. “La economía de la preferencia temporal individual: Justificaciones teóricas y resultados empíricos”. En: *Hacienda pública española* 159 (2001), págs. 135-162 (vid. pág. 40).
- [2] ARB. *Guía para Choferes del Mantenimiento y Cuidado de los Filtros de Partículas de Diesel (DPFs)*. Inf. téc. California Environmental Protection Agency, 2012 (vid. pág. 78).
- [3] C. R. da S. Jr. Avila y A. T. Beck. “New method for efficient Monte Carlo-Neumann solution of linear stochastic systems”. En: *Probabilistic Engineering Mechanics* 40 (2015), págs. 90 -96. ISSN: 0266-8920. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2015.02.006> (vid. pág. 71).
- [4] J. C. Bean, J. Lohmann y R. Smith. “A Dynamic Infinite Horizon Replacement Economy Decision Model”. En: *The Engineering Economist* 30.2 (1984), págs. 99-120 (vid. pág. 42).
- [5] James C. Bean, Jack R. Lohmann y Robert L. Smith. “Equipment replacement under technological change”. En: *Naval Research Logistics* 41.1 (feb. de 1994), págs. 117-128. DOI: 10.1002/1520-6750(199402)41:1<117::aid-nav3220410108>3.0.co;2-u (vid. pág. 42).
- [6] Richard Bellman. “Equipment Replacement Policy”. En: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 3.3 (1955), págs. 133-136.

- DOI: 10.1137/0103011. eprint: <http://dx.doi.org/10.1137/0103011> (vid. pág. 41).
- [7] Alejandro Bello Pintado y Sandra Cavero. “Competencia estratégica en la distribución minorista de combustibles de automoción”. En: 15 (ene. de 2007), págs. 125-154 (vid. pág. 89).
- [8] Mohamed Ben-Daya y col., eds. *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. London, UK: Springer Nature, 2009. DOI: 10.1007/978-1-84882-472-0 (vid. págs. 26, 30).
- [9] Enzo Bivona y Giovan Battista Montemaggiore. “Evaluating Fleet and Maintenance Management Strategies through System Dynamics Model in a City Bus Company”. En: *International System Dynamics Conference*. Boston, USA, 2005 (vid. pág. 2).
- [10] Sten-Erik Björling y col. “Maintenance Knowledge Management with Fusion of CMMS and CM”. En: *DMIN 2013 International Conference on Data Mining*. Las Vega, USA, jul. de 2013 (vid. pág. 29).
- [11] Robin Boadway. “Principles of Cost-Benefit Analysis”. En: *Public Policy Review*. Vol. 2. 1. Ministry Of Finance - Japan, 2006, págs. 1-44 (vid. pág. 40).
- [12] F. Javier Cárcel Carrasco. *La gestión del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial*. Omnia Publisher SL, feb. de 2014. DOI: 10.3926/oms.197 (vid. pág. 1).
- [13] María Milagros Avedillo Carretero. “Formación de precios y competencia en el mercado español de carburantes”. En: *Economía Industrial* 384 (2012), págs. 63-74 (vid. pág. 89).
- [14] William K. Carter. “To Invest in Technology or Not? New Tools for Making the Decision”. En: *Journal of Accountancy* 173.5 (1992), págs. 58-63 (vid. pág. 3).
- [15] K. Chandler y K. Walkowicz. *King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Final Evaluation Results*. National Renewable Energy Laboratory. Battelle, dic. de 2006 (vid. págs. 42, 102).

-
- [16] N. Clark y col. *TCRP: Report 132 - Assessment of Hybrid-Electric Transit Bus Technology*. Inf. téc. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2009. DOI: 10.17226/22983 (vid. págs. 42, 106).
- [17] N. Clark y col. *Transit Bus Life Cycle Cost and Year 2007 Emissions Estimation*. Final Report. USA: West Virginia University, 2007 (vid. págs. 42, 106).
- [18] Mikael Collan y Shuhua Liu. “Fuzzy logic and intelligent agents: towards the next step of capital budgeting decision support”. En: *Industrial Management & Data Systems* 103.6 (2003), págs. 410-422. DOI: 10.1108/02635570310479981. eprint: <http://dx.doi.org/10.1108/02635570310479981> (vid. pág. 3).
- [19] *Comparación de Precios de Carburantes y Combustibles 2015-2016*. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital- Gobierno de España. Inf. téc. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, 2016 (vid. págs. 86, 88).
- [20] Ana Paula Rodrigues da Costa y col. “Otimização De Custos Do Transporte Público Urbano: Comprar Ou Vender Um Ônibus Usado?” En: *Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade* 4.2 (2014), págs. 73-92. ISSN: 2238-5320 (vid. pág. 5).
- [21] Marcos Dario y col. “Indicadores de desempenho, práticas e custos da manutenção na gestão de pneus de uma empresa de transportes”. En: *Revista Produção Online* 14.4 (dic. de 2014), págs. 1235-1269. DOI: 10.14488/1676-1901.v14i4.1450 (vid. pág. 5).
- [22] Alphonse Dell’isola y Stephen J. Kirk. *Life Cycle Costing for Facilities*. R S MEANS COMPANY INC, nov. de 2003. 396 págs. (vid. pág. 55).
- [23] Prasanta Kumar Dey. “Analytic Hierarchy Process Analyzes Risk of Operating Cross-Country Petroleum Pipelines in India”. En: *Natural Hazards Review* 4.4 (2003), págs. 213 -221 (vid. pág. 47).
- [24] B. S. Dhillon. *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press, 2002. ISBN: 978-1587161421 (vid. págs. 12, 13, 30).
- [25] B. S. Dhillon. *Life Cycle Costing for Engineers*. CRC Press, 2010. ISBN: 978-1439816882 (vid. págs. 4, 40, 55, 101).

- [26] B. S. Dhillon. *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*. New York, USA: Gordon y Breach Since Publishers, 1989 (vid. págs. 48, 53).
- [27] J. Di y L. Hauke. “Optimal Fleet Utilization and Replacement”. En: *Transportation Research Part E* 36.1 (2000), págs. 3-20 (vid. pág. 3).
- [28] Jan Emblemstvag. *Life-Cycle Costing: Using Activity-Based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks*. New Jersey, USA: JOHN WILEY & SONS INC, 2003. ISBN: 0471358851 (vid. págs. 8, 48, 51, 52, 55, 58).
- [29] Leonard Ensslin, Gilberto Neto Montibeller y Sandro Macdonald Noronha. *Apoio À Decisão - Metodologia Para Estruturação De Problemas E Avaliação Multicritério De Alternativas*. Florianópolis: Insular, 2001 (vid. pág. 3).
- [30] Ismail Erol y William G. Ferrell. “A methodology for selection problems with multiple, conflicting objectives and both qualitative and quantitative criteria”. En: *International Journal of Production Economics* 86.3 (dic. de 2003), págs. 187-199. ISSN: 0925-5273. DOI: 10.1016/s0925-5273(03)00049-5 (vid. pág. 3).
- [31] W. Fabricky. *Análisis del Coste del Ciclo de Vida de los Sistemas*. Madrid, España: Isdefe, 1997 (vid. págs. 31, 50).
- [32] Wei David Fan y col. *A Stochastic Dynamic Programming Approach for the Equipment Replacement Optimization with Probabilistic Vehicle Utilization*. The 91st Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, D.C., 2012 (vid. pág. 56).
- [33] John Farr. *Systems Life Cycle Costing*. Orlando, USA: CRC Press, jun. de 2011. DOI: 10.1201/b10963 (vid. págs. 8, 48, 55).
- [34] A. Feldens y col. “Multicriteria Fleet Evaluation and Replacement Policy”. En: *Associação Brasileira de Custos* 5.1 (2010) (vid. pág. 5).
- [35] Aray Gustavo Feldens y col. “Política Para Avaliação E Substituição De Frota Por Meio Da Adoção De Modelo Multicritério”. En: *ABCustos - Associação Brasileira de Custos* 5.1 (2010), págs. 1-27 (vid. pág. 8).

-
- [36] Wei Feng y Miguel Figliozzi. “An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market”. En: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 26 (ene. de 2013), págs. 135-145. ISSN: 0968-090X. DOI: 10.1016/j.trc.2012.06.007 (vid. págs. 40, 42).
- [37] Wei Feng y Miguel Figliozzi. “Bus Fleet Type and Age Replacement Optimization: A case study utilizing King County Metro fleet data”. En: *12th Conference On Advanced Systems For Public Transport*. Santiago, Chile, 2012 (vid. págs. 5, 8).
- [38] Francisco Javier González Fernández. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid, España: FC Editorial, 2011. 640 págs. ISBN: 8492735856 (vid. pág. 15).
- [39] Bruce G. Ferrin y Richard E. Plank. “Total Cost of Ownership Models: An Exploratory Study”. En: *The Journal of Supply Chain Management* 38.3 (jun. de 2002), págs. 18-29. DOI: 10.1111/j.1745-493x.2002.tb00132.x (vid. pág. 55).
- [40] Miguel Figliozzi, Jesse Boudart y Wei Feng. “Economic and Environmental Optimization of Vehicle Fleets”. En: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2252 (dic. de 2011), págs. 1-6. DOI: 10.3141/2252-01 (vid. págs. 40, 42, 66).
- [41] Tobias Fredberg. “Real options for innovation management”. En: *International Journal of Technology Management* 39.1/2 (2007), págs. 72-85. DOI: 10.1504/ijtm.2007.013441 (vid. pág. 1).
- [42] Jefferson Fugarra. *Nbr Iso 55000 E Indústria 4.0 Como Vantagem Competitiva Nas Organizações*. Jun. de 2017. URL: <https://pt.linkedin.com/pulse/nbr-iso-55000-e-ind%C3%BAstria-40-como-vantagem-nas-jefferson-fugarra> (vid. pág. 19).
- [43] D. Galar y col. “The evolution from e(lectronic) Maintenance to i(ntelligent) Maintenance”. En: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 54.8 (ago. de 2012), págs. 446-455. DOI: 10.1784/insi.2012.54.8.446 (vid. págs. 25, 30, 31, 35).

- [44] Diego Galar y col. “The measurement of maintenance function efficiency through financial KPIS”. En: *DYNA* 81.184 (abr. de 2014), pág. 102. DOI: 10.15446/dyna.v81n184.39510 (vid. págs. 24, 32).
- [45] Víctor Manuel Mora Garvin. “Análisis De Modelos Y Métodos De Renovación De Flotas De Vehículos Por Carretera. Enfoque Hacia La Renovación Eco-e Ciente”. Tesis de mtría. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2011-2012 (vid. págs. 32, 48, 59, 77).
- [46] Eppen G.D. y col. *Investigación Operativa En La Ciencia Administrativa*. 5.^a ed. p. 508-510. Editorial Pearson Education, 2000 (vid. pág. 45).
- [47] Douglas D. Gransberg y Edward Patrick O’Connor. *Major Equipment Life-cycle Cost Analysis*. Inf. téc. USA: Iowa State University - Institute for Transportation, 2015 (vid. pág. 56).
- [48] Yash Gupta y Wing Sing Chow. “Twenty-Five Years of Life Cycle Costing — Theory and Applications: A Survey”. En: *International Journal of Quality & Reliability Management* 2.3 (mar. de 1985), págs. 51-76. DOI: 10.1108/eb002854 (vid. pág. 53).
- [49] Joseph C. Hartman. “A General Procedure For Incorporating Asset Utilization Decisions Into Replacement Analysis”. En: *The Engineering Economist* 44.3 (ene. de 1999), págs. 217-238. DOI: 10.1080/00137919908967521 (vid. págs. 42, 58).
- [50] Joseph C. Hartman. “An economic replacement model with probabilistic asset utilization”. En: *IIE Transactions* 33.9 (2001), págs. 717-727. DOI: 10.1080/07408170108936868. eprint: <http://dx.doi.org/10.1080/07408170108936868> (vid. pág. 42).
- [51] Joseph C. Hartman. “Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand”. En: *European Journal of Operational Research* 159.1 (nov. de 2004), págs. 145-165. DOI: 10.1016/s0377-2217(03)00397-7 (vid. pág. 42).
- [52] Joseph C. Hartman. “The parallel replacement problem with demand and capital budgeting constraints”. En: *Naval Research Logistics* 47.1 (feb. de 2000), págs. 40-56. DOI: 10.1002/(sici)1520-6750(200002)47:1<40::aid-nav3>3.0.co;2-t (vid. págs. 42, 58).

-
- [53] Joseph C. Hartman y Alison Murphy. “Finite-horizon equipment replacement analysis”. En: *IIE Transactions* 38.5 (mayo de 2006), págs. 409-419. DOI: 10.1080/07408170500380054 (vid. pág. 42).
- [54] William Ho, Prasanta K. Dey y Helen E. Higson. “Multiple criteria decision-making techniques in higher education”. En: *International Journal of Educational Management* 20.5 (ago. de 2006), págs. 319-337. DOI: 10.1108/09513540610676403 (vid. págs. 43, 47).
- [55] Horizonte 2020. *H2020-SCC-2014-2015. Smart Cities and Communities solutions integrating energy, transport, ICT sectors through lighthouse (large scale demonstration – first of the kind) project*. Acceso en 02/09/2017. 2014. URL: <http://www.eneragen.org/es/proyectos-europeos/remourban/> (vid. pág. 83).
- [56] IDAE. *Guía para la gestión del combustible en las flotas de transporte por carretera*. Inf. téc. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006 (vid. pág. 92).
- [57] INE. *Instituto Nacional de Estadística*. Instituto Nacional de Estadística. 2013. URL: <http://www.ine.es/calcula/calcula.do> (vid. pág. 107).
- [58] Abraão Freires Saraiva Júnior, Maxweel Veras Rodrigues y Reinaldo Pacheco da Costa. “Simulação De Monte Carlo Aplicada À Decisão De Mix De Produtos”. En: *Produto e Produção* 11.2 (2010), págs. 6-54 (vid. pág. 9).
- [59] Robert S Kaplan. “Must CIM be Justified by Faith Alone?”. En: *Harvard Business Review* 3.2 (1986), págs. 87-95 (vid. pág. 3).
- [60] Nejat Karabakal, Jack R. Lohmann y James C. Bean. “Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints”. En: *Management Science* 40.3 (1994), págs. 305-319 (vid. págs. 41, 57).
- [61] R Karim. “A Service-oriented Approach To Emaintenance Of Complex Technical Systems”. Doctoral Thesis. Sweden: Luleå University of Technology, 2008 (vid. pág. 29).
- [62] Y. Kawauchi y M. Rausand. *Life Cycle Cost (LCC) Analysis In Oil And Chemical Process Industries*. Inf. téc. Toyo Engineering Corp, 1999 (vid. pág. 55).

- [63] Michael Kay y col. *Bus Lifecycle Cost Model for Federal Land Management Agencies - User's Guide*. Inf. téc. Washington, USA: U. S. Department of the Interior, 2011 (vid. pág. 106).
- [64] Pinar Keles y Joseph C. Hartman. "Case Study: Bus Fleet Replacement". En: *The Engineering Economist* 49.3 (2004), págs. 253-278 (vid. págs. 3, 42).
- [65] B. Kemps. "Life Cycle Costing: An Effective Asset Management Tool. "Applying LCC contributes to more cost-effective management control of the production facilities of small and medium enterprises (SMEs)."" Master Thesis. Nederland: International Masters School, 2012 (vid. pág. 51).
- [66] S. M. Khasnabis, J. Bartus y R. Ellis. "Asset Management Framework for State Departments of Transportation to Meet Transit Fleet Requirements". En: *Transportation Research Record* 1835 (2003), págs. 74-83 (vid. pág. 41).
- [67] Snehamay Khasnabis, Emadeddin Alsaïdi y Richard Darin Ellis. "Optimal Allocation of Resources To Meet Transit Fleet Requirements". En: *Journal of Transportation Engineering* 128.6 (2002), págs. 509-518. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(509). eprint: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:6\(509\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(509)) (vid. pág. 3).
- [68] H. C. Kim y col. "Life Cycle Optimization of Automobile Replacement: Model and Application". En: *Environmental Science & Technology* 37.23 (2003), págs. 5407-5413 (vid. pág. 41).
- [69] Masiello G. L. "Reliability the Life Cycle Driver: an examination of reliability management, culture and practices". Master Thesis. Monterey, USA: US Naval Postgraduate School, 2002 (vid. pág. 55).
- [70] R. Laver y col. *Useful Life of Transit Buses and Vans*. Federal Transit Administration. 2007 (vid. págs. 42, 116).
- [71] Richard Laver y col. *Useful Life of Transit Buses and Vans*. Inf. téc. Report No. FTA VA-26-7229-07.1. Federal Transit Administration, 2007 (vid. págs. 95, 106).
- [72] J Leonard. *21st Century Maintenance Organization*. 2012 (vid. págs. 17, 18).

- [73] E. Levrat, B. Iung y A. Crespo Marquez. “E-maintenance: review and conceptual framework”. En: *Production Planning & Control* 19.4 (jun. de 2008), págs. 408-429. DOI: 10.1080/09537280802062571 (vid. pág. 29).
- [74] Giorgio Locatelli y Mauro Mancini. “A framework for the selection of the right nuclear power plant”. En: *International Journal of Production Research* 50.17 (2012), págs. 4753 -4766. DOI: 10.1080/00207543.2012.657965. eprint: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2012.657965> (vid. pág. 47).
- [75] V. Macián y col. “Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets”. En: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 16.1 (mar. de 2010), págs. 34-43. DOI: 10.1108/13552511011030318 (vid. págs. 31, 103).
- [76] Vicente Macian y col. “Urban Bus Fleet Maintenance Costs: Comparative Analysis Between Diesel vs CNG Fuelled Vehicles”. En: *Euromaintenance 2014* 1 (2014) (vid. pág. 101).
- [77] Vicente Macián, Bernardo Tormos y Jorge Riechi. “Time replacement optimization model: comparative analysis of urban transport fleets using monte carlo simulation”. En: *Science and Technology* 19.2 (2017), págs. 151-157 (vid. pág. 111).
- [78] Daniel López-Pintor Martí. “Análisis de Casos de Estudio sobre Industria 4.0 y Clasificación según Sectores de actividad y Departamentos empresariales”. Tesis doct. València: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2016 (vid. pág. 18).
- [79] Fernando Manuel Martínez García. “Gestión integrada del mantenimiento y la energía para la prevención de fallos en equipos de plantas de proceso”. Tesis doct. Universidad de Murcia, 2015 (vid. pág. 19).
- [80] R. Maturana. “Una Propuesta Metodológica para la Estimación del Coste del Ciclo de Vida en Inversiones Militares”. Doctoral Thesis. Universidad de Granada, España, 2008 (vid. págs. 49, 53).
- [81] Sabyasachee Mishra y col. “Preserving an aging transit fleet: An optimal resource allocation perspective based on service life and constrained budget”. En: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 47 (ene. de 2013), págs. 111-123. DOI: 10.1016/j.tra.2012.10.029 (vid. pág. 8).

- [82] J Moubray. “The Responsible Custodianship of Physical Assets”. En: *The Tenth Annual Canadian Maintenance Management Conference*. Toronto, Canada, 1998 (vid. págs. 20, 22, 23).
- [83] D. N. P. Murthy, A. Atrens y J. A. Eccleston. “Strategic maintenance management”. En: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 8.4 (dic. de 2002), págs. 287-305. DOI: 10.1108/13552510210448504 (vid. pág. 14).
- [84] A. Nassar. *Project Life Cycle Cost Estimate: International Networks*. Maryland, USA: LLC, 2005 (vid. pág. 48).
- [85] Paul R. Niven. *Balanced Scorecard Step-By-Step: Maximizing Performance and Maintaining Results*. New York, USA: JOHN WILEY & SONS INC, 2002 (vid. pág. 23).
- [86] R.V. Oakford, J. Lohmann y A. Salazar. “A Dynamic Replacement Economy Decision Model”. En: *IIE Transactions* 16.1 (1984), págs. 65-72 (vid. pág. 42).
- [87] Edson Oliveira Pamplona y Wander Fonseca da Silva. “Contribuição da Simulação de Monte Carlo na Projeção de Cenários para Gestão de Custos na Área de Laticínios”. En: Florianópolis, SC: IX Congresso Internacional de Custos, 2005 (vid. pág. 9).
- [88] P. G. Pugh. “Concept costing for defence projects: the problem and its solution”. En: *Defence and Peace Economics* 15.1 (feb. de 2004), págs. 39-57. DOI: 10.1080/1024269042000164487 (vid. pág. 48).
- [89] L. A. Ramirez Roa. “Contribution to the Assessment of the Potential of Low Viscosity Engine Oils to Reduce ICE Fuel Consumption and CO2 Emissions”. Tesis doct. Universitat Politècnica de València, 2016 (vid. pág. 80).
- [90] Hugo Raposo y col. “Time replacement optimization models for urban transportation buses with indexation to fleet reserve”. En: *Time replacement optimization models for urban transportation buses with indexation to fleet reserve*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014, págs. 41-48. DOI: http://dx.doi.org/10.14195/978-972-8954-42-0_7 (vid. pág. 112).

-
- [91] L. P. Rees, E. R. Clayton y B. W. Taylor. “Network Simulation Model for Police Patrol Vehicle Maintenance and Replacement Analysis”. En: *Computers, Environment and Urban Systems* 7.3 (1982), págs. 191-196 (vid. pág. 41).
- [92] OTAN RTO – Research y Technology Organisation. En: *Cost Structure And Life Cycle Costs (LCC) For Military Systems*. Brussels, Belgium, 2003 (vid. pág. 43).
- [93] J. Riechi y col. “Optimal fleet replacement: A case study on a Spanish urban transport fleet”. En: *Journal of the Operational Research Society* 68.8 (2017), págs. 886-894. DOI: 10.1057/s41274-017-0236-1 (vid. pág. 111).
- [94] Jorge Luiz Riechi, Bernardo Tormos y Marcos Vinicius Jacometo Hillebrand. “Otimização dos custos de frota urbana com uso de modelo combinado de life cycle cost e simulação de Monte Carlo”. En: *Revista Produção Online* 17.2 (2017), pág. 667. DOI: 10.14488/1676-1901.v17i2.2627 (vid. pág. 111).
- [95] T. Saaty. *The Analytic Hierarchy Process*. New York, USA: McGraw-Hill, 1980 (vid. págs. 44, 47).
- [96] Burak Omer Saracoglu. “Selección de ubicaciones de inversión industrial en planes maestros de países”. En: *European J. of Industrial Engineering* 7.4 (2013), págs. 416 -441 (vid. pág. 47).
- [97] SCEA. *Glossary*. Society of Cost Estimating y Analysis. 2008. URL: https://www.sceaonline.org/prof_dev/glossary.html (vid. pág. 41).
- [98] J. Schiavone. *Monitoring Bus Maintenance Performance: A Synthesis of Transit Practice*. National Academy Press. Washington, D.C. US, 1997 (vid. pág. 42).
- [99] *Seguridad vial e información de matriculación, transferencias y bajas de vehículos y obtención y renovación del carné*. Acceso 22/07/ 2017. Dirección General de Tráfico. 2017. URL: <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/> (vid. pág. 81).

- [100] João Silva. “Definition of Maintenance Policies in Power Systems using a sequential Monte Carlo”. En: *U.Porto Journal of Engineering* 1.1 (2015), págs. 122-137. ISSN: 2183-6493 (vid. pág. 72).
- [101] Marco Campetti Silveira, Michel J. Anzanello y Guilherme V. Etcheverry. “Programação de produção via seleção de variáveis e simulação de Monte Carlo”. En: *Revista Produção Online* 14.2 (mayo de 2014), pág. 764. DOI: 10.14488/1676-1901.v14i2.1603 (vid. pág. 8).
- [102] B.W. Simms y col. “Optimal buy, operate and sell policies for fleets of vehicles”. En: *European Journal of Operational Research* 15.2 (feb. de 1984), págs. 183-195. DOI: 10.1016/0377-2217(84)90208-x (vid. págs. 42, 103).
- [103] Fernando Sánchez Sanz. “Análisis, diagnóstico y aplicación del cambio a gas natural vehicular como combustible alternativo en una empresa de transporte de paquetería a nivel nacional”. Sep. de 2016 (vid. págs. 80, 81).
- [104] L. Tavares. *Administración moderna del mantenimiento*. Novo Polo Publicación, 1999 (vid. pág. 14).
- [105] UNE-EN 60300-3-3. *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida*. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España, 2009 (vid. pág. 54).
- [106] URBS. Acceso en 03/09/2017. Urbanización de Curitiba S/A. 2017. URL: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/> (vid. pág. 99).
- [107] João Zambujal-Oliveira y João Duque. “Operational asset replacement strategy: A real options approach”. En: *European Journal of Operational Research* 210.2 (abr. de 2011), págs. 318-325. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.09.011 (vid. pág. 8).

Apéndice A

Datos de la Flota Brasileña

Nº BUS	2011					2012			
	Carroceria	Chassis	Lubrificação	Rodagem	Custo Total	Carroceria	Chassis	Lubrificação	
1	HL300	343,52	1.462,02	1.477,99	0,06	3.283,59	2.396,28	4.908,37	567,25
2	HL301	8.286,86	1.233,88	1.062,62	0,06	10.583,42	2.467,58	7.379,73	1.135,38
3	HL302	2.435,72	2.668,57	1.026,53	20,73	6.151,55	1.127,34	6.633,46	1.876,93
4	HL303	1.822,05	1.436,97	1.064,42	0,06	4.323,50	3.094,00	8.440,11	1.514,18
5	HL304	683,99	1.380,23	711,26	414,31	3.189,79	1.752,10	5.620,89	1.112,55
6	HL305	137,98	634,63	943,21	83,06	1.798,88	4.573,54	4.749,55	624,50
7	HL306	647,94	1.976,68	1.077,68	0,06	3.702,36	1.546,80	8.788,70	557,96
8	HL307	750,60	959,85	706,41	0,01	2.416,87	2.646,81	6.639,84	1.132,51
9	HL308	384,65	1.239,47	1.064,59	0,00	2.688,71	1.223,73	6.520,99	572,96
10	HL309	926,91	1.014,82	567,92	0,01	2.509,66	3.865,46	8.100,51	1.452,43
11	HL310	340,59	1.230,74	945,84	0,00	2.517,17	2.040,90	4.659,32	546,28
12	HL311	1.497,90	1.422,28	1.067,59	0,01	3.987,78	4.041,54	6.839,10	549,57
13	HL312	529,55	1.051,79	1.064,59	0,01	2.645,94	1.263,16	6.693,66	1.191,07
14	HL313	1.086,64	1.362,93	1.069,70	0,00	3.519,27	2.010,50	9.219,48	1.082,52
15	HL314	1.254,41	671,84	941,21	0,00	2.867,46	1.484,40	4.147,86	916,32
16	HL315	504,64	804,34	941,21	0,00	2.250,19	1.997,13	5.492,04	1.184,64
17	HL316	526,48	1.003,40	935,75	0,00	2.465,63	2.490,37	5.266,79	1.183,50
18	HL317	25,56	792,51	434,90	0,00	1.252,97	1.095,91	5.474,76	718,18
19	HL318	765,72	433,70	434,90	0,00	1.634,32	927,33	4.265,13	1.255,57
20	HL319	408,89	698,49	672,99	0,00	1.780,37	1.512,81	8.508,33	1.492,63
21	HL320	244,91	370,11	434,90	0,00	1.049,92	728,84	7.380,14	482,49
22	HL321	534,85	845,34	434,90	0,00	1.815,09	1.036,31	4.740,15	840,88
23	HL322	201,83	1.083,81	639,73	0,00	1.925,37	1.482,15	4.584,44	841,39
24	HL323	355,82	688,96	1.002,51	0,00	2.047,29	1.659,80	5.579,61	1.629,70
25	HL324	1.149,02	779,12	1.073,53	0,00	3.001,67	3.475,71	4.927,55	544,24
26	HL325	836,02	1.066,33	935,74	0,00	2.838,09	1.142,77	5.048,64	839,42
27	HL326	560,48	873,06	938,74	0,00	2.372,28	2.678,57	7.340,21	750,12
28	HL327	81,07	315,37	434,90	0,00	831,34	1.120,56	6.163,30	701,89
29	HL328	29,52	381,07	434,90	0,00	845,49	2.508,50	6.874,21	1.321,54
30	HL115	1613,24	20474,71	826,04	7526,05	30440,04	1316,04	4029,45	427,09
31	HL116	2721,26	12490,66	1065,03	7591,9	23868,85	2179,35	4449,21	396,61
32	HL117	4353,75	18796,59	1505,74	7559,85	32215,93	1087,14	5048,13	444,29
33	HL118	2150,79	19108,39	1210,07	7569,71	30038,96	1989,33	8610,28	382,82

		2013					2014		
Rodagem	Custo Total	Carroceria	Chassis	Lubrificação	Rodagem	Custo Total	Carroceria	Chassis	Lubrificação
2.409,32	10.281,22	1.414,15	6.676,19		3.359,98	11.450,32	2.508,16	5.736,14	1.696,62
3.014,32	13.997,01	2.848,27	6.656,20	1.251,77	6.008,60	16.764,84	1.480,27	4.807,90	570,24
10.103,03	19.740,76	2.936,03	7.542,95	1.273,73	10.245,82	21.998,53	1.733,10	6.736,15	2.016,76
14.313,73	27.362,02	4.095,33	7.286,07	1.802,55	4.854,78	18.038,73	3.158,25	9.479,46	2.615,12
9.350,84	17.836,38	5.583,79	6.160,79	896,57	7.626,07	20.267,22	6.300,69	5.070,05	1.866,19
7.346,87	17.294,46	1.575,60	5.764,17	1.288,80	701,75	9.330,32	5.976,57	8.900,24	1.556,40
6.992,04	17.885,50	1.110,00	5.834,51	1.327,39	4.089,27	12.361,17	2.373,16	6.763,22	2.016,17
16.688,79	27.107,95	1.339,63	5.277,25	598,42	3.532,64	10.747,94	1.323,83	22.086,31	2.146,10
9.023,08	17.340,76	1.286,85	6.698,38	1.487,36	3.623,47	13.096,06	1.756,33	24.354,41	1.430,00
9.421,06	22.839,46	1.905,23	7.935,57	1.610,18	8.802,68	20.253,66	1.817,96	8.522,50	2.645,15
8.110,88	15.357,38	1.999,49	4.341,35	1.270,79	0,00	7.611,63	2.357,58	4.781,96	1.464,08
6.992,04	18.422,25	1.320,58	5.784,26	933,88	8.330,61	16.369,33	4.077,73	12.502,79	1.828,89
4.397,00	13.544,89	1.992,61	7.147,98	1.960,75	5.871,43	16.972,77	5.007,16	9.402,86	2.079,22
6.992,04	19.304,54	3.371,92	10.239,76	2.063,61	12.590,67	28.265,96	9.483,63	10.832,11	2.063,11
0,00	6.548,58	2.773,16	5.415,76	1.435,93	5.828,32	15.453,17	2.579,66	4.750,50	1.630,24
2.689,15	11.362,96	3.143,35	6.970,39	1.463,51	9.315,34	20.892,59	1.906,70	8.644,45	2.214,79
6.549,56	15.490,22	1.702,01	10.019,30	1.528,09	704,49	13.953,89	1.758,41	6.609,91	2.479,71
5.378,30	12.667,15	1.868,25	6.422,98	1.548,03	3.337,25	13.176,51	4.441,80	8.407,26	2.445,45
4.595,47	11.043,50	995,15	6.452,66	1.455,51	3.674,66	12.577,98	1.680,04	6.505,57	1.473,97
11.587,51	23.101,28	2.007,19	9.474,36	1.742,66	8.430,70	21.654,91	2.482,06	6.761,47	1.855,48
7.435,83	16.027,30	2.168,21	8.365,82	1.512,88	6.025,74	18.072,65	2.835,74	8.715,13	2.468,31
7.450,31	14.067,65	1.302,82	3.853,13	1.629,35	3.197,31	9.982,61	3.520,70	3.868,00	1.444,07
7.100,62	14.008,60	1.301,89	7.947,57	1.188,87	3.173,16	13.611,49	1.925,10	6.581,32	1.876,04
5.383,18	14.252,29	1.251,23	4.564,08	1.117,92	0,00	6.933,23	1.923,07	4.203,45	1.303,25
4.595,47	13.542,97	2.866,35	6.050,37	1.666,02	5.268,98	15.851,72	2.002,67	9.618,67	1.117,06
2.689,15	9.719,98	1.386,12	5.270,25	1.410,37	0,00	8.066,74	1.532,23	5.893,46	1.097,16
8.883,88	19.652,78	2.321,18	6.195,46	1.243,50	3.401,47	13.161,61	1.092,70	3.546,80	1.426,58
7.096,41	15.082,16	1.536,81	5.186,32	1.771,75	140,00	8.634,88	1.346,45	11.526,79	1.184,54
8.948,42	19.652,67	3.190,54	8.968,65	2.133,95	5.128,98	19.422,12	1.558,55	9.483,87	1.527,25
0	5772,58	1816,92	6477,67	783,9	5672,67	14751,16	1327,94	12459,46	242,84
7274,26	14299,43	1505,48	8480,64	743,41	1460,89	12190,42	2315	4247,29	923,91
3169,58	9749,14	742,64	5432,94	1200,21	2542,04	9917,83	1208,01	16848,56	934,91
2334,32	13316,75	663,45	9400,29	1248,04	5279,69	16591,47	1471,74	7042,91	293,12

		2015				
Rodagem	Custo Total	Carroceria	Chassis	Lubrificação	Rodagem	Custo Total
2.548,00	12.488,92	1.714,17	7.478,80	1.420,82	4.610,29	15.224,08
75,55	6.933,96	4.244,78	11.408,52	1.547,48	7.775,97	24.976,75
0,00	10.486,01	1.500,18	6.574,36	2.133,30	7.725,19	17.933,03
3.154,05	18.406,88	3.399,99	9.438,48	1.200,84	8.153,33	22.192,64
7.711,69	20.948,62	2.409,61	8.194,18	1.660,99	0,00	12.264,78
2.548,00	18.981,21	2.068,38	3.493,09	1.482,98	7.766,35	14.810,80
0,00	11.152,55	2.165,38	5.715,35	1.560,71	5.096,00	14.537,44
7.644,00	33.200,24	5.361,86	9.554,97	922,48	0,00	15.839,31
0,00	27.540,74	2.783,43	4.005,31	1.373,63	6.132,81	14.295,18
0,00	12.985,61	2.456,78	6.904,34	1.795,48	6.459,99	17.616,59
7.644,01	16.247,63	3.376,86	5.591,98	1.685,53	0,00	10.654,37
3.980,00	22.389,41	1.873,12	13.182,97	1.471,66	7.917,47	24.445,22
9.204,52	25.693,76	3.596,27	6.853,74	2.147,23	8.494,81	21.092,05
0,00	22.378,85	2.314,38	16.390,29	2.677,18	13.107,06	34.488,91
3.286,34	12.246,74	3.924,51	6.556,49	1.834,19	7.667,24	19.982,43
4.056,47	16.822,41	2.443,33	6.611,35	2.416,41	16.061,12	27.532,21
3.084,06	13.932,09	3.423,93	8.220,24	1.785,07	7.801,10	21.230,34
5.201,84	20.496,35	1.923,78	5.879,36	953,56	2.808,24	11.564,94
2.548,00	12.207,58	3.864,72	12.952,97	2.487,67	1.558,02	20.863,38
4.065,52	15.164,53	1.672,63	7.364,64	2.339,11	0,00	11.376,38
8.180,05	22.199,23	4.858,50	5.617,04	2.043,81	7.775,97	20.295,32
5.173,67	14.006,44	3.228,02	7.974,46	1.932,96	2.682,13	15.817,57
2.548,00	12.930,46	3.351,83	6.339,04	2.208,62	3.904,84	15.804,33
6.072,84	13.502,61	2.525,25	5.434,59	2.048,88	7.907,95	17.916,67
8.210,90	20.949,30	3.815,94	8.742,80	1.618,14	4.211,72	18.388,60
5.835,72	14.358,57	3.444,20	4.852,81	1.752,09	3.071,96	13.121,06
6.621,64	12.687,72	2.251,77	4.495,62	1.513,34	7.644,00	15.904,73
2.548,00	16.605,78	2.314,95	21.473,28	840,02	5.096,00	29.724,25
9.963,97	22.533,64	3.869,58	5.114,32	958,34	0,00	9.942,24
0	14030,24	1102,91	6138,16	1098,12	0	8339,19
2548	10034,2	1181,67	6936,46	824,75	77,14	9020,02
0	18991,48	513,16	12685,47	270,45	1522,19	14991,27
140	8947,77	2050,36	4727,11	1567,57	2697,71	11042,75

Apéndice B

Datos de la Flota Española de Transporte Urbano - Tipo A

31/12/2004

31/12/2005

	Nº BUS	Fecha 1ª Matricula	Edad 31/12/2004	Coste 2004 (Miles €)	KM 2004	Edad 31/12/2005	Coste 2005 (Miles €)
1	507	08/10/2002	2,233	9,940	66.341,00	3,2329	9,69
2	508	08/10/2002	2,233	7,580	64.324,00	3,2329	10,68
3	509	08/10/2002	2,233	6,325	68.985,00	3,2329	11,30
4	510	08/10/2002	2,233	6,456	68.305,00	3,2329	12,48
5	511	08/10/2002	2,233	6,749	65.597,00	3,2329	8,20
6	512	08/10/2002	2,233	11,838	64.273,00	3,2329	14,09
7	513	21/05/2003	1,616	9,497	62.638,00	2,6164	7,93
8	514	21/05/2003	1,616	4,246	69.263,00	2,6164	7,25
9	515	21/05/2003	1,616	8,236	65.332,00	2,6164	7,66
10	516	21/05/2003	1,616	11,288	122.555,00	2,6164	8,48
11	517	21/05/2003	1,616	25,546	68.063,00	2,6164	11,36
12	518	19/06/2003	1,537	6,758	62.724,00	2,5370	12,30
13	519	20/12/2004	0,030	0,126	1.094,00	1,0301	5,42
14	520	20/12/2004	0,030	0,106	965,00	1,0301	3,34
15	521	20/12/2004	0,030	0,116	1.007,00	1,0301	5,18
16	522	20/12/2004	0,030	0,121	462,00	1,0301	3,64
17	523	20/12/2004	0,030	0,602	1.152,00	1,0301	7,21
18	524	20/07/2005				0,4493	0,35
19	525	20/07/2005				0,4493	1,31
20	526	20/07/2005				0,4493	0,46
21	527	20/07/2005				0,4493	0,34
22	528	20/07/2005				0,4493	1,01
23	538	16/05/2007					
24	539	16/05/2007					
25	540	16/05/2007					
26	541	16/05/2007					
27	542	16/05/2007					
28	543	16/05/2007					
29	544	16/05/2007					
30	545	16/05/2007					
31	546	16/05/2007					
32	547	16/05/2007					
33	548	16/05/2007					
34	549	16/05/2007					

31/12/2006

31/12/2007

KM 2005	Edad 31/12/2006	Coste 2006 (Miles €)	KM 2006	Edad 31/12/2007	Coste 2007 (Miles €)	KM 2007
62.557,00	4,233	10,26	68.623,00	5,233	12,23	60.251,00
65.124,00	4,233	9,32	59.040,00	5,233	8,24	65.948,00
69.140,00	4,233	8,20	65.442,00	5,233	10,24	67.559,00
65.132,00	4,233	10,31	76.798,00	5,233	14,06	60.574,00
63.719,00	4,233	13,11	62.283,00	5,233	12,20	61.677,00
62.573,00	4,233	9,61	66.200,00	5,233	11,16	65.334,00
67.272,00	3,616	10,20	56.569,00	4,616	8,33	66.419,00
64.756,00	3,616	13,70	66.112,00	4,616	19,00	62.025,00
61.283,00	3,616	13,02	67.189,00	4,616	9,04	67.535,00
66.281,00	3,616	12,37	63.185,00	4,616	12,41	62.692,00
65.940,00	3,616	13,21	62.517,00	4,616	44,32	54.444,00
64.114,00	3,537	7,69	68.931,00	4,537	15,03	57.513,00
66.619,00	2,030	5,50	67.023,00	3,030	9,03	72.695,00
67.845,00	2,030	6,80	66.866,00	3,030	6,99	66.149,00
69.967,00	2,030	6,24	59.595,00	3,030	5,96	65.297,00
63.608,00	2,030	6,49	68.204,00	3,030	8,29	68.305,00
64.637,00	2,030	6,43	66.345,00	3,030	7,81	67.213,00
13.087,00	1,449	5,61	70.186,00	2,449	6,17	64.337,00
15.469,00	1,449	3,76	64.110,00	2,449	4,84	63.590,00
21.066,00	1,449	6,25	88.197,00	2,449	5,47	83.598,00
14.636,00	1,449	3,40	65.809,00	2,449	9,52	72.262,00
18.287,00	1,449	3,27	88.002,00	2,449	7,61	83.954,00
				0,627	1,85	34.084,00
				0,627	0,75	41.555,00
				0,627	1,51	37.916,00
				0,627	0,67	34.834,00
				0,627	0,91	40.208,00
				0,627	1,72	31.975,00
				0,627	3,09	37.428,00
				0,627	1,73	35.616,00
				0,627	0,90	36.773,00
				0,627	0,99	36.952,00
				0,627	1,22	33.959,00
				0,627	1,39	34.054,00

31/12/2008

31/12/2009

31/12/2010

Edad 31/12/2008	Coste 2008 (Miles €)	KM 2008	Edad 31/12/2009	Coste 2009 (Miles €)	KM 2009	Edad 31/12/2010
6,236	11,35	70.259,50	7,236	12,27	63.401,80	8,236
6,236	15,38	63.600,30	7,236	14,98	56.973,50	8,236
6,236	10,04	60.547,60	7,236	16,66	61.416,30	8,236
6,236	15,16	62.234,30	7,236	22,50	56.607,40	8,236
6,236	10,21	60.383,50	7,236	14,94	62.542,40	8,236
6,236	16,14	63.632,80	7,236	15,40	59.157,30	8,236
5,619	12,56	64.024,40	6,619	11,69	63.208,90	7,619
5,619	7,34	67.663,70	6,619	13,21	61.730,20	7,619
5,619	8,39	64.793,90	6,619	14,14	63.128,40	7,619
5,619	17,05	63.159,10	6,619	15,91	46.557,70	7,619
5,619	15,42	60.823,00	6,619	25,64	57.527,80	7,619
5,540	11,32	68.380,90	6,540	11,37	58.617,50	7,540
4,033	9,87	58.443,10	5,033	10,57	64.074,50	6,033
4,033	9,97	66.280,80	5,033	9,29	66.513,10	6,033
4,033	11,17	66.646,70	5,033	11,17	61.979,50	6,033
4,033	8,84	67.244,90	5,033	14,57	62.052,10	6,033
4,033	7,70	62.799,70	5,033	8,04	61.283,70	6,033
3,452	13,64	68.197,60	4,452	6,60	60.339,00	5,452
3,452	10,03	63.582,40	4,452	7,98	66.701,90	5,452
3,452	13,60	82.258,40	4,452	9,97	79.207,90	5,452
3,452	6,80	67.761,90	4,452	9,67	64.182,40	5,452
3,452	7,06	84.141,50	4,452	8,18	81.977,20	5,452
1,630	4,03	68.103,80	2,630	5,89	64.918,90	3,630
1,630	7,38	64.495,30	2,630	6,06	61.666,60	3,630
1,630	7,49	63.858,60	2,630	5,94	66.401,20	3,630
1,630	7,25	67.342,50	2,630	4,81	65.771,00	3,630
1,630	3,64	66.236,80	2,630	8,29	64.089,20	3,630
1,630	3,83	69.849,10	2,630	4,97	63.367,70	3,630
1,630	5,83	66.816,20	2,630	7,95	65.569,00	3,630
1,630	4,50	65.778,10	2,630	10,05	62.689,50	3,630
1,630	6,64	66.461,70	2,630	6,02	66.161,50	3,630
1,630	5,20	66.910,90	2,630	7,63	64.750,30	3,630
1,630	3,28	68.966,30	2,630	8,27	62.466,80	3,630
1,630	6,47	66.447,10	2,630	6,86	67.896,60	3,630

31/12/2011

31/12/2012

Coste 2010 (Miles €)	KM 2010	Edad 31/12/2011	Coste 2011 (Miles €)	KM 2011	Edad 31/12/2012	Coste 2012 (mil Euros)
30,50	49.435,00	9,236	32,11	55.899,00	10,238	14,05
17,60	58.993,00	9,236	28,45	58.480,00	10,238	19,70
23,47	52.502,00	9,236	20,49	56.839,00	10,238	24,94
29,80	57.071,00	9,236	18,01	59.498,00	10,238	12,15
16,37	49.522,00	9,236	21,77	55.477,00	10,238	15,10
15,51	59.510,00	9,236	31,90	52.463,00	10,238	11,63
13,20	59.684,00	8,619	17,09	53.019,00	9,622	24,15
12,88	20.570,00	8,619	13,74	62.366,00	9,622	19,35
14,76	60.365,00	8,619	40,58	59.169,00	9,622	11,62
10,49	44.836,00	8,619	30,43	54.910,00	9,622	25,01
13,89	54.759,00	8,619	18,04	54.914,00	9,622	19,05
19,56	55.882,00	8,540	13,89	58.844,00	9,542	17,62
13,10	60.595,00	7,033	15,16	58.457,00	8,036	23,80
9,49	63.927,00	7,033	16,25	62.289,00	8,036	11,69
9,10	64.427,00	7,033	13,01	57.487,00	8,036	13,13
11,18	62.635,00	7,033	12,55	58.317,00	8,036	24,01
15,00	58.894,00	7,033	28,17	50.527,00	8,036	14,54
12,90	60.439,00	6,452	9,77	61.613,00	7,455	10,80
8,93	59.821,00	6,452	21,84	60.862,00	7,455	14,22
13,27	79.655,00	6,452	20,99	70.414,00	7,455	29,34
8,99	65.752,00	6,452	17,01	56.985,00	7,455	12,22
15,04	78.111,00	6,452	10,75	74.601,00	7,455	13,32
11,74	62.387,00	4,630	12,30	57.954,00	5,633	13,18
9,73	57.018,00	4,630	14,26	58.246,00	5,633	11,61
5,77	61.435,00	4,630	9,62	60.162,00	5,633	7,59
9,53	62.119,00	4,630	12,86	54.392,00	5,633	11,34
6,97	58.442,00	4,630	7,26	58.260,00	5,633	8,94
8,47	63.362,00	4,630	8,51	61.632,00	5,633	15,67
7,66	64.622,00	4,630	11,63	55.925,00	5,633	12,50
9,66	63.592,00	4,630	12,07	58.509,00	5,633	11,78
13,15	59.519,00	4,630	14,24	58.377,00	5,633	7,76
9,04	61.996,00	4,630	10,62	58.504,00	5,633	11,09
8,23	59.981,00	4,630	11,16	57.751,00	5,633	12,03
14,61	61.120,00	4,630	10,18	58.229,00	5,633	13,65

31/12/2013

31/12/2014

KM 2012	Edad 31/12/2013	Coste 2013 (Miles €)	KM 2013	Edad 31/12/2014	Coste 2014 (Miles €)	KM 2014
59.432,00	11,238	22,04	57.151,00	12,238	12,48	64.285,00
59.103,00	11,238	14,51	57.937,00	12,238	10,69	55.470,00
56.383,00	11,238	14,23	56.947,00	12,238	16,96	56.838,00
66.234,00	11,238	32,12	57.717,00	12,238	16,47	55.073,00
61.983,00	11,238	18,28	60.925,00	12,238	19,14	47.686,00
63.776,00	11,238	16,33	64.721,00	12,238	23,94	56.198,00
59.843,00	10,622	12,44	63.056,00	11,622	15,49	52.968,00
62.186,00	10,622	23,13	66.390,00	11,622	11,92	68.193,00
66.046,00	10,622	18,77	64.864,00	11,622	14,25	53.688,00
62.042,00	10,622	13,48	62.309,00	11,622	13,53	55.016,00
59.245,00	10,622	13,39	60.652,00	11,622	12,84	58.136,00
61.572,00	10,542	24,09	59.317,00	11,542	21,96	64.991,00
59.139,00	9,036	17,12	64.818,00	10,036	10,05	52.648,00
68.468,00	9,036	19,13	64.804,00	10,036	7,82	61.834,00
66.007,00	9,036	10,81	69.226,00	10,036	17,01	56.422,00
56.175,00	9,036	19,19	61.698,00	10,036	17,24	56.503,00
58.669,00	9,036	13,14	62.618,00	10,036	17,39	57.161,00
66.348,00	8,455	24,35	64.256,00	9,455	11,25	65.310,00
63.717,00	8,455	12,99	67.716,00	9,455	35,53	57.351,00
73.421,00	8,455	11,42	79.903,00	9,455	8,45	75.653,00
73.003,00	8,455	9,95	61.232,00	9,455	9,44	65.888,00
72.331,00	8,455	15,18	76.848,00	9,455	13,10	78.803,00
63.679,00	6,633	9,98	66.430,00	7,633	11,50	60.794,00
68.844,00	6,633	13,15	61.651,00	7,633	10,20	56.403,00
63.484,00	6,633	12,28	65.272,00	7,633	19,74	64.609,00
64.164,00	6,633	33,84	60.574,00	7,633	9,96	64.301,00
67.170,00	6,633	15,15	61.982,00	7,633	14,05	60.736,00
65.017,00	6,633	10,71	65.350,00	7,633	17,46	60.525,00
63.137,00	6,633	12,50	62.952,00	7,633	13,70	58.546,00
66.211,00	6,633	13,32	58.311,00	7,633	7,98	55.802,00
67.589,00	6,633	13,52	63.544,00	7,633	10,09	59.566,00
65.745,00	6,633	13,35	66.244,00	7,633	15,74	59.670,00
64.969,00	6,633	8,71	65.140,00	7,633	14,64	59.937,00
65.764,00	6,633	11,42	64.179,00	7,633	18,95	55.384,00

Apéndice C

Datos de la Flota Español para
el Estudio Comparativo -
Diesel x GNC- (adoptado
como ejemplo los datos de un
autobus)

Serial	Bus	Out Date			Item Number
-	5334	11/01/2012	1	2012	177737
-	5334	16/02/2012	2	2012	153437
-	5334	16/02/2012	2	2012	211162
-	5334	26/02/2012	2	2012	165328
-	5334	28/02/2012	2	2012	152921
-	5334	28/02/2012	2	2012	182744
-	5334	08/03/2012	3	2012	178672
-	5334	08/03/2012	3	2012	174240
-	5334	08/03/2012	3	2012	178650
-	5334	21/03/2012	3	2012	155823
-	5334	21/03/2012	3	2012	179122
-	5334	22/03/2012	3	2012	118462
-	5334	22/03/2012	3	2012	176883
-	5334	22/03/2012	3	2012	176872
-	5334	22/03/2012	3	2012	175364
-	5334	27/03/2012	3	2012	116706
-	5334	17/04/2012	4	2012	151661
-	5334	19/05/2012	5	2012	185490
-	5334	05/07/2012	7	2012	176872
-	5334	05/07/2012	7	2012	176883
-	5334	05/07/2012	7	2012	175364
-	5334	21/08/2012	8	2012	180077
-	5334	23/08/2012	8	2012	185488
-	5334	07/09/2012	9	2012	146812
-	5334	07/09/2012	9	2012	117742
-	5334	07/09/2012	9	2012	155564
-	5334	07/09/2012	9	2012	136552
-	5334	11/09/2012	9	2012	175961
-	5334	11/09/2012	9	2012	200158
-	5334	11/09/2012	9	2012	24366
-	5334	11/09/2012	9	2012	44627
-	5334	11/09/2012	9	2012	175331
-	5334	11/09/2012	9	2012	53548
-	5334	11/09/2012	9	2012	175342
-	5334	29/11/2012	11	2012	178661
-	5334	17/12/2012	12	2012	179122
-	5334	17/12/2012	12	2012	170087
-	5334	17/12/2012	12	2012	160874
-	5334	17/12/2012	12	2012	160830
-	5334	17/12/2012	12	2012	160841
-	5334	17/12/2012	12	2012	211116
-	5334	17/12/2012	12	2012	186715
-	5334	19/12/2012	12	2012	153437
-	5334	19/12/2012	12	2012	211151

Item description	Qty	Cost Un.	Total Cost
PULSADOR PUERTAS	1	€ 26,82	€ 26,82
PAST.FRENO CONECTOR DE VARILLA	1	€ 108,00	€ 108,00
PINZA FRENO DEL.DER.(REP)	1	€ 526,37	€ 526,37
UNION 22M150 H16 5005430205	2	€ 7,70	€ 15,40
BIELA FRENO DERECHO	1	€ 35,36	€ 35,36
CLIP EN "R" PASTILLAS FRENO	1	€ 7,23	€ 7,23
CORREA ALTERNADOR	0	€ 6,90	€ -
CORREA AA B-92-2410 (JGO.2 UN)	1	€ 30,39	€ 30,39
CORREA BOMBA AGUA 504032641	1	€ 2,95	€ 2,95
PILOTO INTERM. D.I. 5001834560	1	€ 9,18	€ 9,18
PASTILLAS FRENO TRASERAS (JGO)	1	€ 117,00	€ 117,00
UNION CODO 12X12 5005430055	1	€ 6,24	€ 6,24
JUNTA FILTRO DESAH.MOTOR+1915	2	€ 8,39	€ 16,78
FILTRO DESAH.MOTOR+GRUA 1915	1	€ 15,04	€ 15,04
FILTRO ACEITE MOTOR+ GRUA 1915	1	€ 11,87	€ 11,87
PARABRIS TINTADO 5001851553	1	€ 270,00	€ 270,00
VALV.DESCARGA RAPIDA ROSC.GRUE	1	€ 15,00	€ 15,00
AMORTIGUADOR COMPRESOR AA	1	€ 72,28	€ 72,28
FILTRO DESAH.MOTOR+GRUA 1915	1	€ 15,04	€ 15,04
JUNTA FILTRO DESAH.MOTOR+1915	2	€ 8,39	€ 16,78
FILTRO ACEITE MOTOR+ GRUA 1915	1	€ 11,87	€ 11,87
ALTERNADOR CITYBUS E3 24V 90A.	1	€ 190,00	€ 190,00
CILINDRO FRENO TRASERO	1	€ 192,79	€ 192,79
PARAGOLPES TRAS.CTR.4809751135	1	€ 142,00	€ 142,00
TULIPA PILOTO TRA.5001847588	2	€ 10,00	€ 20,00
CONVERTIDOR 24V 18-36W 392136	5	€ 24,00	€ 120,00
CATADIOPTICO ROJO 4809739004	2	€ 1,32	€ 2,64
JGO. REP. CICLONICO.0034308281	1	€ 14,43	€ 14,43
FILTRO GAS-OIL 2992662	1	€ 7,62	€ 7,62
ANILLO TORICO CICLONICO	1	€ 1,06	€ 1,06
FILTRO DIRECCION	1	€ 1,52	€ 1,52
FILTRO GAS-OIL CITYBUS E3	1	€ 10,14	€ 10,14
FILTRO ACEITE ZF	1	€ 10,00	€ 10,00
FILTRO PRIMARIO GAS.5001859295	1	€ 5,72	€ 5,72
POLEIN CORREA AA 5006154934	1	€ 141,81	€ 141,81
PASTILLAS FRENO TRASERAS (JGO)	1	€ 117,00	€ 117,00
PLANCHA SG.TUER.MANGON 1415143	2	€ 10,89	€ 21,78
RETEN BUJE TRASERO GRANDE	2	€ 38,00	€ 76,00
RETEN BUJE TRASERO PEQUEDO	2	€ 18,00	€ 36,00
ANILLO TORICO BUJE T. 1426658	2	€ 1,89	€ 3,78
PINZA FRENO CITY TD.(REP)	1	€ 415,82	€ 415,82
DISCO FRENO TRAS/EJE MOTRIZ	2	€ 113,00	€ 226,00
PAST.FRENO CONECTOR DE VARILLA	1	€ 108,00	€ 108,00
PINZA FRENO DEL.IZQ.(REP)	1	€ 459,80	€ 459,80



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA