Universidad de Sevilla
Escuela Superior de Ingenieros
Programa de Doctorado en *Ingeniería de Organización*

Trabajo propuesto para optar al título de Doctor:

Desarrollo de modelos de cuantificación económica del factor "Fiabilidad" en el Coste Total de Ciclo de Vida de un sistema de producción

Alumno: Carlos Alberto Parra Márquez

Tutor:
Adolfo Crespo Márquez

Sevilla, 1 de Septiembre del 2009

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION..... VII

CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTE DE CICLO DE VIDA (ACCV) 1

1. ANTECEDENTES DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTES DE CICLO DE VIDA 1

2. PROCESO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO Y SU RELACIÓN CON EL ACCV 3

2.1. EFICACIA Y EFICIENCIA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4

2.2. MODELO PROPUESTO DEL PROCESO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 7

3. INFLUENCIA DEL ANÁLISIS DE COSTES A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO DE PRODUCCIÓN 14

3.1. CARÁCTERÍSTICAS DE LOS COSTES EN LAS DISTINTAS FASES DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO 18

3.2. IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL COSTE DE CICLO DE VIDA 20

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE EN EL ÁREA DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTES DE CICLO DE VIDA (ACCV) 23

1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE 23

1.1. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS COSTES 24

1.1.1. COSTES DE PRODUCCIÓN Y CONSTRUCCIÓN 26

1.1.2. COSTES DE OPERACIÓN Y SOPORTE 26

1.1.3. COSTES DE RETIRADA 27

1.2. PROCESO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCV 30

1.2.1. ESTIMACIÓN DE COSTES 32

1.2.1.1. ESTIMACIONES PARAMÉTRICAS 33

1.2.1.2. ESTIMACIONES POR ANALOGÍA 34

1.2.1.3. ESTIMACIONES DETALLADAS 34

1.2.2. PRECISIÓN EN EL PROCESO DE ESTIMACIÓN DE COSTES 35

2. MODELOS DE ACCV 37

2.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL ACCV. MODELOS BÁSICOS EQUIPOS NO REPARABLES 40

2.1.1. MODELO DE TASA DE FALLOS CONSTANTE 42

2.1.2. MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINÍSTICO 45

2.1.3. MODELO DE TASA DE FALLOS POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL 48

2.2. CASOS DE ESTUDIO 51

2.2.1. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS CONSTANTE 52

2.2.2. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINISTA 53

2.2.3. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL..... 55

2.3. LIMITACIONES DE LOS MODELOS EVALUADOS..... 56

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE COSTES DE FIABILIDAD ESTIMADOS CON DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE FALLOS SELECCIONADAS A PARTIR DEL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV - EQUIPOS NO REPARABLES..... 59

1. ASPECTOS BÁSICOS DEL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV..... 59

1.1. MODELO PROPUESTO DE TASA DE DISTRIBUCIÓN DE FALLOS SELECCIONADA CON EL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV 60

1.2. CASO DE ESTUDIO - MODELO PROPUESTO DE TASA DE DISTRIBUCIÓN DE FALLOS SELECCIONADA CON EL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV 67

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS FALLOS, A PARTIR DEL MODELO ESTOCÁSTICO DENOMINADO: PROCESO NO HOMOGÉNEO DE POISSON *(NON HOMOGENEOUS POISSON PROCESS (NHPP)* - EQUIPOS REPARABLES 76

1. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS MODELOS DE FIABILIDAD EN EL ÁREA DE EQUIPOS REPARABLES 76

1.1. PROCESO NO HOMOGÉNEO DE POISSON *(NHPP),* UTILIZADO PARA ESTIMAR LA TASA DE FALLOS EN EQUIPOS REPARABLES..... 81

2. MODELO ESTOCÁSTICO *NHPP* PROPUESTO PARA EVALUAR EL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS FALLOS EN EQUIPOS REPARABLES..... 85

2.1. CASO DE ESTUDIO MODELO *NHPP*..... 87

2.2. LIMITACIONES DEL MODELO *NHPP*..... 89

CAPÍTULO V: CONSIDERACIONES FINALES 92

1. APORTES REALIZADOS DURANTE EL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN..... 92

2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO 93

REFERENCIAS 97

APÉNDICE I: ARTÍCULO PRESENTADO EN EL CONGRESO ESREL 08 (EUROPEAN SAFETY AND RELIABILITY CONGRESS, VALENCIA ESPAÑA). TÍTULO: NON-HOMOGENEOUS POISSON PROCESS (NHPP), STOCHASTIC MODEL APPLIED TO EVALUATE THE ECONOMIC IMPACT OF THE FAILURE IN THE LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA) 110

APÉNDICE II: ARTÍCULO PRESENTADO EN EL CONGRESO ESREL 06 (EUROPEAN SAFETY AND RELIABILITY CONGRESS, ESTORIL, PORTUGAL). TÍTULO: ON THE CONSIDERATION OF RELIABILITY IN THE LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA). A REVIEW OF BASIC MODELS 120

APÉNDICE III: TRABAJO TITULADO "EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL ANÁLISIS DE COSTE DEL CICLO DE VIDA (ACCV) DE UN ACTIVO INDUSTRIAL". PRESENTADO EN CONGRESOS INTERNACIONALES DE MÉXICO Y VENEZUELA 131

APÉNDICE IV: ARTÍCULO PUBLICADO "INGENIERÍA DE FIABILIDAD APLICADA AL PROCESO DE ANÁLISIS DE COSTE DE CICLO DE VIDA (ACCV). REVISIÓN DE MODELOS BÁSICOS". PUBLICADO EN: INGENIERÍA Y GESTIÓN DE MANTENIMIENTO, EDITORIAL ALCIÓN, MADRID, ESPAÑA, MAYO/JUNIO, 2006 159

APÉNDICE V: ARTÍCULO PUBLICADO "A STRUCTURED APPROACH TO MAINTENANCE MANAGEMENT. PROCESS AND FRAMEWORK TO MANAGE MAINTENANCE". PRESENTADO Y PUBLICADO EN EL CONGRESO: EUROMAINTENANCE 2008, BRUSSELS, 8-10 APRIL, PAPER 12 161

APÉNDICE VI: COLABORADOR EN REDACCIÓN DEL CAPÍTULO 16 DEL LIBRO: THE MAINTENANCE MANAGEMENT FRAMEWORK. MODELS AND METHODS FOR COMPLEX SYSTEMS MAINTENANCE. AUTOR: ADOLFO CRESPO MÁRQUEZ, EDITORIAL SPRINGER (PORTADA Y PRIMERA PÁGINA DEL CAPÍTULO 16) 175

APÉNDICE VII: ARTÍCULO A PROPONER: NON-HOMOGENEOUS POISSON PROCESS, RELIABILITY MODEL APPLIED TO EVALUATE THE ECONOMIC IMPACT OF FAILURE IN THE LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA). CASE OF STUDY IN THE OIL INDSUTRY. AUTORES: CARLOS PARRA MÁRQUEZ Y ADOLFO CRESPO MÁRQUEZ. JOURNAL A PROPONER: RELIABILITY ENGINEERING & SYSTEM SAFETY, EDITORIAL ELSEVIER (ABSTRACT) 179

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Tiempos entre fallos....52
Tabla 2. Frecuencia de fallos por año....53
Tabla 3. Costes por año por fallos: $/año....54
Tabla 4. Costes en valor presente por fallo: $....54
Tabla 5. Análisis de los resultados de Costes por fallos por modelo....57
Tabla 6. Limitaciones de los modelos evaluados para estimar el impacto de la fiabilidad en los ACCV....58
Tabla 7. Expresiones más comunes de probabilidad de fallo acumulado $F(tf_i)$ y probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$....61
Tabla 8. Valores críticos Dcr de Kolmogorov - Smirnov (Kececioglu, 1991)....63
Tabla 9. Expresiones más comunes de tiempos promedios de reparación - MTTR....64
Tabla 10. Expresiones más comunes de tiempos promedios de reparación - MTBF....65
Tabla 11. Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas)....67
Tabla 12. Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas) - ordenados de forma creciente....67
Tabla 13. Probabilidad de fallo observada $Qo(i)$....68
Tabla 14. Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ - Distribución Exponencial....68
Tabla 15. Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ - Distribución Weibull....68
Tabla 16. Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ - Distribución Log normal....68
Tabla 17. Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Exponencial....69
Tabla 18. Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Weibull....69
Tabla 19. Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Log normal....69
Tabla 20. Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Exponencial....69
Tabla 21. Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Weibull....69
Tabla 22. Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Log normal....69
Tabla 23. Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Exponencial....70
Tabla 24. Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Weibull....70
Tabla 25. Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Log normal....70
Tabla 26: Diferencias absolutas máximas de probabilidades de fallo Dmáx (tf_i) y probabilidades de recuperación Dmáx (tfs_i)....70
Tabla 27: Prueba de hipótesis - nivel de significancia de 0,05....71
Tabla 28: Distribución seleccionada....71
Tabla 29: Modelos estocásticos utilizados en el análisis de Fiabilidad de equipos reparables....94

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Modelo propuesto del proceso de Gestión de Mantenimiento.....8
Figura 2. Incertidumbre en los Costes.....16
Figura 3. Estructura de Costes en el Ciclo de Vida de un activo.....18
Figura 4. Impacto de la Fiabilidad en los Costes 20
Figura 5. Oportunidades de reducción de Costes 21
Figura 6. Estructura desglosada de costes *(CBS - cost breakdowm structure)*.....25
Figura 7. Ciclo de vida del activo y el proceso de retirada.....29
Figura 8. Procesos de fallos sucesivos (nomenclatura) 77
Figura 9. Probabilidad de fallos en activos reparables.....78
Figura 10. Fiabilidad en activos reparables. 79
Figura 11. Número acumulado de fallos 80
Figura 12. Probabilidad condicional de ocurrencia de fallos 83

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de reducir los costes y mejorar la rentabilidad de los procesos productivos, las denominadas organizaciones de categoría Clase Mundial (Mackenzie, 1997*)*, dedican enormes esfuerzos para visualizar, analizar, implantar y ejecutar estrategias para la solución de problemas, que involucren decisiones en áreas de alto impacto: seguridad, ambiente, metas de producción, calidad de productos, costes de operación y mantenimiento. En los últimos años, especialistas en las áreas de Ingeniería de Valor , Diseño y Organización de la Producción, han mejorado el proceso de cuantificación de los costes, incluyendo el uso de técnicas que cuantifican el factor fiabilidad y el impacto de los eventos de fallos sobre los costes totales de un sistema de producción a lo largo de su Ciclo de Vida (Woodhouse, 1993). Estas mejoras han permitido disminuir la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones de áreas de vital importancia tales como: diseño, desarrollo, sustitución y adquisición de activos de producción. Es importante aclarar, que, en todo este proceso, existen muchas decisiones y acciones, tanto técnicas como no técnicas, que deben adoptarse a través de todo el período de uso de un activo industrial. Markeset and Kumar (2001), plantean que la mayoría de estas acciones, particularmente las que corresponden a la fase de Diseño del Sistema de Producción, tienen un alto impacto en el Ciclo de Vida del activo e influyen en gran medida sobre los costes totales de producción. Son de interés particular, aquellas decisiones relacionadas con el proceso de mejoramiento del factor “Fiabilidad” (calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallos, costes de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad), ya que

estos aspectos, tienen una gran influencia sobre el coste total del ciclo de vida del activo, e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los sistemas de producción a costes razonables (ver detalles en Blanchard, 2001, Blanchard and Fabrycky, 1998, Goffin, 2000, Markeset and Kumar, 2001, Smith and Knezevic, 1996 y Woodward, 1997).

En función de lo expresado anteriormente, este trabajo de investigación propone desarrollar modelos que permitan evaluar el impacto económico de la Fiabilidad de activos industriales que presenten escenarios de fallos de componentes no reparables y/ó reparables. Esta investigación se desarrolló en tres etapas:

- Etapa1: Modelo básico inicial, basado en la estimación de tasas determinísticas de fallos constantes para equipos no reparables (Asignatura de Gestión de Producción).

- Etapa 2: Modelo basado en la estimación de tasas probabilísticas de fallos para equipos no reparables, utilizando las distribuciones estadísticas de: Weibull, Exponencial y Log Normal, seleccionadas a partir del test de Kolmogorov - Smirnov (Período de Investigación DEA, período 2004 hasta el 2007).

- Etapa 3: Modelo basado en la estimación de tasa de fallos para equipos reparables, utilizando el método estocástico denominado: ***Non-homogeneous Poisson Process (NHPP)*** (Tesis Doctoral, fecha propuesta de entrega, Octubre 2009).

Para el desarrollo de este modelo, se utilizará la técnica de Ingeniería Económica denominada: Análisis de Costes de Ciclo de Vida, la cual permite analizar todos los costes relacionados con los activos y adicionalmente sirve como plataforma para poder determinar el impacto económico del factor fiabilidad en el ciclo de vida útil de los sistemas de producción.

CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTES DE CICLO DE VIDA (ACCV)

1. ANTECEDENTES DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTES DE CICLO DE VIDA

En los últimos años, el área de investigación relacionada con el Análisis de Costes en el Ciclo de Vida (ACCV), ha continuado su desarrollo, tanto a nivel académico como a nivel industrial. Es importante mencionar la existencia de otras metodologías que han venido surgiendo en el área de ACCV, tales como: Análisis de Costes de Ciclo de Vida e Impacto Ambiental, Análisis de Costes Totales de Activos de Producción, Modelo de Costes Basado en Actividades, entre otras (Durairaj and Ong, 2002). Estas metodologías tienen sus características particulares, aunque con respecto al proceso de estimación del impacto de los costes por eventos de fallos, las mismas, proponen análisis de fiabilidad normalmente basados en tasa de fallos constantes. Algunos antecedentes generales de las técnicas de ACCV son presentados a continuación (antecedentes extraídos de Kirt and Dellisola, 1996):

- 1930, uno de los primeros registros de las técnicas de ACCV se encuentra en el libro denominado Principles of Engineering Economics de Eugene L. Grant.
- 1933, la primera referencia de Análisis de Ciclo de Vida del Gobierno de los Estados Unidos, realizada por parte de la: General Accounting Office (GAO), la cual está relacionada con la compra de una serie de tractores.
- 1940 - 1950, Lawrence D. Miles originó el concepto de Ingeniería de Valor en la compañía General Electric, incorporando aspectos relacionados con las técnicas de ACCV.

- 1955 - 1965, (Stone, 1975) comenzó a trabajar en Inglaterra, dando como resultado en la década del 70 la publicación de los dos mayores textos desarrollados en Europa en relación a la Ing. de costes.
- 1960, Logistics Management Institute, Estados Unidos, desarrolló una investigación en el área de Ingeniería de Obsolescencia para el Ministerio de la Defensa. El resultado final de esta investigación fue la publicación del primer Manual de Coste de Ciclo de Vida en 1970.
- 1972, el Ministerio de la Defensa de los Estados Unidos, promovió el desarrollo de manuales de la metodología de ACCV, para aplicar en las áreas de Logística de las Fuerzas Armadas.
- 1974, el Departamento de Energía de los Estados Unidos, decidió desarrollar sus planes de expansión y consumo energético sustentados en el análisis de Ciclo de Vida.
- 1975, el Departamento Federal de Suministros y Servicios de los Estados Unidos, desarrolló una técnica de Logística y Adquisición basada en el ACCV.
- 1979, el Departamento de Energía presento una propuesta (44 FR 25366, 30 Abril 1979) la cual proponía que se incluyeran evaluaciones de ACCV en todas las nuevas construcciones y modificaciones mayores de las instalaciones gubernamentales.
- 1980 - 1985, La American Society for Testing and Materials (ASTM) desarrolló una serie de estándares y bases de datos relacionados con las técnicas de ACCV.
- 1992, dos investigadores de la Universidad de Virginia, Wolter Fabrycky y B.S. Blanchard, desarrollan un modelo de ACCV - ver detalles en (Fabrycky and Blanchard, 1991), en el cual incluyen un proceso estructurado para calcular los costes por fiabilidad a partir de valores constantes de fallos por año (tasa de fallos constante).

- 1994, Woodward (1997), de la Escuela de Negocios de la Universidad de Staffordshire (Inglaterra, Gran Bretaña), desarrolló una línea de investigación que incluye aspectos básicos de análisis del factor fiabilidad y su impacto sobre los Costes de Ciclo de Vida.
- 1998, David Willians y Robert Scott de la firma consultora RM-Reliability Group, desarrollan un modelo de ACCV basado en la Distribución de Weibull para estimar la frecuencia de fallos y el impacto de los Costes de fiabilidad, ver detalles de este modelo en (Zohrul Kabil, 1987, Ebeling, 1997 and Willians and Scott, 2000).
- 1999, el grupo consultor The Woodhouse Partnership participa en el Proyecto Europeo EUREKA, específicamente dentro de la línea de investigación denominada MACRO (Maintenance Cost/Risk Optimisation 'MACRO' Project) y desarrolla un software de ACCV denominado APT Lifespan, ver (Roca, 1987, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Woodhouse, 1991 and Riddell and Jennings, 2001).
- 2001, The Woodhouse Partnership y el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP), ponen a prueba este modelo, evaluando los Costes Totales de Ciclo de Vida de 56 sistemas de compresión de gas, utilizados para la extracción del petróleo pesado del Distrito San Tomé (Venezuela), ver (Parra y Omaña, 2003).

2. PROCESO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO Y SU RELACIÓN CON EL ACCV

El proceso de gestión de mantenimiento podemos dividirlo en dos partes principales (Crespo, 2007) :

- La definición de la estrategia de mantenimiento;
- La implementación de la estrategia de mantenimiento.

La primera de estas partes, el proceso de definición de la estrategia de mantenimiento, requiere la definición de los objetivos de mantenimiento como "input" del mismo. Obviamente, los objetivos de mantenimiento dimanan directamente del plan de negocio de la organización en cuestión. Diseñar estrategias de mantenimiento que estén alineadas con los planes de negocio es un aspecto clave y condiciona la consecución de los objetivos del mantenimiento y en última estancia los reseñados en el plan de negocio de la organización.

La segunda parte del proceso, la implementación de la estrategia tiene un distinto nivel de importancia y tienen que ver con nuestra habilidad para asegurar niveles adecuados de formación del personal, de preparación de los trabajos, con la selección de las herramientas adecuadas para realizar las diferentes tareas o, por ejemplo, con el diseño y consecución de la ejecución a tiempo de los diferentes programas de mantenimiento.

2.1. EFICACIA Y EFICIENCIA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

La primera y segunda parte en la que dividimos el proceso de gestión de mantenimiento condicionan la eficacia y eficiencia de la gestión respectivamente. La eficacia muestra la bondad con que un departamento o función consigue los objetivos impuestos en base a las necesidades de la empresa. A menudo la eficacia de las funciones empresariales se mide en términos de calidad del servicio realizado por esa función, siempre desde el punto de vista cliente-proveedor y bajo la perspectiva del cliente. La eficacia de la gestión se concentra entonces en lo correcto de los procesos que se emprenden y en que los procesos produzcan el resultado esperado de los mismos.

La eficacia de la gestión de mantenimiento nos permitirá entonces minimizar los costes indirectos de mantenimiento (Vagliasindi, 1989), aquellos asociados con las pérdidas de producción y en última instancia con la insatisfacción del cliente. Por tanto, en el caso de

mantenimiento, la eficacia de la gestión de esta función podemos entenderla como la satisfacción que la empresa tiene con la capacidad y condición de sus activos (Wireman, 1998), o con la mejora general de los costes que experimenta cuando la capacidad de producción está disponible cuando se necesita (Palmer, 1999).

La segunda parte en que hemos dividido el proceso de mantenimiento tiene que ver con la eficiencia de nuestra gestión, que debería ser menos importante que la primera (garantizar la eficacia de la misma) para la organización. Eficiencia es actuar o producir con el mínimo esfuerzo, minimizando derroche o desperdicio de recursos, y los gastos asociados a los mismos. Si logramos mejoras en esta segunda parte del proceso de gestión, nos permitirán minimizar los costes directos de mantenimiento, es decir realizar un servicio de mantenimiento de igual o mejor calidad a costes más competitivos.

El proceso de definición de una estrategia para mantenimiento puede describirse utilizando métodos estándar bien conocidos de planificación estratégica, que normalmente incluyen lo siguiente (Crespo, 2007):

- Obtención, partiendo de los objetivos corporativos del negocio, los objetivos y políticas de mantenimiento al más alto nivel. Estos objetivos pueden incluir, por ejemplo valores estimados y realistas para las siguientes variables: Disponibilidad de equipos, fiabilidad, seguridad, riesgo, presupuesto e mantenimiento, etc; a su vez, estos objetivos deben de ser comunicados a todo el personal que está involucrado en mantenimiento, incluyendo terceras partes.
- Determinación del desempeño o rendimiento actual de la instalaciones productivas;
- Determinación de los medidores claves a consierar para la evaluación del rendimiento de las instalaciones (Key Performance Indicators - KPIs). Las mejoras a perseguir se

basarán en esta serie de medidores aceptados por la dirección de operaciones y de mantenimiento;

- Establecimiento de una serie de principios que conducirán la implementación de la estrategia, y que condicionarán la posterior planificación, ejecución, evaluación, control y análisis para la mejora continua de las actividades de mantenimiento.

El proceso de gestión de mantenimiento debe conseguir alinear las actividades de mantenimiento de acuerdo con la estrategia definida y esto debe de hacerlo en los tres niveles de actividad en la empresa: estratégico o de dirección, táctico o de procesos y operativo (Crespo, 2007). Después de haber transformados prioridades del negocio en prioridades de mantenimiento, los gerentes de mantenimiento construirán sus estrategias a corto-medio plazo para atacar potenciales puntos débiles en el mantenimiento de los equipos, de acuerdo con estos objetivos. De esta forma se obtiene un plan de mantenimiento genérico en la empresa que luego hay que desarrollar. El desarrollo de este plan supondrá, como punto fundamental, concretar una serie de políticas a llevar a cabo para los activos considerados críticos. A este mismo nivel, otra serie de acciones pueden concretarse sobre aspectos que tengan que ver, por ejemplo, con los requisitos sobre habilidades y tecnologías a utilizar para la mejora de la eficacia y eficiencia de mantenimiento a un nivel micro, pero que requieren de inversiones de consideración. En un segundo lugar, las acciones a nivel táctico deben determinar la correcta asignación de los recursos de mantenimiento (habilidades, materiales, equipos de pruebas y medida, etc.) para la concesión del plan de mantenimiento. Como resultado, un programa detallado será materializado con todas las tareas a desarrollar, con los correspondientes recursos asignados para la realización de las mismas. Además, durante el proceso detallado de planificación y programación de las necesidades de mantenimiento, este nivel de actividad en la empresa

debe desarrollar competencias que le permitan discriminar entre diferentes opciones de recursos a su disposición (de diferente coste), que pueden ser asignados para realizar una determinada tarea en un activo específico (por ejemplo, una máquina particular), el lugar idóneo de realización de la tarea y el tiempo de comienzo y ejecución. Lo anterior detallará de forma explícita las políticas de mantenimiento a nivel táctico.

Las acciones a nivel operativo deben asegurar que las tareas de mantenimiento se completan de forma adecuada por los técnicos seleccionados, en el tiempo acordado, siguiendo los procedimientos reseñados y utilizando las herramientas adecuadas. Como resultado de lo anterior, el trabajo se realizará y se recogerán los datos correspondientes para ser introducidos en el sistema de información para la gestión. Los procedimientos a nivel operativo serán necesarios para las actividades preventivas, reparaciones y diagnóstico complicado de fallos.

2.2. MODELO PROPUESTO DEL PROCESO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

A continuación se concreta lo anteriormente comentado de forma sencilla y práctica, pensando siempre en facilitar a los gestores de mantenimiento la aplicación de los conceptos anteriores. Se presenta entonces un modelo genérico (Crespo, 2007) propuesto para la gestión de mantenimiento, que tiene en cuenta e integra muchos de los modelos encontrados en la literatura hasta la fecha, o de los empleados en la práctica en empresas de amplia tradición y excelencia en este campo (Pintelon and Gelders, 1992; y Vanneste and Van Wassenhove, 1995).

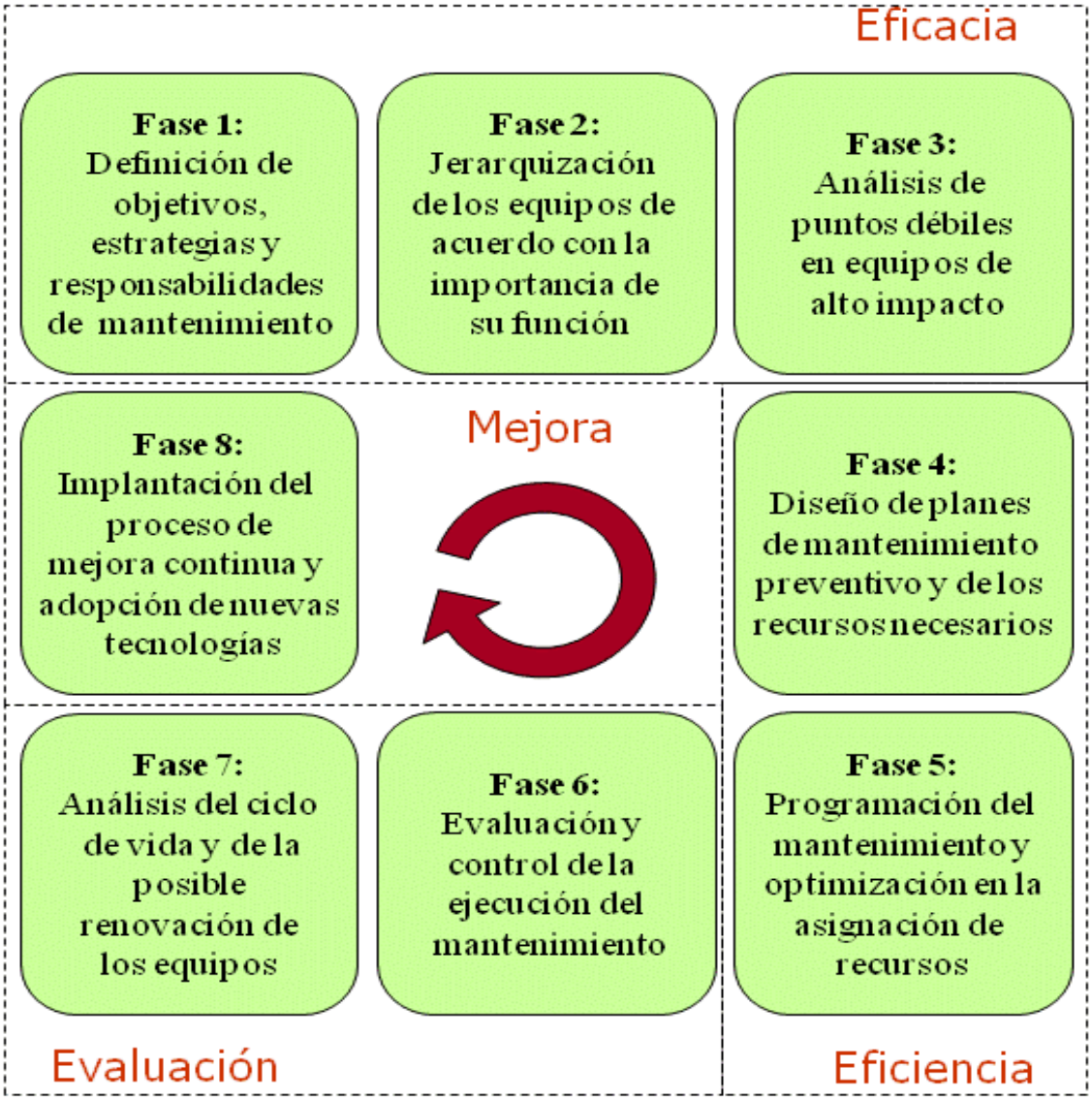


Figura 1: Modelo propuesto del proceso de Gestión de Mantenimiento

Fuente: Crespo, 2007

El modelo está compuesto por ocho bloques (Figura 1), que distinguen y caracterizan acciones concretas a seguir en los diferentes pasos del proceso de gestión de mantenimiento. Es un modelo dinámico, secuencial y en bucle cerrado que intenta caracterizar de forma precisa el curso de acciones a llevar a cabo en este proceso de gestión para asegurar la eficiencia, eficacia y mejora continua del mismo. Tal y como se indica en la figura de referencia, los primeros tres bloques condicionan la eficacia de la gestión, los

siguientes bloques aseguran la eficiencia de la misma y su mejora continua de la siguiente forma: los bloques 4 y 5 incluyen acciones para la planificación y programación del mantenimiento, incluyendo por supuesto la planificación de la capacidad del departamento de mantenimiento. Los bloques 6 y 7 están dedicados a la evaluación y control del mantenimiento y del coste de los activos a lo largo de su ciclo de vida. Finalmente el bloque 8 se centra en acciones para asegurar la mejora continua de la gestión. A continuación se describe de forma general los aspectos básicos de las diferentes técnicas de soporte del modelo propuesto:

- ***Fase 1. Técnicas para definir la estrategia de gestión de mantenimiento***.

  Para poder asegurar que los objetivos operacionales de mantenimiento y la estrategia no son inconsistentes con los objetivos generales del negocio (Gelders *et al*. 1994), podemos introducir e implementar en el área de mantenimiento técnicas como el Cuadro de Mandos Integral (The Balanced Scorecard – BSC, (Kaplan and Norton, 1992)). El BSC es específico para la organización para la cual es desarrollado y permite la creación de una serie de indicadores claves de rendimiento (KPIs) para medir el desempeño de la gestión de mantenimiento, que están alineados con los objetivos estratégicos de la organización. Al contrario que otras medidas convencionales que están orientadas al control, BSC coloca en el centro de su análisis la estrategia global y la visión del negocio para de esta forma enfatizar en la consecución de una serie de metas en el rendimiento de la organización. Estas metas se diseñan para alinear a la gente con una visión general para la organización. Las metas para los indicadores seleccionados se establecen siguiendo un proceso participativo que requiere de la involucración de agentes interiores y exteriores a la organización de mantenimiento, la participación de la dirección de la empresa, y de personal considerado clave en las

unidades operativas de la función mantenimiento, junto con usuarios claves del servicio. De esta forma, las medidas de rendimiento de la función mantenimiento se ligan con el éxito de la organización al completo (Tsang *et al*. 1999).

- ***Fase 2. Técnicas para jerarquizar los activos de producción***.

  Cuando los objetivos y estrategias de mantenimiento están definidos, existen un número importante de técnicas cualitativas y cuantitativas que nos ofrecen una base sistemática sobre la cual basar nuestras decisiones a la hora de clasificar los activos productivos en base a la importancia de su función para la consecución de los objetivos del negocio. Muchas de las técnicas cuantitativas utilizan algún tipo de variación de un concepto clave en esta fase que es la evaluación probabilística del riesgo y la obtención del número/índice probabilístico de riesgo del activo - PRA/PRN (Campbell and Jardine, 2001). Los activos con índice mayor serán los primeros en ser analizados. En muchas ocasiones no existen datos históricos en base a los cuales obtener estos índices, pero la organización de mantenimiento puede necesitar algún tipo de evaluación sobre la cual basar la toma inicial de decisiones. En estos casos es posible utilizar técnicas de naturaleza más cualitativa para ir así garantizando niveles adecuados iniciales de efectividad en las operaciones de mantenimiento. Una vez que las prioridades de activos están establecidas, es necesario definir una estrategia clara de mantenimiento a aplicar a cada categoría de activo. Por supuesto, esta estrategia será ajustada con el paso del tiempo a partir de ese momento.

- ***Fase 3. Herramientas para eliminar los puntos débiles en equipos/sistemas de alto impacto***.

  En activos críticos, antes de pasar a desarrollar las acciones a incluir en nuestros planes de mantenimiento, es muy conveniente analizar posibles fallos repetitivos, crónicos,

cuya frecuencia de aparición pueda incluso ser excesiva. Si somos capaces de encontrar, y eliminar si es posible, las causas de estos fallos podremos ofrecer un alto retorno inicial a la inversión en nuestro programa de gestión de mantenimiento. Entonces, nos será mucho más fácil acometer las fases sucesivas de análisis y diseño de planes de mantenimiento, que requieren de una importante inversión de tiempo y recursos. Existen diferentes métodos para realizar este análisis de puntos débiles en activos críticos, una de los más conocidos es el del análisis de causa raíz de fallos (Root Cause Failure Análisis - RCFA). Este método consiste en una serie de acciones que son tomadas para encontrar la razón por la cual existe un determinado modo de fallo y la forma de corregirla. Las causas por las cuales los fallos aparecen pueden clasificarse en físicas, humanas o latentes. La causa física es la razón por la que el activo falla, la explicación técnica del motivo por el cual el activo tuvo el problema o falló. La causa humana incluye los errores humanos (acción u omisión) que acaban dando lugar a causas físicas de fallo. Finalmente, las causas latentes incluyen a todas aquellas deficiencias organizacionales y de gestión que hacen posible que aparezcan errores humanos y que no se corrijan con el paso del tiempo (fallos en sistemas y procedimientos). Las causas latentes de fallo serán por lo general, nuestra mayor preocupación en esta etapa del proceso de gestión del mantenimiento.

- ***Fase 4. Soporte para la correcta definición de un plan adecuado de mantenimiento preventivo***.

  El diseño del plan de mantenimiento preventivo para un determinado sistema requiere la identificación de sus funciones y de la forma en que estas funciones dejan de cumplirse, además del establecimiento de una serie de tareas efectivas y eficientes de mantenimiento, basadas en consideraciones que tienen que ver con la seguridad y

economía de nuestro sistema. Un método formal para la consecución de este objetivo es el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability Centred Maintenance - RCM), (Moubray, 1997).

- ***Fase 5. Técnicas de optimización para la mejora de los programas de mantenimiento***.

  La optimización de los planes y programas de mantenimiento puede ser realizada para mejorar la eficacia y eficiencia de las políticas de mantenimiento que resultan de un diseño inicial del plan y del programa de tareas. Los modelos a aplicar dependen, por lo general, del horizonte de tiempo elegido para el análisis. De esta forma, los modelos con largo horizonte temporal se preocupan de aspectos relacionados con la capacidad de mantenimiento, el diseño del almacén de repuestos, o por ejemplo, los tiempos o intervalos más idóneos para realizar las tareas de mantenimiento. Los modelos de optimización a medio plazo pueden ocuparse, por ejemplo, de optimizar la secuencia de actividades a realizar en una parada importante de una planta, mientras que los modelos de mantenimiento cuyo horizonte temporal es de un más corto plazo se centran en la mejora de la asignación de recursos y en su control (Duffuaa, 2000). Los enfoques de modelado, analíticos y empíricos, son muy diversos. La complejidad del problema es a menudo muy alta y fuerza a la consideración de ciertas suposiciones para simplificar la resolución analítica de los modelos, o a veces reducir las necesidades computacionales.

- ***Fase 6. Control y supervisión de las operaciones de mantenimiento.***

  La ejecución de las actividades de mantenimiento, una vez diseñadas, planificadas y programadas, tienen que ser evaluadas y las desviaciones controladas para perseguir continuamente los objetivos de negocio y los valores estipulados para KPIs de mantenimiento seleccionados por la organización. Muchos KPIs, son construidos o se componen a partir de otra serie de indicadores técnicos y económicos de nivel más

bajo. Por lo tanto, es muy importante asegurarse que la organización captura datos convenientes y que esto los datos son correctamente agregado/desagregados según el nivel requerido de análisis de operaciones de mantenimiento (Crespo, 2007).

- ***Fase 7. Instrumentos para análisis de costes de ciclo de vida del activo y para su control.***

  Un análisis de costes de ciclo de vida calcula el coste de un activo durante su vida útil. El análisis de un activo típico podría incluir costes de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y retirada del equipo. Los costes de adquisición del equipo (que incluyen investigación, diseño, prueba, producción y construcción) son por lo general obvios, pero el análisis de costes de ciclo de vida depende crucialmente de valores derivados de la fiabilidad. Por ejemplo del análisis de la tasa de fallos, del coste de las piezas de recambio, de los tiempos de reparación, de los costes de los componentes, etc. En resumen, un análisis de costes de ciclo de vida es importante para tomar decisiones en aspectos que principalmente están relacionados con la planificación de los costes en los programas de mantenimiento y en el proceso de adquisición de nuevos equipos (reemplazo o la nueva adquisición) (Campbell and Jardine, 2001).

- ***Fase 8. Técnicas para la mejora continua del mantenimiento***.

  La mejora continua de la gestión de mantenimiento será posible utilizando técnicas y tecnologías emergentes en áreas que se consideren de alto impacto como resultados de los estudios realizados en fases anteriores de nuestro proceso de gestión. Por lo que respecta a la aplicación de nuevas tecnologías de mantenimiento, el concepto "e-maintenance" emerge como componente del concepto "e –manufacturing" (Lee, 2003),

el cual promueve el beneficio de las nuevas tecnologías de la información y comunicación para crear entornos corporativos y distribuidos multi-usuario. "E-Maintenance" puede ser definido (Crespo and Gupta, 2006), como un soporte de mantenimiento que incluye recursos, servicios y gestión necesarios para permitir la ejecución de un proceso proactivo de toma de decisiones en mantenimiento. Este soporte no sólo incluye tecnologías de Internet (i.e. ICT, Web-based, tether-free, wireless, infotronic technologies) sino también, actividades "e-maintenance" (operaciones y procesos) como los de "e-monitoring", "e-diagnosis", "e-prognosis"…etc. Además de nuevas tecnologías para el mantenimiento, la participación de la gente de mantenimiento dentro del proceso de mejora será un factor crítico para el éxito. Desde luego, requerirán los niveles más altos de conocimiento, experiencia y educación (entrenamiento), pero al mismo tiempo, las técnicas simples que permitan la involucración de operadores en la realización de tareas de mantenimiento serán sumamente importantes para alcanzar los niveles más altos de calidad de mantenimiento y la eficacia total del equipo.

3. INFLUENCIA DEL ANÁLISIS DE COSTES A LOS LARGO DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO DE PRODUCCIÓN

En el caso particular de este trabajo de investigación, el mismo se concentra en el desarrollo de modelos de ACCV que permitan evaluar el impacto económico de la fiabilidad (costes por fallos); y que a su vez, se puedan utilizar dentro del modelo de gestión de mantenimiento propuesto (Figura 1), específicamente en la **Fase 7*: Instrumentos para análisis de costes de ciclo de vida del activo y para su control*.**

Para evaluar los costes asociados al Ciclo de Vida de un activo de producción, existen un conjunto de procedimientos que se agrupan en las denominadas: Técnicas de Análisis de Costes del Ciclo de Vida. La implementación temprana de las técnicas de análisis de costes permite evaluar de forma anticipada los potenciales problemas de diseño y cuantificar el potencial impacto en los costes a lo largo del ciclo de vida de los activos industriales (Durairaj and Ong, 2002). A continuación se presentan algunas definiciones básicas de Análisis de Coste de Ciclo de Vida:

Kirt and Dellisola (1996) define el ACCV como una técnica de cálculo económico que permite optimizar la toma de decisiones asociadas a los procesos de diseño, selección, desarrollo y sustitución de los activos que conforman un sistema de producción. La misma propone evaluar de forma cuantitativa todos los costes asociados al período económico de vida útil esperado, expresados en unidades monetarias equivalentes anualizadas (Dólares/año, Euros/año, Pesos/año).

Woodhouse (1991) define el ACCV como un proceso sistemático de evaluación técnico-económica, aplicada en el proceso de selección y reemplazo de sistemas de producción, que permite considerar de forma simultánea aspectos económicos y de fiabilidad, con el propósito de cuantificar el impacto real de todos los costes a lo largo del ciclo de vida de los activos (Dólares/año), y de esta forma, poder seleccionar el activo que aporte los mayores beneficios al sistema productivo.

La gran cantidad de variables que se deben manejar a la hora de estimar los costes reales de un activo a lo largo de su vida útil, generan un escenario de alta incertidumbre (Durairaj and Ong, 2002). La combinación entre inflación, aumento/disminución de los costes, reducción/incremento del poder adquisitivo, limitaciones de presupuesto, aumento de la competencia y otras características similares, ha generado una inquietud e interés acerca del

coste total de los activos. A menudo el coste total del sistema de producción no es visible, en particular aquellos costes asociados con: la operación, el mantenimiento, las pruebas de instalación, la formación del personal, entre otros.

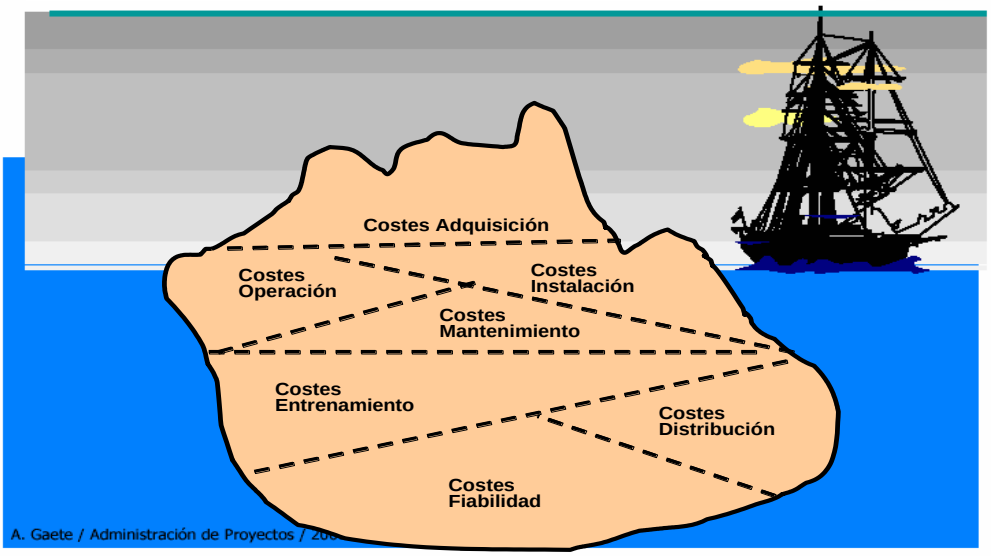


Figura 2: Incertidumbre en los Costes

Fuente: Gaete, 2001

En la figura 2 se puede observar una isla, en la cual a manera de símil, se ubican en la parte superior por encima del nivel del agua, los costes de menor incertidumbre (costes de estimación sencilla) y los costes de mayor incertidumbre, comienzan a aparecer por debajo del nivel del agua (costes cuya estimación es más complicada).

La situación económica actual se complica aún más con algunos problemas adicionales relacionados con la determinación real del coste del activo. Algunas de estas dificultades son (Fabrycky, 1997):

- A menudo los factores de costes se aplican incorrectamente. Los costes individuales se identifican mal y, muchas veces, se incluyen en la categoría equivocada: los costes

variables se tratan como fijos (y viceversa), los costes indirectos se tratan como directos, etc.

- Los procedimientos contables no siempre permiten una evaluación realista y oportuna del coste total. Además, a menudo es difícil (si no imposible) determinar los costes, de acuerdo con una base funcional.
- Muchas veces las prácticas presupuestarias son inflexibles con respecto al cambio de fondos de una categoría a otra, ó, de un año a otro.

Para evitar la incertidumbre en el análisis de costes, los estudios de viabilidad económica deben abordar todos los aspectos del coste del ciclo de vida. La tendencia a la variabilidad de los principales factores económicos, junto con los problemas adicionales ya enunciados, ha conducido a estimaciones erróneas, provocando diseños y desarrollos de sistemas de producción que no son aptos desde el punto de vista de coste-beneficio (Fabrycky, 1997). Se puede anticipar que estas condiciones empeorarán, a menos que los ingenieros de diseño asuman un mayor grado de consideración de los costes. Dentro del proceso dinámico de cambio, no sólo aumentan los costes de adquisición asociados a los nuevos sistemas, sino que también lo hacen de forma rápida los costes de operación y mantenimiento de los sistemas ya en uso. Esto es debido principalmente a una combinación de factores tales como (Fabrycky, 1997):

- Inexactitudes en las estimaciones, predicciones y previsiones de los eventos de fallos (fiabilidad), desconocimiento de la probabilidad de ocurrencia de los diferentes eventos de fallos dentro de los sistemas de producción en evaluación.
- Desconocimiento del comportamiento de los procesos de deterioro.
- Falta de previsión en los procesos de mantenimiento y desconocimiento de las técnicas modernas de gestión del mantenimiento.

- Cambios de ingeniería durante el diseño y desarrollo.
- Cambios en la propia construcción del sistema.
- Cambios en los patrones de producción esperados.
- Cambios durante la adquisición de componentes del sistema.
- Contratiempos y problemas imprevistos.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS COSTES EN LAS DISTINTAS FASES DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

El coste del ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases, calculando el coste de estas funciones y aplicando los costes apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida. Para que esté completo, el coste del ciclo de vida debe incluir todos los costes del diseño, fabricación y producción (Ahmed, 1995). En los párrafos siguientes se resumen las características de los costes en las distintas fases del ciclo de vida del activo. Estas categorías y sus elementos constituyentes componen una estructura de desglose del coste que son mostrados en la figura 3.

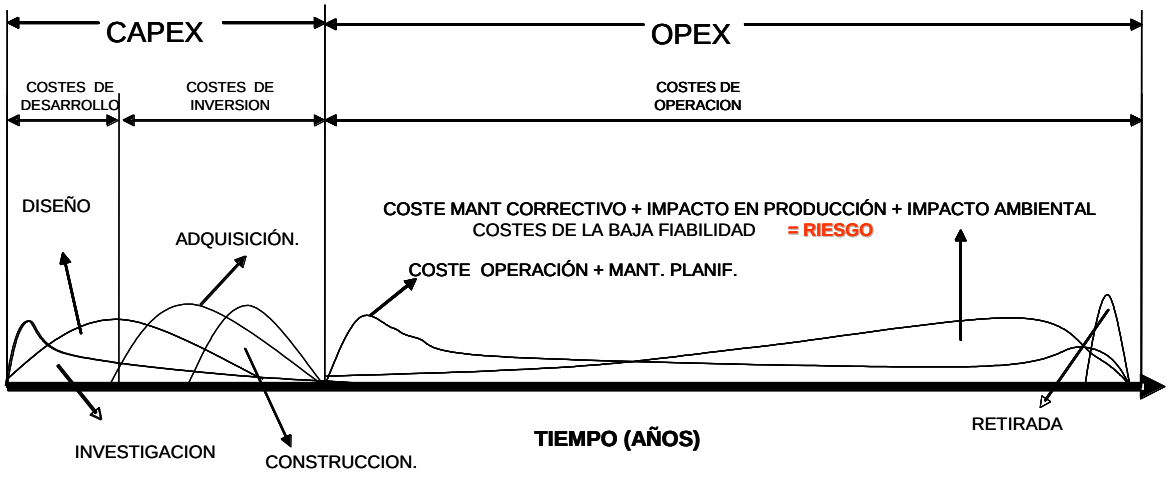


Figura 3: Estructura de Costes en el Ciclo de Vida de un activo
Fuente: Elaboración propia

Las categorías principales de costes presentadas en la figura anterior se describen a continuación (Levi and Sarnat, 1990):

- Costes de investigación, diseño y desarrollo: planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, requisitos de diseño e ingeniería, etc.
- Costes de producción, adquisición y construcción: ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística.
- Costes de operación y apoyo: insumos de operaciones del sistema de producción, mantenimiento planificado, mantenimiento correctivo (depende del Factor fiabilidad) y costes de apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema.
- Costes de retirada y eliminación: eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema y reciclaje de material.

Desde el punto de vista financiero, los costes generados a lo largo del ciclo de vida del activo son clasificados en dos tipos de costes:

- **CAPEX:** Costes de capital (diseño, desarrollo, adquisición, instalación, formación, manuales, documentación, herramientas e instalaciones para mantenimiento, repuestos de aseguramiento, retirada).
- **OPEX:** Costes operacionales: (mano de obra, operaciones, mantenimiento planificado, almacenamiento, contrataciones, mantenimiento correctivo - penalizaciones por eventos de fallos / baja fiabilidad).

3.2. IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL COSTE DE CICLO DE VIDA

Woodhouse (1991) plantea que para poder diseñar un sistema productivo eficiente y competitivo en el ámbito industrial moderno, es necesario evaluar y cuantificar de forma detallada los siguientes dos aspectos:

- Costes: aspecto que está relacionado con todos los costes asociados al Ciclo de Vida Total esperado del sistema de producción. Incluyendo: costes de diseño, producción, logística, desarrollo, construcción, operación, mantenimiento / preventivo-correctivo, retirada.
- Fiabilidad: factor que permite predecir la forma en que los procesos de producción pueden perder su continuidad operacional debido a eventos de fallos imprevistos y evaluar el impacto en los costes que ocasionan los fallos en la seguridad, el ambiente, las operaciones y la producción.

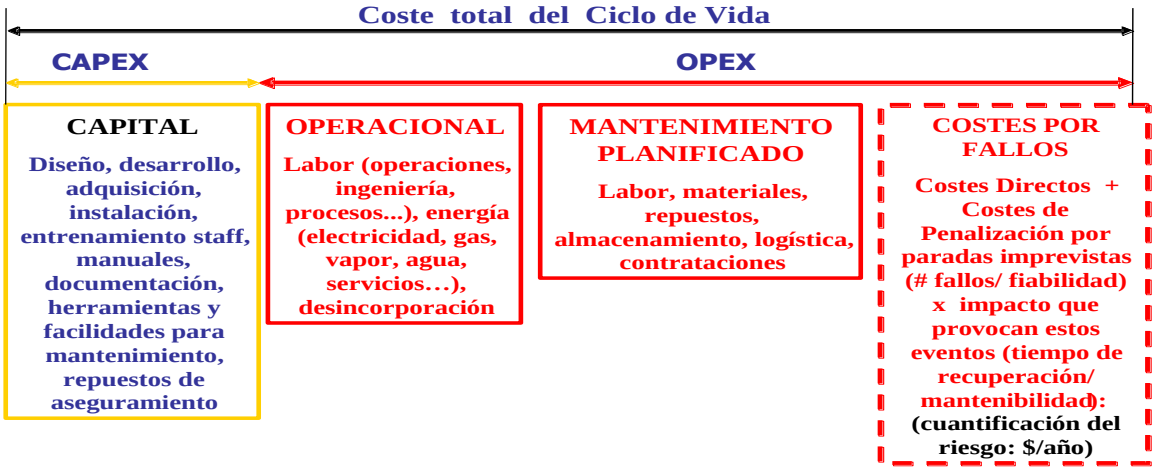


Figura 4: Impacto de la Fiabilidad en los Costes

Fuente: Elaboración propia

El aspecto clave del término fiabilidad está relacionado con la continuidad operacional. En otras palabras, podemos afirmar que un sistema de producción es "Fiable" cuando es capaz de cumplir su función de forma segura y eficiente a lo largo de su Ciclo de Vida. Ahora, cuando el proceso de producción comienza a estar afectado por una gran cantidad de eventos de fallos imprevistos - (baja fiabilidad), este escenario provoca altos costes, asociados principalmente con la recuperación de la función (costes directos) e impacto en el proceso de producción (costes de penalización) ver Figura 4.

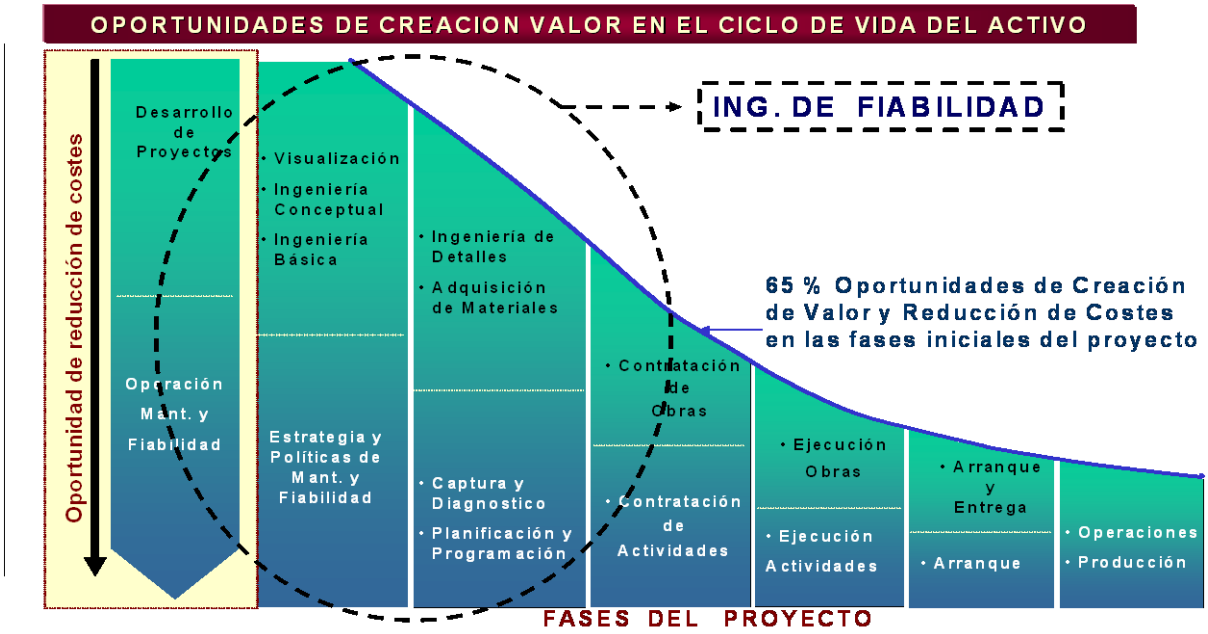


Figura 5: Oportunidades de reducción de Costes

Fuente: Dowlatshahi, 1992

Es importante mencionar que los resultados obtenidos de los Análisis de Coste de Ciclo de Vida, alcanzan su máxima efectividad durante las fases de: desarrollo inicial, visualización, ingeniería conceptual, básica y de detalles. Como se presenta en la figura 4, una vez que se ha completado el diseño, resulta difícil modificar sustancialmente los resultados económicos. Es más, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo

de vida deben plantearse específicamente durante las fases citadas anteriormente, si es que se quiere explotar totalmente las posibilidades de una ingeniería económica efectiva. Además, hay que tener en cuenta que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un activo o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar (65-85 % de oportunidades de creación de valor y reducción de costes, según Dowlatshahi, 1992), ver figura 5.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE EN EL ÁREA DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTES DE CICLO DE VIDA (ACCV)

1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

El concepto de ACCV comenzó a aplicarse de manera estructurada a partir de la década de los 70, específicamente en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, en el área de la aviación militar (Asiedu and Gu, 1998). Sin embargo la mayoría de las metodologías desarrolladas en esta etapa por el Departamento de Defensa, estaban orientadas hacia los procesos de compra y logística y no incluían la fase de diseño y producción. Una vez reconocida la necesidad de aplicar las metodologías de ACCV en los procesos de diseño, planificación y control de la producción, la *US National Science Foundation* patrocinó una conferencia en 1984, integrada por las principales academias y organizaciones industriales (Fleischer and Khoshnevis 1986; y Fabrycky 1987), en esta conferencia se identificaron y priorizaron 34 áreas de investigación, recibiendo las calificaciones más altas de priorización las áreas de: evaluación económica en fase de diseño, análisis de ciclo de vida y diseño asistido por ordenador (CAD - CAE: *computer-aided estimating*).

En el intento por mejorar el diseño de los activos y reducir los cambios en el tiempo, la denominada ingeniería concurrente (ingeniería de ciclo de vida) ha emergido como una técnica efectiva dentro del proceso de optimización de costes (Keys, 1990). La ingeniería de ciclo de vida considera que la fase inicial de desarrollo de un activo comienza con la identificación de la necesidad del mismo y posteriormente se generarán otras fases tales como diseño (conceptual, preliminar, detallado), producción (manufactura), utilización (operaciones, mantenimiento), soporte (logística) y retirada (sustitución).

Alting (1993) distingue 6 fases en el ciclo de vida de un activo: reconocimiento de la necesidad, desarrollo del diseño, producción, distribución, utilización y retirada. El proceso de ciclo de vida comienza con la definición de las diferentes tareas de producción para el diseño preliminar (Kriwet *et al*. 1995). Luego se desarrollan actividades tales como: plan de producción, trazado de planta, selección de equipos, definición de procesos de manufactura y otras actividades similares. Posteriormente, se considera la logística previa a la fase de diseño. Esta fase envuelve el desarrollo del soporte necesario para el diseño y las diferentes etapas de producción, el soporte a los posibles usuarios, el plan de mantenimiento previsto para el uso del activo y el proceso de retirada del activo. Dentro de la técnica ingeniería de ciclo de vida, Alting (1993) sugiere que se evalúen los siguientes aspectos: procesos de manufactura ágil, protección ambiental, condiciones de trabajo, optimización de recursos humanos y económicos.

1.1. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS COSTES

El total de costes de un activo desde su conceptualización hasta su retirada serán soportados por el usuario y tendrán un impacto directo sobre la comercialización del activo (Wilson, 1986). El total de costes de ciclo de vida se puede descomponer en diferentes categorías como se muestra en la figura 5. Esta descomposición es conocida como: estructura desglosada de costes (CBS - *cost breakdown structure*)**.** La CBS presentada en la figura 5, representa, en términos generales los principales tipos de costes asociados al proceso de diseño, producción, comercialización, utilización y retirada de un activo específico, aunque hay que tener en cuenta, que el nivel de desglose y las diferentes categorías de los costes dependerán de distintos factores tales como: la naturaleza del activo a desarrollar, el tipo de información disponible, el proceso de diseño y manufactura, las

variables económicas, el recurso humano, la tecnología existente, entre otros. Otro aspecto de interés está relacionado con la diferencia de importancia entre los distintos tipos de costes, por ejemplo, mientras la organización quiere conocer el total de los costes del activo a desarrollar, el diseñador solo está interesado en los costes que puede controlar. Algunos de los costes incurridos en la vida del activo son difíciles de visualizar en la fase de diseño, estos costes están relacionados con la forma en cómo la organización va a desarrollar el producto. De tal manera que la definición de los costes totales del ciclo de vida de un activo deben clasificarse en costes relacionados con el proceso global de desarrollo y en costes relacionados con el proceso de diseño del activo.

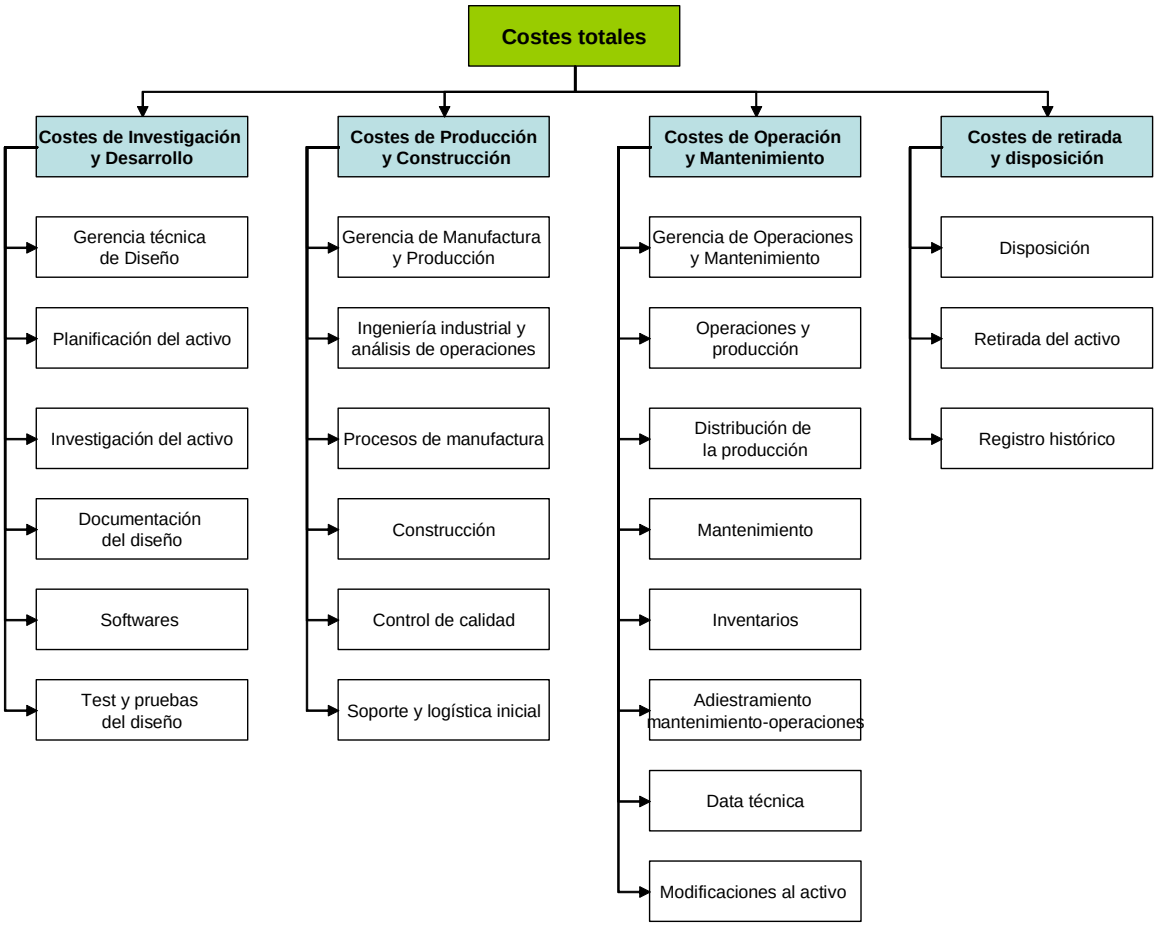


Figura 6: Estructura desglosada de costes (CBS - *cost breakdown structure*)

Fuente: Fabrycky and Blanchard, 1991

Algunas de las categorías de costes en las cuales el diseñador no estaría interesado serían los costes de producción y construcción del activo. En la fase de diseño, estos costes, no son relevantes para el diseñador, lo cual no significa que la organización deba obviar este tipo de costes, ya que más adelante, estos costes deberán ser considerados por las personas encargadas de producir y manufacturar el activo (Fabrycky and Blanchard, 1991 y Ahmed, 1995).

1.1.1. COSTES DE PRODUCCIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Los costes en esta fase están asociados con: actividades de producción (fabricación, montaje y pruebas), equipos de producción, gestión de producción, control de calidad y costes iniciales de soporte y logística (repuestos para el proceso de fabricación, pruebas y equipos de soporte de producción) (Fabrycky and Blanchard, 1991).

El objetivo principal de esta fase, consiste en determinar las secuencias y los procesos más eficientes para poder desarrollar el activo diseñado. Dos de las más exitosas metodologías desarrolladas para optimizar esta fase son: el diseño del proceso de montaje (*design for assembly* - DFA) desarrollado por Boothroyd and Dewhurst (Dewhurst and Boothroyd, 1984; Boothroyd, 1994) y el método de evaluación de montaje (*assembly evaluation method* - AEM) desarrollado por Hitachi (Miyakawa and Ohashi, 1986). Estos métodos evalúan las diferentes opciones de diseño de manufactura y estiman de forma numérica el proceso de producción que genera los menores costes de montaje.

1.1.2. COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costes en esta etapa, afectan especialmente a los usuarios que utilizan el activo desarrollado y están asociados a costes de: operación, energía, insumos y materia prima,

mantenimiento preventivo y correctivo, *overhaul*, diseño y modificaciones de ingeniería, logística de repuestos, adiestramiento y cualquier otro coste que se genere a lo largo del ciclo de vida del activo (Fabrycky and Blanchard, 1991).

Los costes de operación y soporte son los más significativos del ciclo de vida de un activo y adicionalmente, son los más difíciles de predecir. En algunos casos, estos costes podrían llegar a exceder hasta 10 veces más los costes iniciales de adquisición (Wilson, 1986). Un aspecto importante en esta etapa, está relacionado con la disponibilidad que debe tener el activo para cumplir con las expectativas de producción del usuario. En relación a la disponibilidad, el activo debe diseñarse de tal forma que pueda ser mantenido en el menor tiempo y coste posible sin afectar de forma negativa las características de fiabilidad y seguridad del activo diseñado. En la mayoría de los procesos de producción cada minuto en que el activo este fuera de servicio, representa pérdidas financieras para el usuario. En este escenario el tiempo es "coste", de tal forma que las actividades de mantenimiento deben ejecutarse de forma rápida (tiempos de reparación cortos) y eficiente para poder cumplir con los niveles de disponibilidad requeridos por el usuario (Smith and Babb, 1973 y Ruff and Paasch, 1993).

1.1.3. COSTES DE RETIRADA

Los costes de esta etapa se relacionan específicamente con actividades de conversión de materiales y manejo de recursos energéticos, estas actividades generan desperdicios que son liberados al ambiente. El consumo de energía, la polución del aire y la gestión de los residuos en la actualidad son temas de interés mundial y son el centro de debates públicos, de tal forma que en el futuro, los sistemas de producción para poder ser competitivos

deberán desarrollar procesos y tecnologías de producción que sean ambientalmente limpias (Weule, 1993).

En algunos países, el proceso de toma de conciencia ha comenzado a surgir a partir de la creación y aplicación de nuevas leyes medioambientales. Un ejemplo de esta situación está reflejado en la nueva legislación ambiental de los países de la comunidad Europea, la cual es un ejemplo a seguir y está sustentada en el siguiente principio: quién ocasioné daños al ambiente tendrá que pagar por la limpieza de estos daños (Zussman *et al.* 1994).

Un análisis completo de los costes de ciclo de vida debe incluir todas las actividades que se van a desarrollar durante el proceso de retirada de los activos: disposición y limpieza de residuos, control de emisiones al ambiente, saneamiento ambiental de la zona de producción, gestión y almacenamiento de productos de desecho, etc., actividades que conceptualmente son saludables pero que en la práctica son difíciles y engorrosas de ejecutar, ver (Navinchandra, 1991; Zust and Wagner, 1992; Benda *et al*. 1993; Tipnis, 1993; Zussman *et al*. 1994; y Sullivan and Young, 1995). Adicionalmente, procedimientos sobre las actividades de retirada de un activo y datos sobre la gestión de los residuos ambientales son escasos, no son fáciles de conseguir y no hay un consenso sobre cómo medir el impacto de los costes en esta etapa del proceso de producción (Glantsching, 1994). Un estudio interesante relacionado con la etapa de retirada se puede ver en con detalles en (Zussman *et al*. 1994). Como resultado de esta investigación, se definen los siguientes procesos dentro de la etapa de retirada del activo - ver figura 7:

- Reciclaje: consiste en reutilizar a través procedimientos específicos, los desperdicios ó los derivados de la materia prima, dentro del propio proceso de manufactura o como productos que pueden ser utilizados en otros procesos de producción (Yan and Gu, 1995).

- Reprocesado: consiste en actividades de restauración y reconstrucción que permiten que activos que han perdido su función, puedan recuperar la misma y sean capaces de funcionar a niveles de eficiencia muy similares a los que tenían en su estado original (como nuevos) (Yan and Gu, 1995).
- Reutilización: consiste en reutilizar dentro del propio proceso de producción o en otro que lo requiera, los productos de desecho en su estado original (Yan and Gu, 1995).
- Disposición segura de desechos: consiste en la eliminación a través de procedimientos seguros, de los productos de desecho que no se pueden recuperar (Ishii *et al.* 1994).

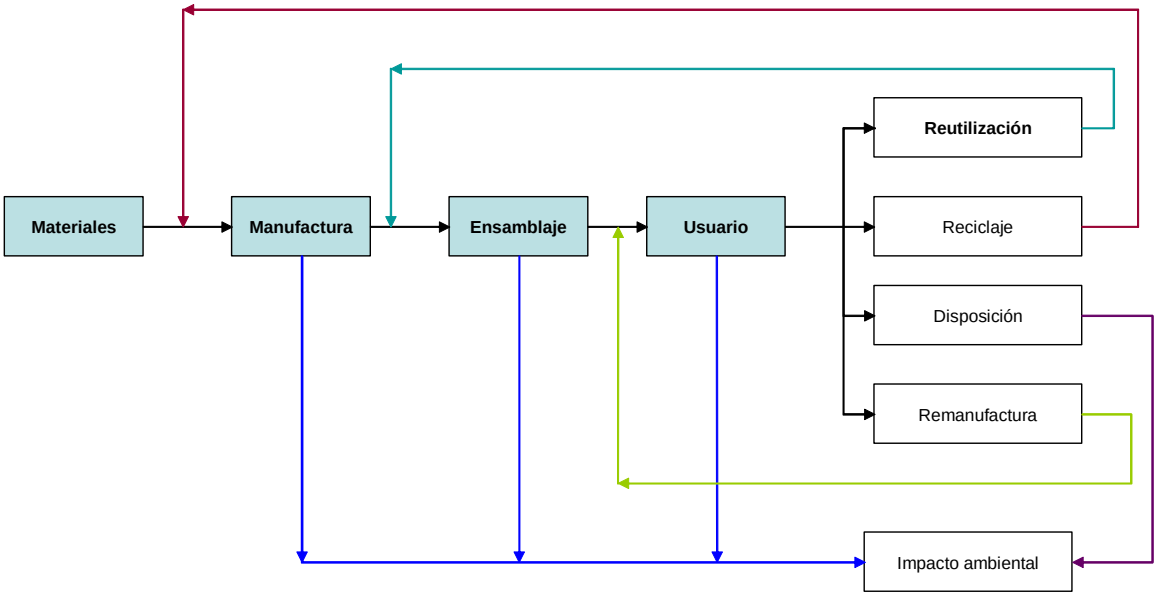


Figura 7: Ciclo de vida del activo y el proceso de retirada

Fuente: Adaptada por (Ishii *et al.* 1994)

Los costes para reciclar, reutilizar y desincorporar, son un factor de alto impacto dentro del análisis de los costes totales de ciclo de vida de un activo de producción, estos aspectos se discuten en detalle en: Jovane *et al*. (1993), Scheuring *et al*. (1994), Kriwet *et al.* (1995) y Zussman *et al*. (1994).

1.2. PROCESO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCV

Tradicionalmente, los aspectos de costes y de diseño han sido considerados y evaluados como dos procesos separados. En el caso del diseño, se considera como objetivo principal el diseñar el mejor activo posible y en el caso de los costes, se considera como objetivo principal el minimizar los costes de diseño y producción. Sin embargo hay que tener en cuenta, que ambos procesos tienen en realidad objetivos comunes. Estos son: desarrollar un activo que cumpla y satisfaga de forma eficiente la necesidad de los usuarios y que a su vez sea competitivo desde el punto de vista económico (Noble and Tanchoco, 1990).

Como se mencionó anteriormente, durante la fase de diseño se consumen entre el 65-85 % del total de los costes del ciclo de vida de un activo, según Dowlatshahi, 1992. Las técnicas de ACCV proveen de una estructura metodológica que permite cuantificar los costes a lo largo del ciclo de vida de un activo: diseño, desarrollo, producción, operación, logística, retirada. A finales de los años 60, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos fue la primera organización en promover el uso de las técnicas de ACCV, con el fin de incrementar la efectividad del análisis de costes en sus procesos de aprovisionamiento y logística (Shields and Young, 1991). Algunos de los principales procedimientos de ACCV utilizados durante este tiempo por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos son discutidos en detalle en las siguientes referencias: Metzler (1974), Gansler (1974), Earles (1974), Dixon and Anderson (1976), Caver (1979) y Dighton (1980). Previo a la década del 70, el concepto de integración de los aspectos de diseño con los modelos económicos costes recibió muy poca atención. Pugh (1974), fue uno de los primeros en hacer mención de que era necesario proveer de información económica a los diseñadores. La importancia de los modelos de costes en la fase de diseño también ha sido destacada por varias autoridades en el área de costes tales como Boothroyd and Dewhurst (1983a),

Ehrlenspiel (1987), Wierda (1988) y Alting (1993). A través de la temprana implementación de las técnicas de ACCV, no solo se puede influir sobre el diseño final sino que también se puede contribuir a la reducción de costes mediante la identificación previa (en fase de diseño) de las diferentes categorías de costes y mediante la definición del impacto que podrían traer las modificaciones realizados sobre el diseño original.

Existen diferentes facetas dentro del diseño y desarrollo de un activo que pueden ser estudiadas mediante el uso de modelos de ACCV. Hay que tener mucho cuidado en el uso y en la aplicación de las técnicas de ACCV ya que su relativa fácil implementación, podría orientar el proceso de toma de decisiones relacionados con los costes por caminos erróneos (Fabrycky and Blanchard, 1991). Un paso importante al inicio del proceso de implantación de un ACCV consiste en definir de forma clara cuál es el objetivo básico del proceso de evaluación de costes, según Blanchard (1979), las técnicas de ACCV se pueden utilizar en la evaluación de los siguientes procesos:

- Alternativas de sistemas de producción
- Alternativas de sistemas de mantenimiento, tipos de actividades de mantenimiento (preventivo vs. correctivo), mantenimiento por condición
- Alternativas de configuraciones de diseño: esquemas de operación, diagnóstico, niveles de fiabilidad y mantenibilidad, estandarización de repuestos, esquemas de monitorización
- Alternativas de sistemas de control y automatización
- Alternativas de procesos de producción: continua vs. discontinua
- Alternativas de sistemas de logística, compra y selección de diferentes proveedores
- Alternativas de canales de distribución, métodos de transporte y gestión de la producción, localización de almacenes

- Alternativas de manejo de residuos, desechos, reciclaje
- Alternativas de procesos de sustitución y reemplazo
- Alternativas de sistemas de protección y seguridad

Uno de los aspectos de mayor importancia para los diseñadores durante un ACCV es que ellos puedan identificar la relación que existe entre los posibles costes de producción y operación (ya desarrollado el activo) y las decisiones a tomar en la fase de diseño. De tal forma, resulta necesario el desarrollar herramientas que le permitan al diseñador de forma rápida y precisa realizar estimaciones económicas de sus decisiones durante la fase de diseño (Westney, 1983; Fleischer and Concebís, 1986; Ehrlenspiel, 1987; y Wierda, 1988).

1.2.1. ESTIMACIÓN DE COSTES

Dependiendo de la fase del análisis y del nivel de detalle esperado, un modelo ACCV podría ser un simple sumatorio de costes relacionados o una cadena de cálculos matemáticos de costes. La aplicación del ACCV durante la fase de diseño conceptual, normalmente requiere del uso de técnicas financieras básicas (Fabrycky and Blanchard, 1991). Por otro lado, el análisis de costes de ciclo de vida a ser desarrollado durante la fase de diseño detallado, requerirá de técnicas financieras de mayor complejidad. Justamente durante esta etapa es necesario descomponer los costes a niveles de detalle mínimo, con el fin de conseguir soluciones de diseño que sean fáciles de implementar. Esta descomposición de costes es conocida como estructura desglosada de costes (CBS – *cost breakdown structure*) (French, 1990). Este proceso descompone el activo a desarrollar por funciones y cuantifica los costes totales sumando los costes individuales de cada una de las funciones estimadas. Un ejemplo de esto se mostró en la figura 6, modelos de funciones de costes pueden ser asignados a distintas categorías que permitan al final estimar de forma

fácil el coste total de ciclo de vida de un activo. En términos generales los procesos de estimación de costes pueden ser clasificados como: estimaciones paramétricas, estimaciones análogas y estimaciones detalladas (Asiedu and Gu, 1998).

1.2.1.1. ESTIMACIONES PARAMÉTRICAS

Las estimaciones de costes paramétricas se generan a partir de la aplicación de ecuaciones que permiten describir la relación entre los costes previstos de un sistema y los atributos medidos de un sistema diseñado, operado y retirado (Dean, 1995). La estimación paramétrica está basada en la predicción de la relación existente entre los costes de las diferentes actividades inherentes al desarrollo del activo. Por ejemplo, actividades de coste de diseño y producción, se pueden predecir con el uso de técnicas de regresión lineal en función datos históricos de costes y la información técnica. El método de regresión lineal correlacionará los costes e información técnica con los atributos técnicos designados estimando la relación existente entre los diferentes tipos de costes. Las estimaciones de costes paramétricas en algunos casos requieren grandes esfuerzos en el proceso de recolección de la información necesaria para poder estimar la relación entre los costes. Una vez conseguida esta información, la estimación es normalmente rápida (Greves and Schreiber, 1993). Fad and Summers (1988) sugieren que los modelos paramétricos son técnicas que pueden ayudar mucho a estimar los costes en la fase de diseño. Además, existen una gran variedad de modelos paramétricos que han sido desarrollados y están disponibles de forma comercial. Uno de los modelos de mayor uso es el *Lockheed Martin PRICE system,* el cual ha sido utilizado por la *British Aerospace Corporation* (Daschbach and Apgar 1988), *European Space Agency* (Greves and Schreiber 1993) y la NASA (Dean 1989).

1.2.1.2. ESTIMACIONES POR ANALOGÍA

Las estimaciones por analogía simplemente identifican los costes de un activo que haya sido desarrollado previamente y que sea similar al que se va a diseñar, y por comparación, considera estos costes de diseño y producción como los costes del futuro activo (Shields and Young, 1991). La efectividad de esta estimación depende en gran manera de la habilidad para identificar correctamente las posibles diferencias entre el proceso de desarrollo previo y el proceso de diseño futuro (Greves and Shreiber, 1993). La principal desventaja de este método es que está sustentado en un proceso cualitativo y depende mucho de la habilidad del responsable de realizar la comparación. En este escenario, las personas que tienen el compromiso de comparar los procesos de diseño, deben tener muchos conocimientos relacionados con el activo a diseñar, con el fin de poder identificar las diferencias existentes entre los procesos de diseño y de esta manera, proponer los ajustes en la estimación de los costes.

1.2.1.3. ESTIMACIONES DETALLADAS

Las estimaciones detalladas de costes permiten que las organizaciones evalúen y clasifiquen sus costes por tipos específicos de actividades (Greves and Shreiber, 1993). En términos generales, estos modelos cuantifican las horas de labor, las cantidades específicas de recursos y materia prima y estiman los costes directos de desarrollo de un activo. Por otra parte, este tipo de estimaciones propone que una cantidad predeterminada sea asignada como costes indirectos. Para implantar un modelo de estimación detallada, primero se tiene que determinar el tiempo necesario para ejecutar cada actividad, luego se tiene que definir el coste por hora de los equipos utilizados y de la mano de obra y posteriormente se obtiene el coste total de la actividad a partir de la suma de los costes unitarios por hora multiplicado

por el tiempo total necesario para la ejecución de la actividad (Shields and Young, 1991). Tiempos estandarizados de producción y operación por tipo de industria, se pueden conseguir en bases de datos locales, nacionales e internacionales, o a través de expertos. En el caso de un activo en el cual los procesos de producción sean sencillos y estables es decir que no existan grandes variaciones en el tiempo, esta metodología de costes es muy apropiada (Fabrycky and Blanchard, 1991). Las principales dificultades de este método se presentan a continuación (Weirda, 1988):

- Se necesita determinar o recopilar tiempos estándares de ejecución de actividades
- Los tiempos de ejecución de las actividades se mantienen constantes, lo cual en la realidad no siempre sucede así
- Se necesita manejar una gran cantidad de información para estimar las horas y los costes por actividad
- Se requiere de gran habilidad y experiencia para determinar las distintas actividades a ser evaluadas

1.2.2. PRECISIÓN EN EL PROCESO DE ESTIMACIÓN DE COSTES

Los costes estimados son el elemento necesario para tomar decisiones relacionadas con la forma de cómo se va a gastar el dinero en el futuro. Esto implica que las decisiones de costes se realicen en escenarios de incertidumbre. La precisión de tales estimaciones es inversamente proporcional al tiempo que transcurre entre el momento de la estimación de costes y el momento en que los costes proyectados son ejecutados (Ostwald, 1974).

La falta de precisión dentro del proceso de estimación de costes, es un factor de alto impacto que puede llegar a generar consecuencias financieras desastrosas durante el desarrollo de un activo industrial. En términos generales, la falta de precisión en la

estimación de los costes de desarrollo de un activo se puede presentar en dos escenarios, el caso en el que se estimen costes por debajo de los costes reales, o el caso contrario, que es cuando los costes estimados sean superiores a los costes reales (Daschbach and Apgar, 1988).

Cuando los costes estimados están por debajo de los costes reales, los planes iniciales de contratación de mano de obra, la ejecución de ciertas actividades claves y la compra de ciertos materiales y equipos, resultan inalcanzables. Sin embargo, los planes de desarrollo previstos con anterioridad deberán continuar, en este escenario, se tendrá que recurrir a procesos de replanificación y reorganización que normalmente implicarán un incremento de los costes, pero que a su vez permitirán que se cumplan con las metas y objetivos de los proyectos asociados al desarrollo del activo (Daschbach and Apgar, 1988). En el otro escenario, cuando los costes estimados son superiores a los costes reales, se esperaría que se incrementen los beneficios del proyecto, lo cual normalmente no ocurre y lo que sucede con el dinero que queda disponible es que el mismo se gasta. Sólo en el caso de que la organización tenga un control estricto sobre los costes, este dinero sobrante no será gastado, lo cual en la práctica resulta muy poco probable (Daschbach and Apgar, 1988).

En el proceso de estimación de costes asociado al desarrollo de un activo, existe una gran cantidad de requerimientos que varían de forma considerable dependiendo de la fase del programa de diseño y producción, de la complejidad de los procesos y de la profundidad de las técnicas de análisis (Fabrycky and Blanchard, 1991). Durante las fases iniciales de desarrollo y diseño conceptual, los datos disponibles son limitados y los análisis de costes dependen normalmente de modelos paramétricos, el nivel de precisión de los datos en esta etapa se encuentra entre el 20 y el 50% (Creese and Moore, 1990). En las fases intermedias de diseño, se tiene mayor información disponible y se pueden utilizar modelos análogos

de costes que permitan comparar los costes de activos similares, el nivel de precisión de los datos en esta etapa es entre el 70 y el 85% (Creese and Moore, 1990). En la fase de diseño a nivel de detalle, se cuenta con toda la información del activo y se conocen las especificaciones de producción, los procesos de fabricación y las necesidades de apoyo y logística. En esta fase es muy frecuente utilizar modelos detallados de estimación de costes, estando el nivel de precisión de los datos en esta etapa entre el 85 y el 95% (Creese and Moore, 1990).

2. MODELOS DE ACCV

El uso de los técnicas de ACCV se ha incrementado de forma notable debido principalmente al desarrollo de un gran número de metodologías, las cuales proponen métodos para evaluar distintos diseños o vías alternativas de acción, con el objetivo de poder escoger la mejor forma de emplear los recursos humanos y económicos disponibles al momento de desarrollar un sistema de producción (Durairaj and Ong, 2002). Es importante mencionar que los resultados obtenidos de los Análisis de Costes de Ciclo de Vida, alcanzan su máxima efectividad durante el diseño conceptual y preliminar. Una vez que se ha completado el diseño, resulta difícil modificar sustancialmente los resultados económicos. Es más, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben plantearse específicamente durante la fase de diseño del activo, si es que se quiere explotar totalmente las posibilidades de una ingeniería económica efectiva. Hay que tener en cuenta que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un activo o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar (Dowlatshahi, 1992). El cálculo del coste del ciclo de vida se debe aplicar en todas las fases de diseño del sistema: diseño, desarrollo, producción, construcción uso operativo y apoyo logístico. Al principio del ciclo

de vida se debe poner énfasis en los aspectos de costes, al establecer ciertos factores cuantitativos de coste como requisitos propios del diseño. A medida que transcurre el ciclo de vida, el coste se emplea como un parámetro de importancia en la evaluación de configuraciones de diseño alternativos y en la selección de una solución de preferencia. Por tanto, los datos de costes se preparan basándose en las características establecidas del diseño y la producción, y se usan en el desarrollo de la estimación del coste del ciclo de vida. A su vez, estas estimaciones se comparan con los requisitos iniciales para determinar el grado de cumplimiento y la necesidad de una acción correctiva. En esencia, el coste del ciclo de vida evoluciona desde una serie de estimaciones cualitativas hasta una metodología relativamente refinada, empleándose como una herramienta de gestión orientada a la optimización del proceso de toma de decisiones (Durairaj and Ong, 2002).

La mayoría de los modelos de ACCV se han estructurado en tres líneas de desarrollo: conceptuales, analíticos y heurísticos de simulación avanzada (Kolarik, 1980 y Gupta, 1983). Los modelos conceptuales consisten en un conjunto de relaciones hipotéticas expresadas en una estructura de costes cualitativa. Estos son modelos muy flexibles y pueden ajustarse a rangos de costes muy amplios. Su uso no requiere de información detallada de costes y generalmente su aplicación se limita a ACCV de nivel muy macro (Kolarik, 1980). Los modelos analíticos están basados en relaciones matemáticas estructuradas bajo ciertas premisas de diseño, que permiten estimar los costes característicos de un activo a ser desarrollado. Las suposiciones hechas para desarrollar estos modelos tienden a restringir y limitar la capacidad de estimación de los costes, adicionalmente, estos son de gran aceptación y uso, debido a la gran cantidad de métodos analíticos diseñados a nivel comercial (Kolarik, 1980). Los modelos heurísticos de simulación compleja utilizan métodos matemáticos avanzados muy bien estructurados y

su implantación se realiza a través de sistemas de computación que tienen una gran potencia de cálculo. Los modelos heurísticos no son tan comunes como los analíticos y normalmente se utilizan para casos muy específicos, en los cuales se requiere que la estimación de los costes tengan una gran exactitud y un bajo nivel de incertidumbre (Kolarik, 1980). Según McNichols (1979), existen cuatro problemas básicos en el manejo de la incertidumbre a ser tratados con mucho cuidado por cualquier modelo de estimación de costes. Estos problemas se mencionan a continuación: la caracterización de los costes individuales, la caracterización de las familias de costes, la caracterización de los grupos de familias de costes y el tratamiento de la dependencia entre las diferentes categorías de costes. McNichols (1979; 1983) y Tzemos and Dippold (1986) sugieren que la disminución de la incertidumbre en el proceso de estimación de costes, mejorará en la medida en que los métodos heurísticos de simulación avanzada se desarrollen y sean capaces de ajustarse a las necesidades y exigencias de las organizaciones modernas.

La aplicación de métodos heurísticos avanzados en el proceso de ACCV, propician una perspectiva amplia que permite asociar estrechamente el campo de la economía aplicada a la ingeniería, con el diseño, el desarrollo y la operación de los activos. En resumen, el uso adecuado de las técnicas de ACCV, ayudará a minimizar la incertidumbre en el proceso de estimación de los costes y permitirá (Fabrycky and Blanchard, 1991):

- Identificar el coste total del ciclo de vida útil de los activos (nuevos/usados).
- Comparar diferentes opciones (costes de ciclo de vida) y seleccionar de forma óptima el activo más adecuado.
- Identificar todas las actividades que a lo largo del ciclo de vida generarán costes de tipo u otro. Esto incluye funciones asociadas con la planificación, investigación y desarrollo,

prueba y evaluación, producción o construcción, distribución del producto, uso operativo del sistema, mantenimiento preventivo/correctivo – impacto por fiabilidad, apoyo logístico, etc.

- Relacionar cada actividad identificada anteriormente con una categoría específica de coste dentro de una estructura organizada de costes.
- Establecer dentro de la estructura de costes, el factor de descuento apropiado para convertir el dinero en valor actual (presente), donde el valor actual refleja el poder adquisitivo general del dinero en el momento de la decisión (esto es, hoy). Los costes evaluados, expresados en términos de valor presente, permitirán una comparación directa de año en año, ante posibles cambios inflacionarios, efectos económicos de acuerdos contractuales con los proveedores, cambios en los niveles de precios, etc. Aspectos que pueden causar confusión durante la evaluación de diferentes alternativas.
- Proyectar al futuro elementos individuales del coste dentro de cada categoría de coste, año a año a lo largo del ciclo de vida, según corresponda. El resultado debe ser un flujo de costes en valor presente. Los valores modificados constituyen un nuevo flujo de costes y reflejan los costes realistas tal como se anticipan para cada año del ciclo de vida. Estos costes pueden utilizarse directamente para la preparación de las necesidades presupuestarias futuras, ya que reflejan las necesidades monetarias reales, anticipadas para cada año durante el ciclo de vida.

2.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL ACCV. DESARROLLO DE MODELOS BÁSICOS (EQUIPOS NO REPARABLES)

En esta etapa se considerarán los modelos básicos de estimación de la fiabilidad para

equipos y/ó componentes no reparables, es decir, aquellos equipos y/ó componentes que al ocurrir el evento de fallo, el mismo (equipos y/ó componentes) se sustituyen por uno nuevo (tienen un solo ciclo de vida útil). El proceso de estimación de los costes totales por fiabilidad (fallos imprevistos), se caracterizan de la siguiente forma (Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993; Ruff and Paasch, 1993; y Woodhouse, 1993):

- Costes por penalización:
  - *Downtime* (indisponibilidad de producción), pérdidas de oportunidad/producción diferida, pérdidas de producción, pérdidas operacionales, impacto en la calidad, impacto en seguridad y ambiente.
- Costes directos por mantenimiento correctivo:
  - Mano de obra: costes directos relacionados con la mano de obra (propia o contratada) en caso de una acción no planificada.
  - Materiales y repuestos: costes directos relacionados con los consumibles y los repuestos utilizados en caso de una acción no planificada.

El impacto en los costes que genera un activo de baja fiabilidad está asociado directamente con el comportamiento de los siguientes dos índices:

El tiempo promedio entre fallos (*MTBF*) (mean time between failures):

MTBF = tiempos operacionales / número de fallos (1)

Efecto: sistemas con *MTBF* cortos, reflejan valores de fiabilidad bajos y un alto número de fallos.

El tiempo promedio para reparar (*MTTR*) (mean time to repair):

MTTR = tiempos de reparación / número de fallos (2)

Efecto: sistemas con *MTTR* largos, reflejan valores de Mantenibilidad bajos (sistemas en los que se necesita gran cantidad de tiempo para poder recuperar su función).

Según Woodhouse (1991), el aumento de los costes es ocasionado, muchas veces ocasionado por la falta de previsión ante la aparición inesperada de eventos de fallos, escenario provocado básicamente por el desconocimiento y por la falta de análisis en la fase de diseño de los aspectos relacionados con la fiabilidad. Esta situación trae como resultado un incremento en los costes de operación (costes que no fueron considerados en un principio) afectando de esta forma a la rentabilidad del proceso de producción.

Algunas de las metodologías de ACCV propuestas en los últimos años, ver (Asiedu and Gu, 1998) proponen análisis sencillos que permiten cuantificar el impacto económico que generan los fallos dentro de un sistema de producción. A continuación se describen tres de estos modelos básicos de evaluación del impacto del factor "Fiabilidad" en el ACCV de un activo.

2.1.1. MODELO DE TASA DE FALLOS CONSTANTE

En términos generales, el Modelo de Tasa de Fallos Constante propone el siguiente esquema para calcular el impacto de los costes de fallos en el ACCV, (Woodward, 1997; Woodhouse, 1993; y Riddell and Jennings, 2001):

1. Establecer las condiciones operacionales del sistema. Describir los modos de operación del sistema (carga completa, media carga, sin carga) y las capacidades de producción a satisfacer.
2. Establecer los factores de utilización. Estos factores deben indicar el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación.
3. Identificar las distintas opciones a ser evaluadas. Seleccionar las alternativas existentes que pueden cubrir con las necesidades de producción exigidas.

4. Identificar para cada alternativa todas las categorías de costes básicos: inversión inicial, desarrollo, adquisición, mantenimiento planificado, reposición.
5. Determinar para cada alternativa los costes por fiabilidad. Identificar los principales tipos de fallos y la frecuencia de ocurrencia en el tiempo, la cual será un valor constante a lo largo del ciclo de vida del activo (este aspecto se detalla más adelante).
6. Determinar los costes críticos. Identificar las categorías de costes de mayor impacto, y analizar los factores que propician los altos costes (proponer estrategias de control).
7. Calcular todos los costes en valor presente (P) para cada alternativa. Definir el factor de descuento y el período de vida útil esperado y estimar los costes totales en valor presente por cada alternativa evaluada.
8. Seleccionar la alternativa ganadora. Comparar los costes totales de las alternativas evaluadas y seleccionar la opción que menor coste genere para el período de vida útil esperado.

En relación a la cuantificación de los costes por fiabilidad (punto 5), este modelo propone evaluar el impacto de los principales fallos sobre la estructura de costes de un sistema de producción, a partir de un proceso sencillo, el cual se resume a continuación: primero, se determinan los tipos de fallos más importantes, luego, se asigna a cada tipo de fallo un valor constante de frecuencia de ocurrencia por año (este valor no cambiara a lo largo de la vida útil esperada), posteriormente, se estima el impacto en costes por año, generado por los fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, y finalmente, se estima en valor presente a una tasa de descuento específica, el impacto total en costes de los fallos para los años de vida útil esperada. A continuación se detallan los pasos a seguir para estimar los costes por fallos según el Modelo de Tasa de Fallos Constante:

1. Definir los tipos de fallos (*f*). Dónde $f = 1 \ldots F$ para F tipos de fallos.

2. Definir la frecuencia de fallos esperada por año δ_f . Se expresa en fallos por año. Esta frecuencia se asume como un valor constante por año para el ciclo de vida útil esperado y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_f = \frac{N}{T} \tag{3}$$

Dónde:

N = número total de fallos

T = número total esperado de años de vida útil

3. Calcular los costes asociados a cada tipo de fallo C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.
4. Calcular los costes totales por fallos por año TCP_f ($/año), que se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f=1}^{F} C_f \times \delta_f \tag{4}$$

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

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} \tag{5}$$

Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se adicionarían el resto de costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.). Se calcula el coste

total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

2.1.2. MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINISTA

El Modelo de Tasa de Fallos Determinístico propone una estructura de evaluación de costes que permite estimar de forma detallada las diferentes categorías de costes a lo largo del ciclo de vida útil esperado, ver detalles en (Fabrycky and Blanchard, 1991). Los pasos a seguir para aplicar este modelo son:

1. Definir el proceso de producción a evaluar.
2. Identificar las posibles alternativas que cubrirán las demandas de producción – sistemas a evaluar.
3. Definir para cada alternativa la estructura detallada de costes. El método clasifica los costes en cinco categorías:
    - Costes de investigación y desarrollo.
    - Costes de construcción y producción.
    - Costes de mantenimiento preventivo.
    - Costes de mantenimiento correctivo - costes por fiabilidad, causados por eventos de fallos imprevistos (este paso detalla más adelante).
    - Costes de desmontaje – retirada.
4. Cuantificar para cada alternativa los costes por cada una de las categorías definidas.
5. Identificar para cada alternativa los factores que más contribuyen en el incremento de los costes por categoría.
6. Proponer estrategias para cada alternativa que ayuden a minimizar los costes de mayor

impacto (análisis de sensibilidad) incluyendo las recomendaciones propuestas para disminuir el impacto de los factores de mayor contribución a los costes.

7. Cuantificar para cada una de las alternativas evaluadas, los costes totales en valor equivalente anual (A), para una tasa de descuento (i) y un número de años de servicio esperado (t).
8. Seleccionar la alternativa que genera los costes más bajos a lo largo del período de vida útil esperado.

Este método es bastante similar al Modelo de Tasa de Fallos Constante y se diferencia básicamente en dos aspectos:

- Los costes totales son estimados en valores anuales equivalentes (A).
- Las frecuencias de fallos pueden variar de forma determinística, en los diferentes períodos de tiempo que conforman el ciclo de vida útil esperado.

En relación a la cuantificación de los costes por fiabilidad (punto 3), este modelo proponen evaluar el impacto de los fallos de la siguiente manera:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos (*f*). Dónde $f = 1 \ldots F$, para F tipos de fallos.
2. Definir de forma determinista para cada tipo de fallo, la frecuencia de ocurrencia esperada para cada período de tiempo $\delta_f{}^t$. La frecuencia de fallos por año, se considera determinista, y se define a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia de personal de mantenimiento y operaciones. En este caso el diseñador tiene que realizar una búsqueda de información relacionada con la frecuencia con que ocurren al año, cada uno de los tipos de fallos definidos.
3. Calcular los costes por fallos c_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de respuestos,

mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

4. Calcular los costes por tipo de fallo por año $CP_f{}^t$ (\$/año).

$$CP_f{}^t = \delta_f{}^t \times C_f \tag{6}$$

5. Convertir a valor presente los costes por tipo de fallo por año $PCP_f{}^t$. Dado un valor Futuro $CP_f{}^t$ se calcula el valor presente para cada año (t) a una tasa de descuento (i).

$$PCP_f{}^t = CP_f{}^t \times \frac{1}{(+i)^t} \tag{7}$$

6. Calcular los costes totales por tipos de fallos en valor presente $PTCP_f$. Todos los costes por tipo de fallos por año en valor presente son sumados hasta el número de años de vida útil esperado (T).

$$PTCP_f = \sum_{t=1}^{T} PCP_f^t \tag{8}$$

7. Calcular el coste total equivalente anual *AETC* (\$/año). Dado un valor presente $PTCP_f{}^t$, calcular su coste total equivalente anual para el número de años de vida útil esperado (T) y la tasa de descuento definida (i).

$$AETC = PTCP_f \times \frac{i \times (+i)^T}{(+i)^T - 1} \tag{9}$$

En el caso de que existieran más de un tipo de fallo, el procedimiento a seguir es el mismo, es decir, se repetirían los pasos explicados anteriormente y al final, se sumarían todos los costes generados por los distintos tipos de fallos en un coste total anual equivalente. El valor anual equivalente obtenido, reflejará el coste anual promedio que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por los

distintos tipos de fallos, a lo largo del ciclo de vida analizado y con el factor de descuento utilizado. Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se le adicionan el resto de los costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.), se calcula el coste total en valor equivalente anual y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

2.1.3. MODELO DE TASAS DE FALLOS POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

En términos de estructura de análisis de costes, el Modelo de Tasas de Fallos por Distribución de Weibull, es similar al método de Tasas de Fallos Constante, la principal diferencia radica en el proceso de estimación de los costes por fiabilidad, ya que, estos costes se estiman con frecuencias de fallos calculados a partir de la distribución probabilística de Weibull, (Zohrul Kabil, 1987; Ebeling, 1997; y Willians and Scott, 2000). En relación al proceso de cuantificación de los costes por fiabilidad, este modelo propone evaluar el impacto de los fallos de la siguiente manera:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos. Así para un equipo determinado habrá $f = 1 \ldots\ldots F$ tipos de fallos.
2. Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_f. Esta información será recopilada por el diseñador a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia de personal de mantenimiento y operaciones.
3. Calcular los costes por fallos c_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

4. Determinar de forma probabilística la frecuencia de fallos esperados δ_f con la Distribución de Weibull. Este proceso se realiza a partir de los tiempos entre fallos t_f registrados por tipo de fallo. Notación:

   δ_f = frecuencia de fallos = fallos/tiempo

   t_f = tiempo entre fallos

   MTBF = mean time between failures - value of expected time between failures = tiempo promedio entre fallos - valor de tiempo esperado entre fallos = tiempo/fallos. El *MTBF* es el inverso de la frecuencia:

   Γ = función Gamma, los Valores tabulados de la función Γ aparecen en numerosos textos, véase por ejemplo Kececioglu, 1991

   α = vida característica, tiempo/fallos, se calcula a partir de los tiempos entre fallos

   β = parámetro de forma, se calcula a partir de los tiempos entre fallos

   Si la variable aleatoria t_f tiene distribución de Weibull de parámetros $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, su función de densidad viene dada por:

$$f(t_f) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t_f^{\beta-1}}{\alpha}\right) \times e^{-\frac{t_f}{\alpha}^{\beta}} \quad \text{, para } t_f \tag{10}$$

   Cuya media μ es:

$$\mu = \alpha \times \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{11}$$

   La varianza es:

$$\sigma^2 = \alpha^2 \times \left(\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right) \tag{12}$$

Para el análisis la variable aleatoria está representada por el tiempo que el sistema funciona sin que se produzca un fallo, donde el *MTBF* es el valor esperado de la variable aleatoria t_f; es igual que la media μ.

$$MTBF = \mu = \alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{13}$$

Los parámetros α y β, se fijan a partir de las siguientes expresiones, recopiladas por Navas (1997):

$$\alpha = \exp\left(\frac{\frac{N}{\sum_{i=1}^{N} A_{fi}} - \left(\sum_{i=1}^{N} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi}\right) \right)}{\left(\sum_{i=1}^{N} A_{fi} - Ln\left(t_{fi}\right) \right) - \left(\sum_{i=1}^{N} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi}\right) \right)} \right) \tag{14}$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_{fi}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{Ln\left(t_{fi}\right)} - \left(-Ln\left(\alpha\right)\right)} \tag{15}$$

Dónde,

$$A_{fi} = \frac{Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1 - \frac{fi}{N+1}} \right) \right)}{Ln\left(t_{fi}\right)} \tag{16}$$

En las expresiones (14), (15) y (16), *fi* es el número del evento de fallo específico, *N* es el número total de fallos evaluados y t_{fi} es el tiempo medido entre fallos en cuestión. Con los valores de los parámetros α y β se obtiene la frecuencia de fallos:

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \tag{17}$$

5. Calcular los costes totales por fiabilidad por año TCP_f (\$/año), generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f}^{F} \delta_f \times C_f \tag{18}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante los años de vida útil esperada.

6. Calcular los costes totales en valor presente $PTCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f, se estima el valor monetario actual correspondiente a la vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión a utilizar para estimar los $PTCP_f$ en valor presente se muestra a continuación:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} \tag{19}$$

El valor presente $PTCP_f$, representa la cantidad de dinero – hoy, que se necesita para poder cubrir con los gastos anuales esperados por los fallos durante (T) años. Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se le adicionan el resto de los costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.), se calcula el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

2.2. CASOS DE ESTUDIO

Los datos de fallos presentados en la tabla 1 serán evaluados utilizando cada uno de los modelos explicados anteriormente. Esta información fue recopilada del historial de fallos de un compresor de Gas de la compañía Petróleos de Venezuela. En resumen en este equipo

ocurrieron 24 eventos de fallos durante sus 10 años de vida útil. A continuación se presentan los tiempos entre fallos t_f en meses:

5	7	3	7	2	4	3	5	8	9	2	4	6	3	4	2	4	3	8	9	4	4	7	4

Tabla 1: Tiempos entre fallos

2.2.1. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS CONSTANTE

Este modelo propone evaluar el impacto de los costes de los fallos de la siguiente forma:

- Se definen los tipos de fallos.

  Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.

- Se define la frecuencia de fallos esperada por año δ_f , se usa la expresión (3).

  N = 24 eventos, T = 10 años

  $$\delta_f = 2{,}4 \frac{fallos}{año}$$

  Esta frecuencia se asume como un valor constante durante el período total de vida útil estimado T = 10 años.

- Se calculan los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

  $$C_f = 5000 \frac{\$}{fallo}$$

- Se calculan los costes totales por fallos por año TCP_f , se usa la expresión (4):

  $$TCP_f = 12.000 \frac{\$}{año}$$

- Se calculan los costes totales por fallo en valor presente $PTCP_f$, se usa la expresión (5) para un período T = 10 años y para una tasa de descuento i = 10%.

$$PTCP_f = 73.734{,}80\$$$

2.2.2. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINISTA

Este modelo propone evaluar el impacto de los costes de los fallos de la siguiente forma:

- Se definen los tipos de fallos.

  Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.

- Se define de forma determinística para cada tipo de fallo, la frecuencia de ocurrencia esperada por período de tiempo $\delta_f{}^t$. La frecuencia de fallos por año es definida a partir del historial de fallos presentado en la tabla 2 y su estimación se presenta en la siguiente tabla:

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_f{}^t$ = ***fallos /año***	2	3	3	1	3	3	3	1	3	2

Tabla 2: Frecuencia de fallos por año

- Se calculan los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

$$C_f = 5000 \frac{\$}{fallo}$$

- Se calculan los Costes por tipo de fallo por año $CP_f{}^t$, se usa la expresión (6). Los $CP_f{}^t$ para un período estimado de vida útil de 10 años, se presentan en la siguiente tabla:

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$CP_f{}^t =$	5.000	15.000	15.000	5.000	15.000	15.000	15.000	5.000	15.000	10.000

Tabla 3: Costes por año por fallos: $/año

- Se convierte a valor presente los costes por tipo de fallo por año $PCP_f{}^t$, se usa la expresión (7). Dado un valor Futuro $CP_f{}^t$ se calcula el valor presente para cada año (t) a una tasa de descuento i = 10%. Los resultados en valor presente se muestran en las siguiente tabla:

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$PCP_f{}^t =$	4.545,4	12.396,7	11269,7	3415,1	9313,8	8467,1	7697,4	2332,5	6361,5	3855,4

Tabla 4: Costes en valor presente por fallo: $

- Se calculan los costes totales por tipos de fallos en valor presente $PTCP_f{}^t$, se usa la expresión (8). Todos los costes por tipo de fallos por año en valor presente son sumados hasta el número de años de vida útil esperado T = 10 años.

$$PTCP_f^t = 69.954{,}67\$$$

- Se calcula el coste total equivalente anual *AETC*, se usa la expresión (9). Dado un valor presente $PTCP_f{}^t$, se calcula su coste total equivalente anual para el número de años de vida útil esperado T = 10 años y la tasa de descuento definida i = 10%.

$$AETC = 11.335{,}977 \frac{\$}{año}$$

2.2.3. CASO DE ESTUDIO - MODELO DE TASA DE FALLOS POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Este modelo propone evaluar el impacto de los costes de los fallos de la siguiente forma:

- Se definen los tipos de fallos.

  Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.

- Se determinan para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados t_f, ver tabla 1.

- Se calculan los costes por fallos c_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

$$C_f = 5000 \frac{\$}{fallo}$$

- Se determina de forma probabilística la frecuencia de fallos esperados δ_f con la Distribución de Weibull para los tiempos entre fallos mostrados en la tabla 1. Se usan las expresiones (13, 14, 15, 16 y 17).

$$MTBF = \mu = \alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

α = 5,3964 meses / fallo

β = 2,515

$$MTBF = 5{,}3964 \frac{meses}{fallos} \times \Gamma(,3976)$$

$\Gamma(1{,}4)$ = 0,88726, Γ - valores tabulados entablas de la función Γ ver (Kececioglu, 1991).

$MTBF$ = 4,788 meses / fallo

$$\delta_f = 0{,}2088 \frac{fallos}{mes} = 2{,}506 \frac{fallos}{año}$$

- Se calculan los costes totales por fiabilidad por año TCP_f , se usa la expresión (18).

$$TCP_f = 12.530{,}00 \frac{\$}{año}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante los 10 años de vida útil esperada.

- Se calculan los costes totales en valor presente $PTCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f , usar la expresión (19), para un período T = 10 años y una tasa de descuento i = 10%.

$$PTCP_f = 76.991{,}426\$$$

2.3. LIMITACIONES DE LOS MODELOS EVALUADOS

Un sumario de los resultados obtenidos a partir de los tres modelos evaluados, se muestran en la tabla 5. Así mismo, en la tabla 6, se describen las limitaciones encontradas en cada modelo en relación al proceso de estimación del impacto de la fiabilidad en el ACCV.

Resultados por Modelo del impacto de los costes por fallos	Consideraciones
Tasa de Fallos Constante: Costes totales por fallos en valor presente: $PTCP_f = 73.734{,}80\$$	Valor que representa la cantidad de dinero (hoy) que se necesita para cubrir los costes anuales esperados por fallos en 10 años de vida útil a una tasa de descuento del 10%. En este ejercicio se puede visualizar que la frecuencia de fallos por año a lo largo de los 10 años, se cuantifica de forma constante, es decir se considera que la frecuencia de fallos no cambia con el paso del tiempo y de esta forma el impacto en los costes por fallos será un valor constante por año. El proceso de estimación de la frecuencia de fallos propuesto por este modelo es muy básico y se estima dividiendo el total de fallos esperados entre el número de años de vida útil.
Tasa de Fallos Determinista: Coste total equivalente anual por fallos: $AETC = 11.335{,}98\frac{\$}{año}$	Valor equivalente anual de costes, que representan el valor promedio anual de dinero que se necesitará para cubrir los problemas por fiabilidad causados por los eventos de fallos, durante los 10 años de vida útil, a una tasa de descuento del 10%. En este modelo se puede visualizar que la frecuencia de fallos estimada no es constante y su estimación cambia cada año a lo largo del ciclo de vida útil según el patrón esperado de comportamiento de los fallos por año.
Tasa de Fallos por Distribución de Weibull: Costes totales por fallos en valor presente: $PTCP_f = 76.991{,}42\$$	La interpretación de este valor es similar a la descrita en el Modelo de Tasa de Fallos Constante, valor que representa la cantidad de dinero (hoy) que se necesita para cubrir los costes anuales esperados por fallos en 10 años de vida útil a una tasa de descuento del 10%. La diferencia esta en que la frecuencia de fallos se estima con el tiempo promedio entre fallos (MTBF) calculado a partir de la distribución de Weibull. Este modelo también propone mantener constante la frecuencia de fallos para cada uno de los años esperados de vida útil.

Tabla 5: Análisis de los resultados de Costes de Fallos por Modelo

Limitaciones de los Modelos evaluados	Aspectos principales
• **Modelo de Tasa de Fallos Constante:** La principal limitación está asociada con la forma de cálculo del impacto de la fiabilidad en los costes, ya que este modelo propone que se consideren frecuencias de fallos constantes a lo largo del ciclo de vida del activo a ser evaluado, lo cual, en la realidad no ocurre de esta manera, ya que normalmente, la frecuencia de fallos cambia a medida que van pasando los años por la influencia de diferentes factores (operaciones, mantenimiento preventivo, calidad de materiales, etc.).	Este modelo es usualmente utilizado en fases iniciales del diseño de sistemas de producción, ya que el mismo proporciona estimaciones rápidas de costes que pueden orientar el proceso de selección de diferentes alternativas. Este método no debería ser utilizado para tomar decisiones concluyentes, ya que el mismo genera un alto nivel de incertidumbre en la estimación de los costes por fiabilidad, lo cual puede hacer que se tomen decisiones erróneas, sobre todo en el caso que los costes de fiabilidad sean una categoría crítica (alto impacto en costes por fallos imprevistos).
• **Modelo de Tasa de Fallos Determinista:** Este modelo es un poco más realista que el anterior, ya que exige al diseñador que identifique patrones de comportamiento de frecuencia de fallos de los sistemas que está evaluando, aunque sigue siendo un modelo básico ya que la estimación de la frecuencia de fallos es totalmente determinista y depende directamente de la capacidad del diseñador en conseguir buena información, sobre el comportamiento de los diferentes tipos de fallos que pueden ocurrir en los sistemas a evaluar. La principal limitación de este método esta asociada con el proceso de toma de información de frecuencia de fallos. En el caso de que la calidad de los datos estadísticos de fallos recopilados no sea buena, es muy probable que no se hagan estimaciones de costes reales y se puedan tomar decisiones equivocadas en el proceso de selección de activos. Es importante que la información sobre los fallos se obtenga a partir de históricos y bases de datos estadísticas bien sustentadas. En su defecto, se podría obtener información, a partir de encuestas dirigidas a personas que tengan una gran experiencia en las áreas de operaciones, procesos y mantenimiento, y que a su vez, estén relacionadas con las alternativas a ser evaluadas.	Este modelo es usualmente utilizado en fases intermedias del proyecto, ya que para esta etapa se tiene mayor claridad sobre las distintas alternativas a evaluar y se puede orientar de forma más eficiente la búsqueda de información relacionada con los tipos de fallos y su frecuencia de ocurrencia. Este método podría ser utilizado para tomar decisiones concluyentes en el caso de que la información recopilada para estimar los costes de fiabilidad provenga de historiales de fallos y bases de datos de buena calidad.
• **Modelo de Tasa de Fallos por Distribución de Weibull:** Este modelo estima el valor esperado de variable aleatoria evaluada (tiempo promedio entre fallos - MTBF) en función de la distribución de Weibull. A partir del cálculo del MTBF, el modelo cuantifica la frecuencia de fallos por año y los costes de estos fallos. Las principales limitaciones de este método son: - El impacto de costes anuales por fallos se mantiene constante a largo de cada uno de los años de vida útil esperada del activo. - El modelo restringe el análisis de fiabilidad, exclusivamente al uso de la distribución de Weibull, excluyendo otras distribuciones estadísticas existentes tales como: Log Normal, Exponencial, Gamma, etc., las cuales también podrían ser utilizadas para calcular los MTBF y las frecuencias de fallos.	Este modelo es usualmente utilizado en fases finales del proyecto, ya que para esta etapa se tiene información más precisa y ajustada a la realidad operacional de las distintas alternativas a evaluar. En cuanto a la recopilación de datos de fiabilidad, el diseñador debe exigir a los fabricantes, información detallada sobre los tipos de fallos más importantes y las frecuencias de ocurrencia. Este método se utiliza para tomar decisiones concluyentes, sobre todo cuando la información recopilada para estimar los costes de fiabilidad proviene de datos de buena calidad.

Tabla 6: Limitaciones de los modelos evaluados para estimar el impacto de la Fiabilidad en los ACCV

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE COSTES DE FIABILIDAD ESTIMADOS CON DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE FALLOS SELECCIONADAS A PARTIR DEL TEST DE KOLMOGOROV – SMIRNOV (EQUIPOS NO REPARABLES)

1. ASPECTOS BÁSICOS DEL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV

El test de Kolmogorov - Smirnov es una de las pruebas de mayor uso en el campo estadístico. Esta técnica, permite verificar si una distribución se ajusta o no adecuadamente al comportamiento real de un conjunto de datos (Kececioglu, 1991). Una vez que se ha validado el ajuste de la distribución seleccionada con el comportamiento real de los datos, entonces se podrá tomar con seguridad la hipótesis de que los datos recopilados se pueden representar a través del modelo matemático respectivo a la distribución evaluada. El test calcula la distancia máxima entre la frecuencia acumulada de los tiempos observados y la frecuencia teórica acumulada provista por el modelo seleccionado. Si la distancia entre estas frecuencias acumuladas es igual o mayor, se puede concluir que el modelo seleccionado no provee un buen ajuste para los datos evaluados, más detalles sobre el test se pueden encontrar en Kececioglu, 1991.

En términos de estructura de análisis de costes, el Modelo propuesto de Tasa de Distribución de Fallos seleccionada mediante el test de Kolmogorov - Smirnov, es parecido al método de Tasas de Fallos por Distribución de Weibull, la principal diferencia radica en el proceso de estimación de los costes por fiabilidad, ya que estos costes no se estiman directamente con la tasa de fallos obtenidas a partir de la Distribución de Weibull. Este modelo propone utilizar el test de Kolmogorov - Smirnov para evaluar los datos de tiempos entre fallos y tiempos fuera de servicio en las distribuciones estadísticas más

utilizadas en fiabilidad y mantenibilidad (Exponencial, Weibull y Log normal) (Kenecevic, 1993), y en función de la distribución que mejor se ajuste al test, se estimará: la frecuencia de fallos, los tiempos fuera de servicio y los costes por fiabilidad. En este caso no se selecciona a priori un tipo de distribución (por ejemplo la Distribución de Weibull, como en el apartado # 2.2.3), descartando la posibilidad de que otras distribuciones estadísticas puedan evaluar con mayor precisión el comportamiento de fiabilidad y mantenibilidad del activo que se está analizando.

1.1. MODELO PROPUESTO DE TASA DE DISTRIBUCIÓN DE FALLOS SELECCIONADA CON EL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV

En relación al proceso de cuantificación de los costes por fiabilidad, el Modelo de Tasa de Distribución de Fallos seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov, propone evaluar el impacto de los fallos de la siguiente manera:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos. Así para un equipo determinado habrá $f = 1 \ldots\ldots F$ tipos de fallos.
2. Aplicar el test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se explican de forma detallada cada uno de los pasos del test (Kececioglu, 1991):
   2.1. Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. Esta información será recopilada por el diseñador a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia de personal de mantenimiento y operaciones.
   2.2. Calcular el número total de tiempos operativos y tiempos fuera de servicio registrados - N.

2.3. Ordenar los t_{f_i} y los t_{fs_i} en forma creciente y asignar a cada uno de ellos una posición (i) en orden creciente desde 1 hasta N.

2.4. Calcular la probabilidad de fallo observada $Qo(i)$. Cada valor asignado a la posición (i) se divide entre N y se obtiene la probabilidad de fallo para cada (i).

$$Qo(i) = \frac{(i)}{N} \tag{20}$$

2.5. Calcular para cada t_{f_i} la probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ y para cada t_{fs_i} la probabilidad de recuperación de la función $F(t_f s_i)$, correspondiente a la distribución estadística evaluada. A continuación se presentan las expresiones de cálculo de probabilidad de fallo y probabilidad de recuperación:

Distribuciones	**Probabilidad de fallo acumulada** $F(t_{f_i})$ **Probabilidad de recuperación** $F(t_f s_i)$	**Parámetros***
Exponencial	$F(tf_i) = 1 - e^{-\lambda(tf_i)}$ $F(tfs_i) = 1 - e^{-\lambda(tfs_i)}$	$\lambda(tf_i, tfs_i) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} t(f_i, fs_i)}{N}}$, tasa de fallos y tasa de reparación
Weibull	$F(tf_i) = 1 - e^{\left(-\frac{tf_i}{\alpha}\right)^{\beta}}$ $F(tfs_i) = 1 - e^{\left(-\frac{tfs_i}{\alpha}\right)^{\beta}}$	α = vida característica β = parámetro de forma La estimación de los parámetros se realiza con las expresiones 14, 15 y 16 presentadas en el capítulo anterior, apartado # 2.1.3.
Log normal	$F(tf_i) = \frac{1}{\sigma_{tf_i}\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{tf_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(tf_i) - \mu_{tf_i}}{\sigma_{tf_i}}\right)^2} d(tf_i)$ $F(tfs_i) = \frac{1}{\sigma_{tfs_i}\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{tfs_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(tfs_i) - \mu_{tfs_i}}{\sigma_{tfs_i}}\right)^2} d(tfs_i)$	$\mu(tf_i, tfs_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln(tf_i, tfs_i)$, media logarítmica $\sigma(tf_i, tfs_i) = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(tf_i, tfs_i) - \mu(tf_i, tfs_i)^2\right)\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 7: Expresiones más comunes de probabilidad de fallo acumulado $F(t_{f_i})$ y probabilidad de recuperación $F(t_f s_i)$

* La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 7, se encuentra en la literatura de fiabilidad/mantenibilidad, por ejemplo (Navas, 1997; Knezevic, 1993; y Ebeling, 1997).

2.6. Calcular para cada t_{fi} y para cada t_{fsi} la diferencia en valor absoluto entre la probabilidad de fallo observada y la probabilidad de fallo acumulada, esta diferencia se denota como $D(tf_i), D(tfs_i)$:

$$D(tf_i) = \left| Q_{o(i)} - F(tf_i) \right| \quad (21)$$

$$D(tfs_i) = \left| Q_{o(i)} - F(tfs_i) \right| \quad (22)$$

2.7. Identificar las diferencias absolutas $D(tf_i), D(tfs_i)$ de mayor valor. Este valores se denominarán: $\boldsymbol{Dmáx}(tf_i)$ y $\boldsymbol{Dmáx}(tfs_i)$

2.8. Buscar los valores críticos $\boldsymbol{Dcr}(tf_i)$ y $\boldsymbol{Dcr}(tfs_i)$ de Kolmogorov - Smirnov, para el nivel de significancia requerido. Este valor se obtiene de la tabla de Kolmogorov - Smirnov con el valor de N y el nivel de significancia previamente asignado, ver valores críticos ***Dcr*** en la tabla 8.

2.9. Realizar la prueba de hipótesis, comparando los valores críticos: $\boldsymbol{Dcr}(tf_i)$ y $\boldsymbol{Dcr}(tfs_i)$ con los valores máximos obtenidos: $\boldsymbol{Dmáx}(tf_i)$ y $\boldsymbol{Dmáx}(tfs_i)$, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Si el ***Dmáx*** es menor que ***Dcr***, la distribución seleccionada es aceptada y representa el comportamiento estadístico de los datos evaluados para el nivel de significancia seleccionado.
- Si el ***Dmáx*** es igual o mayor que ***Dcr***, la distribución seleccionada "no" es aceptada y no representa el comportamiento estadístico de los datos evaluados para el nivel de significancia seleccionado.

N	Nivel de Significancia				
	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.575	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.424	0.510	0.454	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.557
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.405
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.293	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
> 35	1.07 / (N) ^1/2	1,14 / (N) ^1/2	1.22 / (N) ^1/2	1.36 / (N) ^1/2	1.63 / (N) ^1/2

Tabla 8: Valores críticos *Dcr* de Kolmogorov - Smirnov

Fuente: Kececioglu, 1991

2.10. Seleccionar para cada variable t_{f_i} y t_{fs_i}, la distribución cuyo valor máximo ***Dmáx*** haya sido el menor obtenido de cada una de las distribuciones evaluadas y que a su vez este valor también sea menor al valor crítico ***Dcr*** obtenido de la tabla de Kolmogorov - Smirnov para el valor de significancia respectivo.

3. Calcular los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes directos *Cdi* (mano de obra (*Cmo*), materiales (*Cmt*), repuestos (*Crp*)) y los costes de penalización *Cpe* (impacto operacional por fallos (*Cio*)). Los costes por fallos se estiman a partir de la siguiente expresión:

$$C_f = Cdi + Cpe \tag{23}$$

Dónde:

$$Cdi = \frac{Cmo + Cmt + Crp}{fallo} \tag{24}$$

$$Cpe = MTTR\left(\frac{horas}{fallo}\right) \times Cio\left(\frac{\$}{hora}\right) \tag{25}$$

Para el cálculo de los costes de penalización es necesario estimar el tiempo promedio de reparación (*MTTR*) correspondiente a la distribución seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov. Este proceso se realiza a partir de los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. A continuación se presentan las expresiones de cálculo de los tiempos promedios de reparación de las distribuciones más comunes:

Distribuciones	**Tiempos promedios de reparación *MTTR***	**Parámetros ***
Exponencial	$MTTR = \frac{1}{\lambda}$	$\lambda(tfs_i) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} tfs_i}{N}}$, tasa de reparación
Weibull	$MTTR = \alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	α = vida característica β = parámetro de forma Γ = función Gamma La estimación de los parámetros se realiza con las expresiones 14, 15 y 16 presentadas en el capítulo anterior, apartado # 2.1.3.
Log normal	$MTTR = e^{\left(\mu_{tfs_i} + \frac{\sigma fs_i^2}{2}\right)}$	$\mu(tfs_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln(tfs_i)$, media logarítmica $\sigma(tfs_i) = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(fs_i) - \mu(tfs_i)^2\right)\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 9: Expresiones más comunes de tiempos promedios de reparación – *MTTR*

* La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 9, se puede encontrar en la literatura de mantenibilidad, véase por ejemplo (Navas, 1997; Knezevic, 1993; y Ebeling, 1997).

4. Determinar la frecuencia de fallos esperados δ_f a partir del tiempo promedio entre fallos *(MTBF*) correspondiente a la distribución seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov. Este proceso se realiza a partir de los tiempos entre fallos t_{f_i} registrados por tipo de fallo. La frecuencia de fallos se estima a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \tag{26}$$

A continuación se presentan las expresiones de cálculo de los tiempos promedios entre fallos de las distribuciones más comunes:

Distribuciones	Tiempos promedios entre fallos *MTBF*	Parámetros **
Exponencial	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$	$\lambda(tf_i) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} tf_i}{N}}$, tasa de fallos
Weibull	$MTBF = \alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	α = vida característica β = parámetro de forma Γ = función Gamma La estimación de los parámetros se realiza con las expresiones 14, 15 y 16 presentadas en el capítulo anterior, apartado # 2.1.3.
Log normal	$MTBF = e^{\left(\mu_{tf_i} + \frac{\sigma f_i^2}{2}\right)}$	$\mu(tf_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln(tf_i)$, media logarítmica $\sigma(tf_i) = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(tf_i) - \mu(tf_i)^2\right)\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 10: Expresiones más comunes de tiempos medios entre fallos – *MTBF*

** La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 10, se puede encontrar en la literatura de fiabilidad, véase por ejemplo (Navas, 1997; Knezevic, 1993; y Ebeling, 1997).

5. Calcular los costes totales por fiabilidad por año TCP_f (\$/año), generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f}^{F} \delta_f \times C_f \tag{27}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante los años de vida útil esperada.

6. Calcular los costes totales en valor presente $PTCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f, se estima la cantidad de dinero actual (hoy) que se necesita disponer, para responder la anualidad del coste de fiabilidad durante los próximos años de vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión a utilizar para estimar los $PTCP_f$ en valor presente se muestra a continuación:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} \tag{28}$$

El valor presente $PTCP_f$, representa la cantidad de dinero - hoy, que se necesita para poder cubrir los gastos anuales esperados por fallos durante T años. Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se adicionan el resto de los costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.), se calcula el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones.

1.2. CASO DE ESTUDIO - MODELO PROPUESTO DE TASA DE DISTRIBUCIÓN DE FALLOS SELECCIONADA CON EL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV

A continuación se van a seguir los pasos descritos en sección anterior:

1. Se definen los tipos de fallos.

   Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.

2. Se aplica el test de Kolmogorov - Smirnov.

   2.1. Se determina para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. Se presenta información recopilada de los historiales de fallos de un compresor de Gas de la compañía Petróleos de Venezuela. En la tabla 11 se presentan los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} en meses y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i} en horas, asociados a 24 eventos ocurridos durante los 10 años de vida útil.

t_{f_i}	5	7	3	7	2	4	3	5	8	9	2	4	6	3	4	2	4	3	8	9	4	4	7	4
t_{fs_i}	24	36	26	34	34	25	12	15	15	16	23	25	26	36	36	28	21	25	35	18	16	25	25	25

Tabla 11: Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas)

   2.2. Se calcula el número total de tiempos operativos y tiempos fuera de servicio registrados, N = 24 eventos.

   2.3. Se ordenan los t_{f_i} y los t_{fs_i} en forma creciente y asignarle a cada uno de ellos una posición (i) en orden creciente desde 1 hasta 24.

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
t_{fs_i}	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36

Tabla 12: Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas) – ordenados de forma creciente

2.4. Se calcula la probabilidad de fallo observada $Qo(i)$. Cada valor asignado a la posición (i) se divide entre 24 y se obtiene la probabilidad de fallo observada para cada (i).

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Qo(i)=\frac{(i)}{N}$	0,04166	0,08333	0,125	0,16666	0,20833	0,25	0,29166	0,33333	0,375	0,41666	0,45833	0,5
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$Qo(i)=\frac{(i)}{N}$	0,54166	0,58333	0,625	0,66666	0,70833	0,75	0,79166	0,83333	0,875	0,91666	0,95833	1

Tabla 13: Probabilidad de fallo observada $Qo(i)$

2.5. Se calcula para cada t_{fi} la probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ y para cada t_{fs_i} la probabilidad de recuperación de la función $F(t_f s_i)$, correspondiente a la distribución estadística evaluada. Las estimaciones de probabilidades de fallo y probabilidades de recuperación se realizarán para las distribuciones: Exponencial, Weibull y Log normal. Los resultados presentados en las siguientes tablas se calcularon con la herramienta ICDM 2006 (software de análisis de fiabilidad y mantenibilidad), ver (Parra y López, 2006).

t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(t_{f_i})$	0,3366	0,3366	0,3366	0,4595	0,4595	0,4595	0,4595	0,5597	0,5597	0,5597	0,5597	0,5597
t_{f_i}	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(t_{f_i})$	0,5597	0,5597	0,6414	0,6414	0,7079	0,7620	0,7620	0,7620	0,8062	0,8062	0,8421	0,8421

Tabla 14: Probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ **- Distribución Exponencial**

t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(t_{f_i})$	0,0790	0,0790	0,0790	0,2042	0,2042	0,2042	0,2042	0,3755	0,3755	0,3755	0,3755	0,3755
t_{f_i}	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(t_{f_i})$	0,3755	0,3755	0,5619	0,5619	0,7289	0,8539	0,8539	0,8539	0,9322	0,9322	0,9732	0,9732

Tabla 15: Probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ **- Distribución Weibull**

t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(t_{f_i})$	0,0457	0,0457	0,0457	0,2058	0,2058	0,2058	0,2058	0,4185	0,4185	0,4185	0,4185	0,4185
t_{f_i}	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(t_{f_i})$	0,4185	0,4185	0,6069	0,6069	0,7458	0,8391	0,8391	0,8391	0,8991	0,8991	0,9367	0,9367

Tabla 16: Probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ **- Distribución Log normal**

t_{fs_i}	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(t_f s_i)$	0,3807	0,4506	0,4506	0,4721	0,4721	0,5126	0,5676	0,6008	0,6164	0,6315	0,6315	0,6315
t_{fs_i}	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(t_f s_i)$	0,6315	0,6315	0,6315	0,6459	0,6459	0,6731	0,7427	0,7427	0,7528	0,7625	0,7625	0,7625

Tabla 17: Probabilidad de recuperación $F(t_f s_i)$ - Distribución Exponencial

t_{fs_i}	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(t_f s_i)$	0,0518	0,1093	0,1093	0,1349	0,1349	0,1962	0,3116	0,4009	0,4480	0,4958	0,4958	0,4958
t_{fs_i}	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(t_f s_i)$	0,4958	0,4958	0,4958	0,5439	0,5439	0,6379	0,8642	0,8642	0,8901	0,9124	0,9124	0,9124

Tabla 18: Probabilidad de recuperación $F(t_f s_i)$ - Distribución Weibull

t_{fs_i}	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(t_f s_i)$	0,014	0,068	0,125	0,1001	0,1001	0,1823	0,3385	0,4492	0,5030	0,5546	0,5546	0,5546
t_{fs_i}	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(t_f s_i)$	0,5546	0,5546	0,5546	0,6033	0,6033	0,6905	0,8674	0,8674	0,8862	0,9025	0,9025	0,9025

Tabla 19: Probabilidad de recuperación $F(t_f s_i)$ - Distribución Log normal

2.6. Se calcula para cada t_{f_i} y para cada t_{fs_i} la diferencia en valor absoluto entre la probabilidad de fallo observada y la probabilidad de fallo acumulada, esta diferencia se denota como $D(tf_i), D(tfs_i)$. Se usan las expresiones 21 y 22.

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,29494	0,25327	0,2116	0,29284	0,25117	0,2095	0,16784	0,22637	0,1847	0,14304	0,10137	0,0597
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,01804	0,02363	0,0164	0,02526	0,00043	0,012	0,02966	0,07133	0,0688	0,11046	0,11623	0,1579

Tabla 20: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Exponencial

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,03734	0,00433	0,046	0,03754	0,00413	0,0458	0,08746	0,04217	0,0005	0,04116	0,08283	0,1245
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,16616	0,20783	0,0631	0,10476	0,02057	0,1039	0,06224	0,02057	0,0572	0,01554	0,01487	0,0268

Tabla 21: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Weibull

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,00404	0,03763	0,0793	0,03914	0,00253	0,0442	0,08586	0,08517	0,0435	0,00184	0,03983	0,0815
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,12316	0,16483	0,0181	0,05976	0,03747	0,0891	0,04744	0,00577	0,0241	0,01756	0,02163	0,0633

Tabla 22: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Log normal

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfs_i)$	0,33904	0,36727	0,3256	0,30544	0,26377	0,2626	0,27594	0,26747	0,2414	0,21484	0,17317	0,1315
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfs_i)$	0,08984	0,04817	0,0065	0,02076	0,06243	0,0769	0,04896	0,09063	0,1222	0,15416	0,19583	0,2375

Tabla 23: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Exponencial

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfs_i)$	0,01014	0,02597	0,0157	0,03176	0,07343	0,0538	0,01994	0,06757	0,073	0,07914	0,03747	0,0042
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfs_i)$	0,04586	0,08753	0,1292	0,12276	0,16443	0,1121	0,07254	0,03087	0,0151	0,00426	0,04593	0,0876

Tabla 24: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Weibull

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfs_i)$	0,02766	0,01533	0	0,06656	0,10823	0,0677	0,04684	0,11587	0,128	0,13794	0,09627	0,0546
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfs_i)$	0,01294	0,02873	0,0704	0,06336	0,10503	0,0595	0,07574	0,03407	0,0112	0,01416	0,05583	0,0975

Tabla 25: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfs_i)$ - Distribución Log normal

2.7. Se identifican las diferencias absolutas $D(tf_i), D(tfs_i)$ de mayor valor (***Dmáx***(tf_i) y ***Dmáx***(tfs_i)). A continuación se presentan los ***Dmáx*** obtenidos de cada una de las distribuciones evaluadas.

	Exponencial	Weibull	Log normal
Dmáx (tf_i)	0,29494	0,20783	0,16483
Dmáx (tfs_i)	0,36727	0,16443	0,13794

Tabla 26: Diferencias absolutas máximas de probabilidades de fallo *Dmáx* (tf_i) y probabilidades de recuperación *Dmáx* (tfs_i)

2.8. Se buscan los valores críticos ***Dcr***(tf_i) y ***Dcr***(tfs_i) de Kolmogorov - Smirnov (tabla 8), para el nivel de significancia de 0,05 y N = 24.

Dcr(tf_i) , ***Dcr***(tfs_i) = 0,26931

2.9. Se realiza la prueba de hipótesis, comparando los valores críticos: ***Dcr***(tf_i) y ***Dcr***(tfs_i) con los valores máximos obtenidos: ***Dmáx***(tf_i) y ***Dmáx***(tfs_i), según los criterios explicados en la sección anterior.

	Exponencial	Weibull	Log normal
Dmáx (tf_i) ***y Dcr*** (tf_i)	**0,29494 > 0,26931** **Hipótesis rechazada**	**0,20783<0,26931** **Hipótesis aceptada**	**0,16483<0,26931** **Hipótesis aceptada**
Dmáx (tfs_i) ***y Dcr*** (tfs_i)	**0,36727 > 0,26931** **Hipótesis rechazada**	**0,16443<0,26931** **Hipótesis aceptada**	**0,13794<0,26931** **Hipótesis aceptada**

Tabla 27: Prueba de hipótesis - nivel de significancia de 0,05

2.10. Se selecciona para cada variable: $t_{f\,i}$ y t_{fs_i} la distribución cuyo valor máximo ***Dmáx*** haya sido el menor obtenido de cada una de las distribuciones evaluadas.

	Distribución seleccionada
Dmáx (tf_i) **de menor valor**	**Log normal (0,16483)**
Dmáx (tfs_i) **de menor valor**	**Log normal (0,13794)**

Tabla 28: Distribución seleccionada

3. Se calculan los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes directos Cdi (mano de obra (Cmo), materiales (Cmt), repuestos (Crp)) y los costes de penalización Cpe (impacto operacional por fallos (Cio)). Los costes por fallos se estiman con las expresiones 23, 24 y 25.

$$Cmo = 500\frac{\$}{fallo},\ Cmt = 700\frac{\$}{fallo},\ Cro = 800\frac{\$}{fallo}$$

$$Cdi = 2000\frac{\$}{fallo}$$

Para el cálculo de los costes de penalización es necesario estimar el tiempo promedio de reparación (*MTTR*) correspondiente a la distribución Log normal seleccionada a partir del test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se presenta la expresión para calcular el (*MTTR)* con la distribución Log normal:

$$MTTR = e^{\left(\mu_{tfs_i} + \frac{\sigma fs_i^2}{2}\right)}$$

Los parámetros μ_{tfs_i} (media logarítmica) y σfs_i (desviación estándar logarítmica) se estiman a partir de los tiempos fuera de servicio t_{fs_i} (tabla 9), este calculo se realizó con la herramienta ICDM 2006.

$\mu_{tfs_i} = 3{,}175621$

$\sigma fs_i = 0{,}314718$

$MTTR = 25{,}16 \frac{horas}{fallo}$

$Cio = 100 \frac{\$}{hora}$

$Cpe = 25{,}16 \frac{horas}{fallo} \times 100 \frac{\$}{hora} = 2516 \frac{\$}{fallo}$

$C_f = 4516 \frac{\$}{fallo}$

4. Se determina la frecuencia de fallos esperados δ_f a partir del tiempo promedio entre fallos *(MTBF*) correspondiente a la distribución Log normal seleccionada a partir del test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se presenta la expresión para calcular el (*MTBF)* con la distribución Log normal:

$$MTBF = e^{\left(\mu_{tf_i} + \frac{\sigma f_i^2}{2}\right)}$$

Los parámetros μ_{tf_i} (media logarítmica) y σf_i (desviación estándar logarítmica) se estiman a partir de los tiempos entre fallos t_{f_i} (tabla 10), este cálculo se realizó con la herramienta ICDM 2006.

$\mu_{tf_i} = 1{,}482485$

$\sigma f_i = 0{,}467647072$

$MTBF = 4{,}91 \frac{meses}{fallo}$

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} = 0{,}20366 \frac{fallos}{mes} = 2{,}44399 \frac{fallos}{año}$$

5. Se calculan los costes totales por fiabilidad por año TCP_f, generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la expresión 27:

$$TCP_f = 6149{,}07 \frac{\$}{año}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor esperado de dinero que se necesitará cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante cada año de vida útil esperada.

6. Se calculan los costes totales en valor presente $PTCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f, se usa la expresión (28), para un período T = 10 años y una tasa de descuento i = 10%.

$PTCP_f = 37783{,}372\$$

El valor presente $PTCP_f$, representa la cantidad de dinero - hoy, que se necesitará para poder cubrir los gastos anuales esperados por los fallos durante 10 años.

Un resumen de las ventajas y limitaciones asociadas al proceso de estimación del impacto de la fiabilidad en el modelo propuesto de tasa de distribución de fallos seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov, son las siguientes:

- El modelo es más realista que los tres modelos básicos tratados anteriormente, ya que permite al diseñador evaluar diferentes distribuciones estadísticas y seleccionar la distribución que mejor se ajusta al set de datos según el test de Kolomogorov - Smirnov. Adicionalmente, el impacto de los costes por fallos, se cuantifica a partir de los valores esperados de las variables aleatorias (tiempo promedio entre fallos - MTBF y tiempo promedios para reparar - MTTR) calculados en función de la distribución seleccionada. Su aplicación se ajusta normalmente a las fases finales del proyecto, ya que para esta etapa se tiene información más precisa sobre los aspectos de fiabilidad y mantenibilidad de las distintas alternativas a evaluar. En cuanto a la recopilación de datos de fiabilidad y mantenibilidad, el diseñador debe exigir a los fabricantes, información detallada sobre los tipos de fallos más importantes y las frecuencias de ocurrencia. Este método se utiliza para tomar decisiones concluyentes, sobre todo cuando la información recopilada para estimar los costes de fiabilidad proviene de datos de buena calidad.
- Las principales limitaciones de este modelo son, en primer lugar, este modelo sólo se puede usar para equipos no reparables; y su segunda limitación, está asociada con la forma de cálculo del impacto de la fiabilidad en los costes, ya que este modelo

propone que se consideren frecuencias de fallos constantes a lo largo del ciclo de vida del activo a ser evaluado, lo cual, en la realidad no ocurre de esta manera, ya que normalmente, la frecuencia de fallos cambia a medida que van pasando los años por la influencia de diferentes factores (operaciones, mantenimiento preventivo, calidad de materiales, etc.).

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS FALLOS, A PARTIR DEL MODELO ESTOCÁSTICO DENOMINADO: PROCESO NO HOMOGÉNEO DE POISSON *(NON HOMOGENEUS POISSSON PROCESS (NHPP))* **(EQUIPOS REPARABLES)**

1. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS MODELOS DE FIABILIDAD EN EL ÁREA DE EQUIPOS REPARABLES

En el caso particular, de esta investigación, se han presentado hasta los momentos cuatro modelos básicos que permiten evaluar la fiabilidad y el impacto económico de los fallos: Tasa de Fallos Constante, Tasa de Fallos Determinista, Tasa de Fallos por Distribución de Weibull y Tasa de Fallos determinada a partir de la distribución estadística seleccionada a partir del test de Kolmogorov - Smirnov. Estos modelos tienen una limitación principal y es que consideran que los fallos encontrados, una vez que son reparados, su condición es restaurada a su estado original (el equipo o componente que ha fallado se sustituye por uno nuevo), es decir, el sistema queda en la condición de como cuando era nuevo y la tasa de fallos no se ve afectada por el proceso de restauración, lo cual, dentro de un contexto de operaciones y producción, no pareciese ser el escenario que más se ajuste a la realidad. Asumir que el proceso de renovación devuelve a la condición original al sistema reparable, no es precisamente la hipótesis más realista, sobre todo cuando se tiene un sistema de múltiples componentes, en el que los tiempos entre fallos no tienen por que ser independientes o idénticamente distribuidos, en este caso lo que sucede es que se tiene algún tipo de tendencia en la tasa de fallos.

Cuando se trata de equipos reparables y se habla de tiempo para el fallo, surge inmediatamente la pregunta ¿tiempo para cuál fallo?; ¿tiempo para el primer fallo?; ó ¿tiempo para el segundo fallo?; ó ¿tiempo para el n iésimo fallo?, ya que para un tiempo misión **tm** puede ocurrir más de un fallo. Si se habla por ejemplo de la probabilidad de fallo en el tiempo misión **tm**, surgen las preguntas, ¿probabilidad de cuantos fallos?; ¿probabilidad de un fallo en un período **tm**?; ó ¿probabilidad de 2 fallos en un tiempo **tm**?; o ¿probabilidad de n fallos en un tiempo **tm**? (Barroeta, 2005).

En la figura 8 se esquematiza una proyección o estimado de un proceso de operación de un equipo reparable, en el que se sabe que pueden ocurrir fallos que serán restaurados con reparaciones. Nótese que se manejaran dos escalas de tiempo:

1.- Una escala relacionada al tiempo de operación entre fallas; para la cual se usarán subíndices; por ejemplo **t2** = tiempo de operación entre el primer y el segundo fallo.

2.- Otra escala relacionada con el tiempo acumulado de operación hasta los fallos o hasta un evento específico; para la cual se usarán superíndices; por ejemplo **t[2]**= tiempo acumulado de operación hasta el segundo fallo. Nótese que **t[2]=t1+t2.**

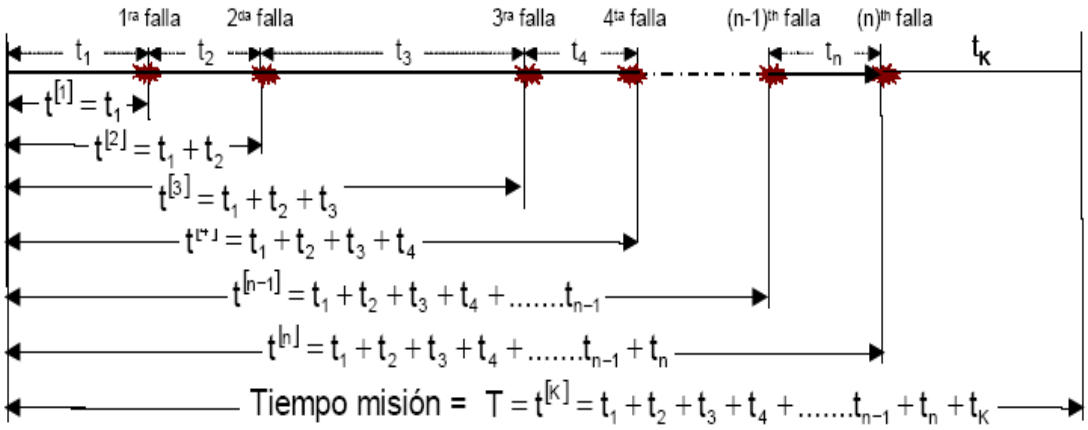


Figura 8: Proceso de fallos sucesivos (Nomenclatura)
Fuente: Barroeta, 2005

Analizando la figura 8 y recordando que el tiempo para el fallo se considera como una variable aleatoria, se concluye que los variables **t1** (tiempo de operación hasta el primer fallo), **t2** (tiempo de operación entre el primer y el segundo fallo), **t3** (tiempo de operación entre el segundo y el tercer fallo); hasta **tn** (tiempo de operación entre el (n-1)th y el fallo n), son todas variables aleatorias; es decir variables que pueden tomar múltiples valores y que por ende cada una puede ser representada con una distribución de probabilidades.

De la misma manera, al analizar las variables **t[2]** (tiempo acumulado de operación hasta el segundo fallo), **t[3]** (tiempo acumulado de operación hasta el tercer fallo), **t[4]** (tiempo acumulado de operación hasta el cuarto fallo), hasta **t[n]** (tiempo acumulado de operación hasta el n fallo), son determina que también son variables aleatorias ya que las mismas resultan de la suma de otras variables aleatorias; tal como puede verse en la figura 8.

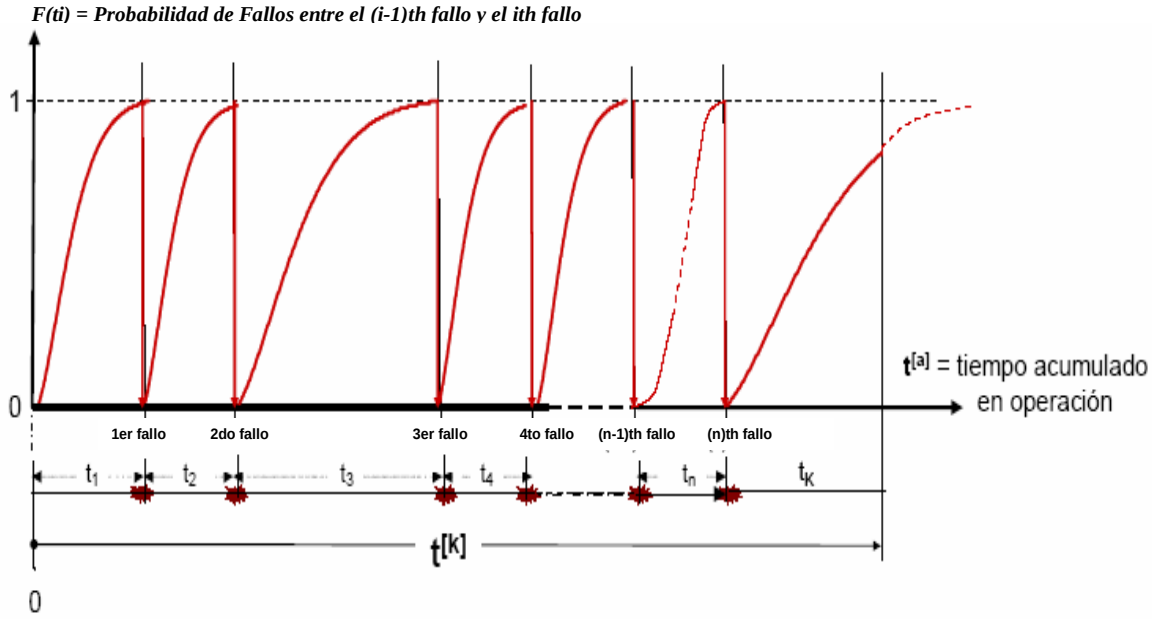


Figura 9: Probabilidad de fallos en activos reparables

Fuente: Barroeta, 2005

En la figura 9 se representa la probabilidad de fallos **F(ti)**, que como puede notarse aumenta desde 0 a 1 entre el fallo i-1 y el fallo i; para i = 1,2,3,…….,n y en la figura 10 se representa

la fiabilidad del sistema **R(ti)**, que disminuye desde 1 hasta 0 entre el fallo i-1 y el fallo i; para i=1,2,3,…..,n.

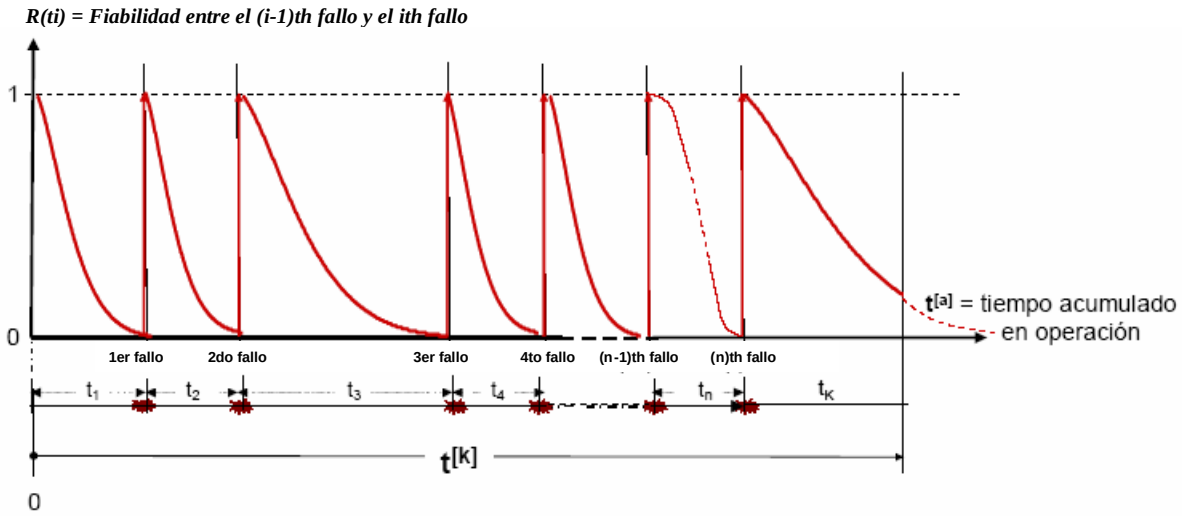


Figura 10: Fiabilidad en activos reparables
Fuente: Barroeta, 2005

Las figuras 9 y 10 muestran claramente que no tiene mucho sentido hablar de probabilidad de fallo ó fiabilidad en un tiempo acumulado de operación **t[k]** ó tiempo misión, ya que en este período estos valores fluctúan entre 0 y 1 varias veces, y para diferentes valores del tiempo en operación puede darse el mismo valor de probabilidad de fallo. Por esta razón estos indicadores son poco usados en el análisis de activos reparables. La variable aleatoria que caracteriza a los equipos reparables conocida como Número Acumulado de Fallos **N(t[m]),** para un tiempo acumulado de operación o tiempo misión **t[m].** La variable NúmeroAcumulado de Fallos **N(t[m]),** puede tomar múltiples valores para un tiempo acumulado de operación o tiempo misión **t[m]=t1+t2+t3+t4+tm**; es decir, es una variable aleatoria que puede y debe ser modelada matemáticamente con una distribución de probabilidades, a la cual se le pueden calcular una media y unos percentiles; tal como se muestra en la figura 11.

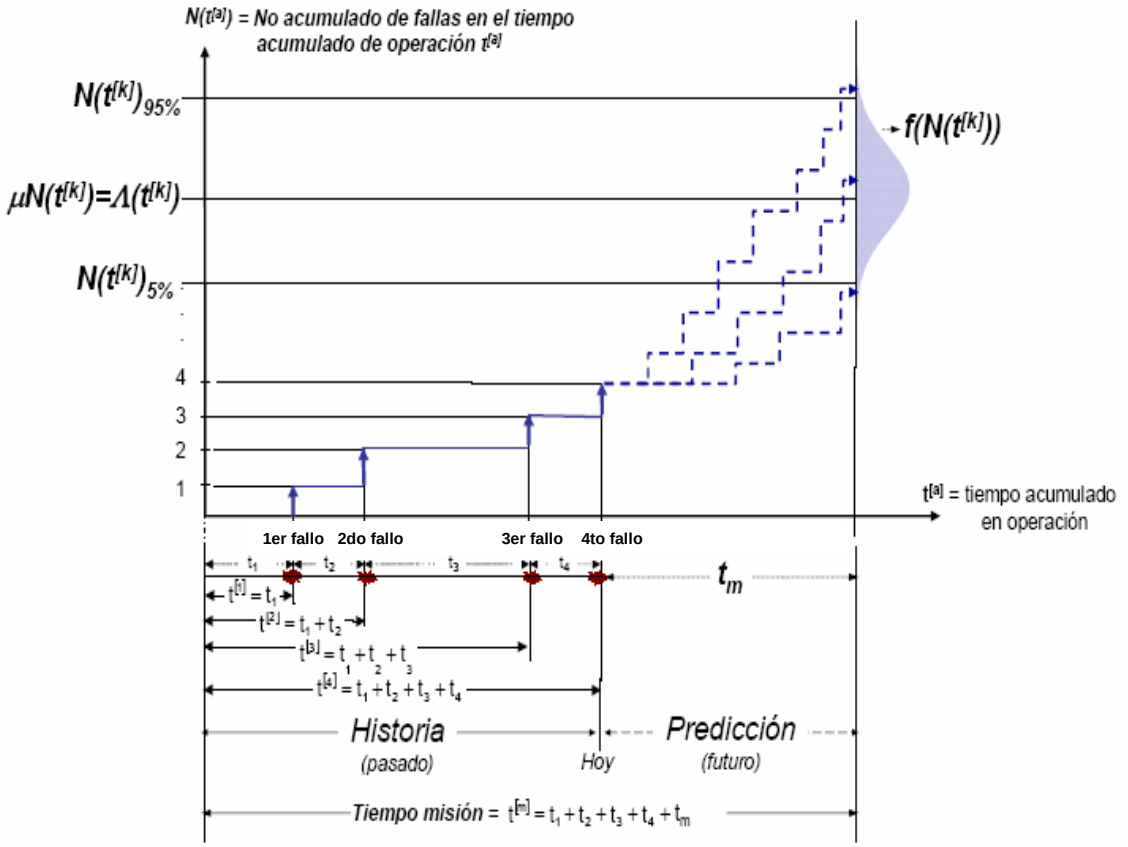


Figura 11. Número acumulado de fallos

Fuente: Barroeta, 2005

Resumiendo, la predicción del número acumulado de fallos para cada valor del tiempo de operación dará como resultado una distribución de probabilidades. La media o valor esperado de esta distribución se conoce como Número Esperado de Fallos y se denota como **Λ(t[m])**, como se muestra claramente en la figura 11. La variable aleatoria **Número Acumulado de Fallos N(t[m]),** para un tiempo acumulado de operación t[m] es la variable probabilística objeto de estudio en análisis de activos reparables, y el factor **Número Esperado de Fallos Λ(t[m])** es el indicador por excelencia utilizado para caracterizarlo.

Yañez et al. (2002), sugiere que existen cinco posibles escenarios después de una acción de reparación provocada por un evento de fallo, estos escenarios son:

- Tan bueno como nuevo
- Tan malo como antes de reparar
- Mejor que antes de reparar pero peor que cuando estaba nuevo
- Mejor que cuando estaba nuevo
- Peor que antes de reparar

De los cinco escenarios citados anteriormente, el denominado: "tan malo como antes de reparar", es uno de los más probables dentro de un contexto operacional real. Para diagnosticar la tasa de fallos de este escenario en particular, se ha desarrollado un modelo estocástico denominado: **Proceso No Homogéneo de Poisson *(Non-homogeneous Poisson Process (NHPP))***, el cual considera que la tasa de fallos varía a medida que el sistema envejece. En las secciones sucesivas, se describe en primer lugar, como el modelo NHPP, estima el Número Esperado de Fallos **Λ(t[m])** para un período de tiempo indicado; y posteriormente, se explica como el resultado del número de fallos estimado, se convierte en un indicador económico dentro del proceso de análisis de costes de ciclo de vida de un equipo industrial.

1.1. PROCESO NO HOMOGÉNEO DE POISSON *(NHPP)*, UTILIZADO PARA ESTIMAR LA TASAS DE FALLOS EN EQUIPOS REPARABLES

El modelo ***NHPP*** considera que la tasa de fallos varia a medida que el sistema envejece, específicamente este modelo considera que al ocurrir el fallo, el sistema es sometido a una reparación mínima; y que por lo tanto el mismo queda "tan malo como estaba", justo antes del evento de fallo. Este modelo es válido para equipos muy complejos, con múltiples componentes, en los cuales, la política de restauración (mantenimiento), consiste en sólo

hacer reparaciones mínimas que permitan poner al equipo a operar nuevamente, ver detalles de este método en (Meeker and Escobar, 1998; y Modarres, et al., 1999). El modelo NHPP es un proceso estocástico en el cual la probabilidad de ocurrencia de *n* fallos en cualquier intervalo *[t1, t2]* tiene una distribución de Poisson con una media (Ascher and Feingold, 1984):

$$Media = \int_{t1}^{t2} \lambda(t)dt \tag{29}$$

dónde λ(t) es la tasa de ocurrencia de fallos (*ROCOF: rate of occurrence of failures*). De acuerdo al proceso de Poisson:

$$\Pr[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{\left[\int_1^{t_2} \lambda(t)dt\right]^n \exp\left[-\int_1^{t_2} \lambda(t)dt\right]}{n!} \tag{30}$$

dónde *n = 0, 1, 2,…* son el número total de fallos esperados en un intervalo de tiempo *[t1,t2]*. El total de número de fallos viene dado por la función de intensidad acumulada:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t)dt \tag{31}$$

Una de las expresiones más utilizadas para determinar la tasa de ocurrencia de fallos en los análisis de fiabilidad de sistemas reparables es la propuesta por el *Power Law Model* (Ascher and Feinfold, 1984 y Crow, 1974):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \tag{32}$$

Esta expresión considera que los tiempos entre fallos corresponden a una función de densidad de probabilidad condicional de Weibull, con parámetros α y β. La función de

Weibull es típicamente utilizada en el área del mantenimiento debido a su flexibilidad para ajustarse a los diversos comportamientos de fallos del los equipos industriales. Este modelo supone que la llegada del fallo ith. está condicionado al tiempo operativo acumulado hasta el próximo fallo $(i-1)^{th}$. La figura 11 muestra el esquema de esta condición (Yañez et al., 2002), la cual, sugiere que el sistema mantiene la condición de tan malo como antes de reparar, después de ejecutada la intervención de mantenimiento (i-1)th, de tal forma que el proceso de reparación no es capaz de restaurar el equipo a una condición superior (mejor) antes de que ocurriese el fallo.

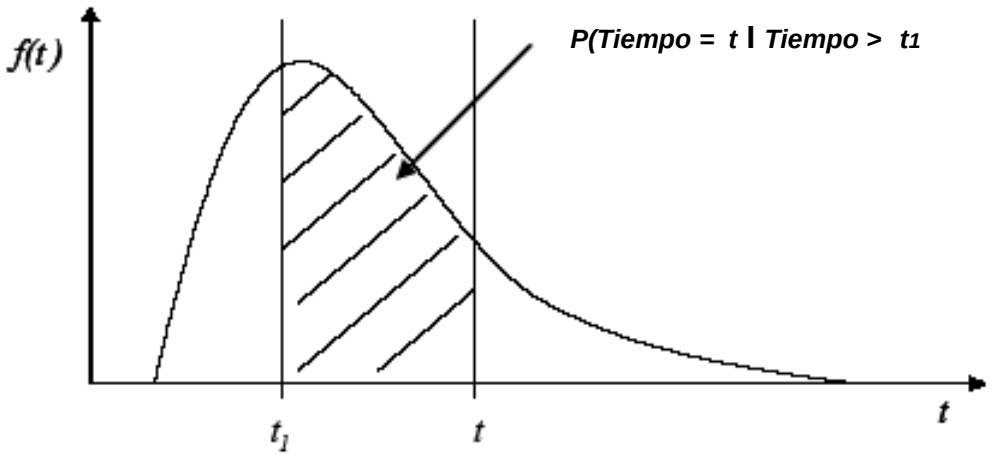


Figure 12: Probabilidad condicional de ocurrencia del fallo

Fuente: Barroeta, 2005

Para obtener los parámetros α y β a partir del Power Law Model (Ascher and Feinfold, 1984 y Crow, 1974), considere la siguiente definición de probabilidad condicional:

$$P(T \le t | T > t_1) = \frac{F(t) - F(t_1)}{R(t_1)} = \frac{1 - R(t) - 1 + R(t)}{R(t_1)} = 1 - \frac{R(t)}{R(t_1)} \quad (33)$$

Dónde F(t) y R(t) son la probabilidad de fallo y la probabilidad de que no falle del componente en estudio, para un respectivo tiempo de evaluación. Asumiendo una distribución de Weibull, la ecuación (33) se representa de la siguiente forma:

$$F(t_i) = 1 - \exp\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{34}$$

Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad condicional de Weibull, se expresa de la siguiente forma:

$$f(t_i) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta-1}.\exp\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{35}$$

Para nuestra investigación, utilizaremos la expresión basada en la estimación a un tiempo *t* después de la ocurrencia del último fallo (equipo no esta operando). Para la estimación de los factores α y β, utilizaremos el método de aproximación matemática denominado Máxima Probabilidad *(Maximun Likelihood)*, ver (Modarres et al., 1999). La expresión matemática del método de Máxima Probabilidad (*L*), se presenta a continuación:

$$L = \prod_{i=1}^{n} f(t_i) = f(t_1)\prod_{i=2}^{n} f(t_i)R(t_n|t) \tag{36}$$

Al desarrollar la ecuación anterior se obtiene:

$$L = \left\{\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right\} \times \left\{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{n-1}\prod_{i=2}^{n}\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left(\sum_{i=2}^{n}\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right)\right\} \tag{37}$$

Los resultados de los factores α y β obtenidos a partir del método de Máxima Probabilidad se presentan a continuación (Ascher and Feinfold, 1984 and Crow, 1974):

$$\hat{\alpha} = \frac{t_n}{n^{\frac{1}{\beta}}} \tag{38}$$

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \ln\left(\frac{t_n}{t_i}\right)} \tag{39}$$

Dónde *tn* es el tiempo total de operación acumulado hasta que ocurrió el último fallo, *ti* es el tiempo acumulado de operación hasta que ocurre el fallo *i* y *n* es el número total de fallos. El número total de fallos esperados *(Λ)* en el intervalo de tiempo [*tn,tn+s*], según la función acumulada de Weibull es (Modarres et al., 1999):

$$\Lambda(t_n, t_{n+s}) = \frac{1}{\alpha^{\beta}} \left[t_n + t_s \right]^{\beta} - \left[t_n \right]^{\beta} \tag{40}$$

Dónde *ts* es el tiempo después del último fallo ocurrido (sobre este tiempo se estimará el número fallos, se recomienda utilizar como tiempo base: 12 meses y de esta forma cuantificar el número de fallos esperados en un año) de tal forma que *tn* es igual a:

$$t_n = \sum_{i=1}^{n} t_i \tag{41}$$

2. MODELO ESTOCÁSTICO *NHPP* PROPUESTO PARA EVALUAR EL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS FALLOS EN EQUIPOS REPARABLES

El modelo de Análisis de Costes de Ciclo de Vida basado en el uso del método estocástico NHPP, para estimar el impacto económico de los fallos de equipos reparables propone en términos generales las siguientes etapas:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos. Así para un equipo determinado habrá $f = 1 \ldots\ldots F$ tipos de fallos.

2. Determinar para cada tipo de fallo, los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_f. Esta información será recopilada por el diseñador a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia de personal de mantenimiento y operaciones.

3. Calcular los costes por fallos C_f (\$/fallo). Estos costes incluyen: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

4. Calcular el número de fallos esperados por año $\Lambda(t_n, t_{n+s})$. El valor a obtener de fallos por año, se considerará como constante para cada año del ciclo de vida esperado del equipo evaluado. El valor del número de fallos $\Lambda(t_n, t_{n+s})$ es calculado a partir de la ecuación (40). Los parámetros α y β, se estiman a partir de las expresiones (38) y (39). En la expresión (40), t_s corresponderá al valor de un año (1 año) ó su unidad equivalente (8760 horas, 365 días, 12 meses, etc.). Este tiempo t_s representa el intervalo de tiempo en el cual se estimarán las frecuencias de fallos por año.

5. Calcular los costes totales por fiabilidad por año TCP_f (\$/año), generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f}^{F} \Lambda\left(t_n, t_{n+s}\right) \times C_f \qquad (42)$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por los fallos, durante los años de vida útil esperada.

7. Calcular los costes totales por fallo en valor presente $PTCP_f$ (\$). Dado un valor anualizado TCP_f, se estima su valor monetario en función del número de años de vida

útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión a utilizar para estimar los $PTCP_f$ en valor presente es:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^{T} - 1}{i \times (1+i)^{T}} \tag{43}$$

Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se adicionarían el resto de costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.). Se calcula el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

2.1. CASO DE ESTUDIO MODELO *NHPP*

Para el caso de estudio se toman los datos de la tabla 1. Los datos presentados fueron recopilados del historial de fallos de un compresor de Gas de la compañía Petróleos de Venezuela. En resumen en este equipo ocurrieron 24 eventos de fallos durante sus 10 años de vida útil. A continuación se presentan los tiempos entre fallos t_f en meses: 5, 7, 3, 7, 2, 4, 3, 5, 8, 9, 2, 4, 6, 3, 4, 2, 4, 3, 8, 9, 4, 4, 7, 4

A continuación seguimos los pasos propuestos en la sección anterior:

- Se define el tipo de fallos *(f)*. Dónde $f = 1 \ldots F$ para F tipos de fallos

  $F = 1$ tipo de fallo

- Se calculan los costes por fallo C_f (estos costos incluyen: repuestos, materiales mano de obra, pérdida de producción, lucro cesante, impacto en la operación, etc.)

  $C_f = 5000 \ \frac{dólares}{fallo}$

- Se define el número de fallos esperados por año $\Lambda(t_n, t_{n+s})$, usar la expresión (40):

$$\Lambda(t_n, t_{n+s}) = \frac{1}{\alpha^{\beta}} \left[t_n + t_s \right]^{\beta} - \left[t_n \right]^{\beta}$$

Dónde:

n = 24 fallas

$t_n = \sum_{i=1}^{n} t_i = 5 + 7 + 3 ..... 4 + 7 + 4 = 117$ meses

$t_s = 12$ meses

$t_{n+s} = 129$ meses

Los parámetros α y β, son estimados a partir de las expresiones (38) y (39):

α = 6.829314945

β = 1.11865901

El número esperado de fallos por año estimado es:

$\Lambda(t_n, t_{n+s}) = 2.769896307 \frac{fallos}{año}$, este resultado es considerado como un valor constante de fallos por año para el ciclo de vida útil esperado (software de cálculo utilizado: ICDM 2006, ver Parra y López, 2006).

- Se calculan los Costes totales por fallos por año TCP_f , usar la expresión (42):

$$TCP_f = 2.769896307 \ \frac{fallos}{año} \times 5000 \ \frac{dólares}{fallo} = 13849 .48154 \ \frac{dólares}{año}$$

- Se calculan los Costos totales por fallos en valor presente $PTCP_f$, usar la expresión (43), para un período de T = 10 año y una tasa de interés i = 10%:

$PTCP_f = 73734{,}805$ *dólares*, valor que representa la cantidad de dinero en valor presente (hoy), que necesitaría la organización para poder cubrir con los gastos anuales esperados por los fallos durante los 10 años del ciclo de vida evaluados a una tasa del

10% (para este ejemplo, el total de fallos por año, fue estimado a partir del modelo NHPP para la función de estadística de probabilidad de fallo de Weibull). Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se le adicionan el resto de los costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.), se calcula el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

2.2. LIMITACIONES DEL MODELO *NHPP*

El modelo *NHPP* ha sido desarrollado y aplicado en escenarios operacionales reales en los cuales las reparaciones de los fallos han dejado al componente "tan malo" como estaba justo antes del evento de fallo (Hurtado et al., 2005). Basado en esta premisa y dado su naturaleza de ser un modelo conservador el mismo fue seleccionado dentro de esta investigación para estimar el número de fallos y su respectivo impacto económico en el coste de ciclo de vida de un activo industrial. El modelo descrito anteriormente, tiene tanto ventajas como limitaciones. En términos generales, el modelo provee de un proceso matemático bastante realista, ya que considera básicamente que un componente reparable se va deteriorando con el tiempo y su restauración nunca podrá ser mejor que cuando estaba nuevo. Las principales fortalezas y debilidades del modelo se citan a continuación:

Fortalezas:

- Es un modelo muy eficiente para representar la frecuencia de fallos de equipos que son afectados por procesos de deterioro que se agravan a medida que pasa el tiempo (procesos de envejecimiento).

- Utiliza métodos heurísticos que han sido probados con mucha efectividad para modelar patrones de fallos reales (función de probabilidad de fallo de Weibull).
- Es un modelo conservador, en la mayoría de los casos los resultados generados a partir de este modelo, son muy similares a los obtenidos por el modelo GRP (General Renewal Process), el cual es un modelo que matemáticamente es mucho más complejo y complicada de utilizar (Hurtado et al., 2005).

Debilidades:

- Su principal debilidad, es que no se puede usar para modelar patrones de fallos cuyos procesos de restauración sean capaces de dejar el componente restaurado en mejores condiciones que las que tenía antes de la reparación.

Como aspectos resaltantes a ser considerados dentro del proceso de estimación de las tasas de fallos en sistemas reparables a partir de modelos estocásticos, es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones propuestas por Ascher (1984):

- Los fallos en un componente podrían ser parciales y las reparaciones realizadas sobre este componente podrían ser imperfectas, de tal forma que los períodos sucesivos entre fallos no son necesariamente independientes. Este escenario podría incrementar la tasa de fallos en el transcurso del ciclo de vida del sistema a evaluar.
- Los procesos de reparación imperfectos llevados a cabo sobre componentes en los cuales el estado final después de la reparación deja al componente en condiciones peores que como estaba antes de la reparación, son los escenarios propicios para usar modelos como el *NHPP*, teniendo en cuenta que este modelo, tiende a generar resultados conservadores con respecto al número de fallos a ser estimados.
- Las actividades de reparación menores mal ejecutadas y orientadas a prevenir procesos de deterioro (ajustes, actividades de lubricación, limpiezas, etc.), podrían provocar el

incremento de la tasa de fallos dentro del modelo *NHPP*, específicamente, estas actividades podrían ocasionar que los tiempos de operación puedan disminuir como causa de la intervención deficiente del proceso de reparación.

- El modelo *NHPP*, es muy susceptible al incremento del número de fallos por afectación de los procesos de envejecimiento (corrosión, daño de materiales, fatiga, cambios drásticos de variables de operación, etc.).

CAPÍTULO V: CONSIDERACIONES FINALES

1. APORTES REALIZADOS DURANTE EL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN

Durante la etapa previa al desarrollo de la tesis de doctorado (incluyendo la fase previa relacionada con el Diploma de Estudios Avanzados (DEA)), se han generado hasta los momentos, los siguientes aportes:

- Artículo presentado en el Congreso ESREL 08 (European Safety and Reliability Congress, Septiembre, 2008, Valencia, España) denominado: ***"Non-homogeneous Poisson Process (NHPP), stochastic model applied to evaluate the economic impact of failure in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA)"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Moreu, J. Gómez y V. González. Publicado en: ***Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and applications – Martorell et al. (eds), 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5, p.929 – 938*** (ver artículo en Apéndice I).
- Artículo presentado en el Congreso ESREL 06 (European Safety and Reliability Congress, Septiembre, 2006, Estoril, Portugal) denominado: ***"On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Publicado en: ***Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds), 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5, p.2203 – 2214*** (ver artículo en Apéndice II).

- Trabajo titulado: ***"Evaluación del impacto de la Fiabilidad en el Análisis de Coste del Ciclo de Vida (ACCV) de un activo Industrial"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Este trabajo se presento en los siguientes congresos:

  - VI Congreso Panamericano de Mantenimiento COPIMAN, 23 y 24 de Septiembre 2004, realizado Distrito Federal, México, organizado por UPADI (Unión Panamericana de Ingenieros), ***p.276 – 285*** (ver artículo en Apéndice III).

  - V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CONIM 2005, 8 y 9 de Octubre 2005, realizado en Mérida, Venezuela, organizado por la facultad de Ingeniería Mecánica y el Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento de la Universidad de los Andes, ***p.112 – 121*** (ver primera página del artículo en Apéndice III).

- Artículo publicado: ***"Ingeniería de Fiabilidad aplicada al proceso de Análisis de Coste de Ciclo de Vida (ACCV). Revisión de modelos básicos"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Publicado en: ***Ingeniería y Gestión de Mantenimiento, Editorial Alción, Madrid, España, ISSN 1695-3754, Número 47, Mayo/Junio, 2006, p.31 – 43*** (ver primera página del artículo en Apéndice IV).

- Artículo publicado: ***"A structured approach to maintenance management. Process and framework to manage maintenance"***. Autores: A. Crespo y C. Parra. Presentado en el Congreso: ***EUROMAINTENANCE 08, Brussels, 8 - 10 April 2008, paper 12, página web: www.euromaintenace.org*** (ver artículo y presentación en power point en Apéndice V).

- Colaborador en redacción del capítulo 16 del libro: "***The maintenance management framework. Models and methods for complex systems***

maintenance". Este capítulo forma parte de la tesis de doctorado. Autor del libro: Adolfo Crespo Márquez. **Editado por Springer, serie: Reliability Engineering, 2007, ISBN: 978-1-84628-820-3, Londres** (ver portada del libro, agradecimiento como colaborador e introducción del capítulo 16, en el anexo VI).

- Artículo a proponer: ***"Non-homogeneous Poisson Process (NHPP), stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the life cycle cost analysis (LCCA). Case of study in oil industry"***. Autores: Carlos Parra Márquez y Adolfo Crespo Márquez. Journal propuesto: Reliability Engineering & System Safety. Editorial Elsevier (ver abstract en el anexo VII).

2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Es importante dentro del proceso de estimación del ciclo de vida de los activos, evaluar y analizar detalladamente los nuevos desarrollos heurísticos relacionados con los procesos de cuantificación de la Fiabilidad. En el futuro cercano, nosotros pensamos que las nuevas propuestas de evaluación de los Costes de Fiabilidad en los ACCV, aprovecharán el desarrollo en el área de las matemáticas y se utilizarán métodos tales como:

- Métodos estocásticos avanzados, ver (Tejms, 1986, Karyagina et al., 1998, Yañez et al., 2002, Hurtado et al., 2005 and Vasiliy, 2007). La tabla 2 presenta un resumen de los modelos estocásticos utilizados en el análisis de Fiabilidad de sistemas reparables (Modarres et al., 1999).
- Algoritmos genéticos usados para procesos de optimización en el área del mantenimiento, ver (Martorell et al., 2000 and Martorell et al., 2005).

- Técnicas de simulación de Monte Carlo aplicadas a los procesos de análisis de fallos, ver (Barringer, 1997, Barringer and Webber, 1996, and Kaminskiy and Krivtsov, 1998).

Proceso estocástico	**Puede ser usado**	**Área de desarrollo/ Dificultad**
Procesos de renovación (Renewal process RP)	Sistemas con tasas de fallos no constante (arbitraria) y procesos de restauración muy pequeños (insignificantes)	Teoría de Renovación/ Medio
Procesos de renovación alternativos (Alternating renewal process)	Sistemas reparables (renovables) con tasas de fallos y reparación no constante	Teoría de Renovación/ Medio
Procesos de Markov (MP)	Sistemas con elementos con tasas de fallos y reparación constante durante el tiempo de evaluación	Ecuaciones diferenciales ó integrales/ Bajo
Proceso Semi-Markoviano (SMP)	Sistemas con elementos con tasas de fallos constante y tasas de reparación no constante	Ecuaciones integrales/ Medio
Proceso Semi-Regenerativo	Sistemas cuyos elementos aceptan un sólo tipo de reparación, con tasa de fallos constante y tasa de reparación no constante	Ecuaciones integrales/ Alta
Proceso No-Regenerativo	Sistemas con elementos con tasa de fallos y de reparación no constante	Ecuaciones diferenciales parciales/ Alta – muy alta

Tabla 29. Modelos estocásticos utilizados en el análisis de Fiabilidad de sistemas reparables

- Técnicas estadísticas de análisis de Fiabilidad, ver (Elsayed, 1982, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ireson, et al., 1996, Elsayed, 1996, Scarf, 1997, Ebeling, 1997 and Dhillon, 1999).
- Modelos matemáticos de Markov, ver (Roca, 1987, Kijima and Sumita, 1987 Kijima, 1997 and Bloch-Mercier, 2000).

Finalmente, es importante mencionar, que la orientación específica de este trabajo hacia el análisis del Factor fiabilidad y su impacto en los costes, se debe a que gran parte del incremento de los costes totales durante el Ciclo de Vida útil esperado de un sistema de producción, es ocasionado en su mayoría, por la falta de previsión ante la aparición

inesperada de eventos de fallos, escenario provocado básicamente por el desconocimiento y por la ausencia de una evaluación técnica en la fase de diseño de los aspectos relacionados con la fiabilidad. Esta situación trae como resultado un incremento en los costes de totales de operación (costes que no fueron considerados en un principio) afectando de esta forma la rentabilidad del proceso de producción. Dentro del proceso de Análisis de los Costes a lo largo del Ciclo de Vida de un activo, existen muchas decisiones y acciones, que deben ser tomadas, siendo de interés particular para este trabajo, aquellos aspectos relacionados con el proceso de mejoramiento de la fiabilidad (calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallos, costes de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad), ya que estos, tienen un gran impacto sobre el coste total del ciclo de vida del activo, e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los activos a costes razonables. Como consideración de cierre, hay que tener en cuenta que el desarrollo de cada método de ACCV, tendrá sus propias características particulares, ya que no es factible desarrollar una metodología única de ACCV que cubra todas las expectativas y exigencias tanto económicas como técnicas. Sin embargo, es necesario incluir dentro de cualquiera que sea la metodología de ACCV a utilizar ó a desarrollar, modelos que permitan estimar de forma eficiente el impacto de la Fiabilidad, con el fin de poder disminuir el nivel de incertidumbre en el proceso de evaluación de los costes totales esperados en el ciclo de vida útil de un activo de producción.

REFERENCIAS

- Ahmed, N. U. 1995. "A design and implementation model for life cycle cost management system", *Information and Management*, 28, pp. 261-269.

- Alting, L. 1993. *Life-cycle design of products: a new opportunity for manufacturing enterprises. In Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, A. Kusiak (ed.), (New York: Wiley), 1± 17.

- Ascher, H. and Feingold, H. 1984. *Repairable System Reliability: Modelling, Inference, Misconceptions and their Causes*, Marcel Dekker, New York.

- Asiedu, Y. and Gu, P.1998. "Product lifecycle cost analysis: state of art review", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 883-908.

- Barlow, R.E., Clarotti, C.A. and Spizzichino, F. 1993. *Reliability and Decision Making*, Chapman & Hall, London.

- Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1996. "Life Cycle Cost Tutorial", *Fifth International Conference on Process Plant Reliability*, Gulf Publishing Company, Houston, TX.

- Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1997. "Life Cycle Cost & Reliability for Process Equipment", *8th Annual ENERGY WEEK Conference & Exhibition*, George R. Brown Convention Center, Houston, Texas, Organized by American Petroleum Institute.

- Barroeta, C. 2005. *Risk and economic estimation of inspection policy for periodically tested repairable components*, Thesis for the Master of Science, University of Maryland, Faculty of Graduate School, College Park,Cod.Umi-umd-2712, p.77, August, Maryland.

- Blanchard, B. S. 1979. "Life cycle costing - a review", *Terotechnica*, 1, pp. 9-15.

- Blanchard, B.S. 2001. "Maintenance and support: a critical element in the system life cycle", *Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies*, Paper 03, May, Melbourne.

- Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J. 1998. *Systems Engineering and Analysis*, 3rd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

- Benda, J., Narayan, R., and Sticklen, J. 1993. "Use of expert systems for life cycle analysis", *Automobile Life Cycle Tools and Recycling Technologies SAE Special Publications*, 966, Warrendale, PA: SAE, pp. 53-57.

- Bloch-Mercier, S. 2000. "Stationary availability of a semi-Markov system with random maintenance", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 16, pp. 219-234.

- Boothroyd,G., and Dewhurst, P. 1983. "Design for assembly selecting the right method", *Machine Design*, November 10, pp.94-98.

- Boothroyd, G. 1994. "Product design for manufacture and assembly", *Computer-Aided Design*, 26 (7), pp.505-520.

- Campbell JD., and Jardine AKS. 2001. *Maintenance excellence*. Marcel Dekker, New York.

- Caver, T. V. 1979. "Life-cycle cost: attitudes and latitudes", *Defense Management Journal*, July - August, pp. 12-17.

- Creese, R. C., and Moore, L. T. 1990. "Cost modeling for concurrent engineering", *Cost Engineering*, 32 (6) June, pp. 23-27.

- Crespo, A. 2007. *The maintenance management framework. Models and methods for complex systems maintenance*, First edition, Springer Verlag, London.

- Crespo Márquez A., and Gupta JND. 2006. "Contemporary maintenance management: Process, framework and supporting pillars", *Omega*, 34 (3), pp. 313-326.

- Crespo, A., Sánchez, A. 2002. "Models for maintenance optimization. A study for repairable systems and finite time periods", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 75, No.3, pp. 367-377.

- Crespo, A., Iung, B. and Sánchez, A. 2005. "Monte Carlo based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 83, No.3, pp. 273-289.

- Crow, LH. 1974. "Reliability analysis for complex repairable systems", *Reliability and biometry*, Proschan F, Serfling RJ, eds., SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.

- Dean, E. B. 1989. "Parametric cost analysis: a design function", *Transactions of the American Association of Cost Engineers*, 33rd Annual Meeting, June, San Diego, CA.

- Dean, E. B. 1995. "Parametric cost deployment", *Proceedings of the Seventh Symposium on Quality Function Deployment*, June, Nov., MI, USA, pp. 27-34.

- Daschbach, J.M., and Apgar, H. 1988. "Design analysis through techniques of parametric cost estimation", *Engineering Costs and Production Economics*, 14, pp. 87-93.

- Dewhurst, P., and Boothroyd, G. 1984. "Design for assembly: automatic assembly", *Machine Design*, January 26, pp.87-92.

- Dighton, R. D. 1980. "The Hornet program: a design to life cycle costs", *Proceedings of the Design to Cost and Life Cycle Cost AGARD*, Conference, 289, May, pp. 8-12.

- Dhillon, B. S. 1989. *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*, Gordon and Breach Science Publishers, New York.

- Dhillon, B.S. 1999. *Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance*, Gulf, Houston, TX.

- Dixon, T. E., and Anderson, R. H. 1976. "Implementation of the design to cost concept", *Proceedings of the 1976 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 224-229.

- Dowlatshahi, S. 1992. "Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach", *Journal of Production Research*, 30 (8), pp. 1803-1818.

- Duffuaa, SO. 2000. *Mathematical models in maintenance planning and scheduling. In Maintenance, Modelling and Optimization*, Ben-Daya M, Duffuaa SO, Raouf A, Editors., Kluwer Academic Publishers, Boston.

- Durairaj, S. and Ong, S. 2002. "Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies", *Corporate Environmental Strategy*, Vol. 9, No. 1, pp.30-39.

- DOD Guide LCC-1, DOD Guide LCC-2, DOD Guide LCC-3. 1998. "Life Cycle Costing Procurement Guide, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions", *Department of Defense*, Washington, D.C.

- Earles, D. R. 1974. "Design to operation and support costs". *Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 149-153.

- Ebeling, C. 1997. *Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw Hill Companies, USA.

- Ehrlenspiel, K. 1987. "Reduction of product costs in West Germany", *International Conference on Engineering Design*, ICED '87, August, pp. 796-806.

- Elsayed, E.A. 1982. "Reliability Analysis of a container spreader", *Microlelectronics and Reliability*, Vol. 22, Issue 4, pp. 723-734.

- Elsayed, E. A. 1996. *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman INC, New York.

- Fabrycky,W. J. 1987. "Designing for the life cycle", *Mechanical Engineering*, January, pp. 72-74.

- Fabrycky, W. J. 1997. *Análisis del Coste de Ciclo de Vida de los Sistemas*, ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

- Fabrycky, W. J. and Blanchard, B. S. 1991. *Life Cycle Costing and Economic Analysis*, Prentice Hall, Inc, Englewwod Cliff, New Jersey.

- Fad, B. E., and Summers, R. M. 1988. "Parametric estimating for new business ventures", *Engineering Costs and Production Economics*, 14, pp.165-176.

- Fleischer, G. A., and Khoshnevis, B. 1986. "Incorporating economic impact assessment into computer-aided design", *Proceedings of the International Industrial Engineering Conference*, pp. 163-174.

- French, M. J. 1990. "Function costing: potential aid to designers", *Journal of Engineering Design*, 1, (1), pp. 47-53.

- Gaete, A. 2001. "Evaluación de Ciclo de Vida en activos Industriales", *Congreso Nacional de Mantenimiento*, Santiago de Chile, pp. 113-120.

- Gansler, J. S. 1974. "Application of life cycle costing to the DoD system acquisition decision process", *Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 147-148.

- Gelders L., Mannaerts P.; and Maes J. 1994. "Manufacturing strategy, performance indicators and improvement programmes", *International Journal of production Research*, 32 (4), pp. 797-805.

- Glantsching, W. J. 1994. "Green design: an introduction to issues and challenges", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology ± Part A*, 17 (4), pp. 508-513.

- Goffin, K. 2000. "Design for supportability: essential component of new product development", *Research-Technology Management*, Vol. 43 No. 2, March/April, pp. 40-47.

- Greves, D., and Schreiber, B. 1993. *Engineering costing techniques in ESA*, WWW-http://esapub.esriu.esa.it.pointtobullet/greves1.html

- Gupta, Y. P. 1983. "Life cycle cost models and associated uncertainties. In Electronics Systems Effectiveness and Life Cycle Costing", *NATO ASI Series*, Vol. F,J,K. Skwirzynski (ed.) (Berlin: Springer), pp. 535-549.

- Hurtado, J.L., Joglar, F.and Modarres, M. 2005. "Generalized Renewal Process: Models, Parameter Estimation and Applications to Maintenance Problems", *International Journal on Performability Engineering*, Vol. 1, No. 1, paper 3, pp. 37-50.

- Ireson, W. Grant, Clyde F. Coombs Jr., Richard Y. Moss. 1996. *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.

- Ishii, K., Eubanks, C. F., and Di Marco, P. 1994. "Design for product retirement and material life-cycle", *Materials and Design*, 15 (4), pp. 225-233.

- Jovane, A., Atling, L., Armillotta, A., Eversheim,W., Feldmann,K., Seliger,G., and Roth,M. 1993. "A key issue in product life cycle: disassembly". *Annals of the CIRP*, 42, pp. 651-658.

- Kaminskiy, M., and Krivtsov, V. 1998. "A Monte Carlo approach to repairable system reliability analysis", *Probabilistic safety assessment and management*, New York: Springer; 1998, pp. 1063-1068.

- Kaplan, RS., and Norton DP. 1992. "The Balanced Scorecard - measures that drive performance", *Harvard Business Review*, 70 (1), pp. 71-9.

- Karyagina, M., Wong, W., Vlacic, L. 1998. "Life cycle cost modelling using marked point processes", *Reliability Engineering & System Safety*, 59, pp. 291-298

- Kececioglu, D. 1991. *Reliability and Life Testing Handbook*, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey.

- Knezevic, J. 1993. *Maintainability and Supportability Engineering - A Probabilistic Approach* (plus software PROBCHAR), McGraw Hill, Londres (Inglaterra).

- Keys, L. K. 1990. "System life cycle engineering and DF X". *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, 13 (1), pp. 83-93.

- Kijima, M., Sumita, N. 1987. "A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative Markovian increments", *Journal Appl. Prob.*, 23, pp. 71-88.

- Kijima, M., 1977. *Markov processes for stochastic modeling*, Chapman &Hall, London.

- Kirk, S. and Dellisola, A. 1996. *Life Cycle Costing for Design Professionals*, McGraw Hill, New York.

- Kolarik,W. J. 1980. "Life cycle costing and associated models", *Proceedings of the American Institute of Industrial Engineers*, 1980 Spring Annual Conference, pp. 58-64.

- Kriwet, A., Zussman, E., and Seliger, G. 1995. "Systematic integration of design for recycling into product design", *International Journal of Production Economics*, 38, pp. 15-22.

- Lee, J. 2003. "E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19 (6), pp. 501-507.

- Levy, H. and Sarnat, M. 1990. *Capital Investment and Financial Decisions*, 4th Edition, Prentice Hall.

- "Life Cycle Costing Workbook: A guide for implementation of Life on Life Cycle Costing in the Federal Supply Services". 1989. *U.S. General Services Administration*, Washington.

- "Life Cycle Analysis as an Aid Decision Making". 1985. *Building Information Circular, Department of Energy, Office of Facilities Engineering and Property Management*, Washington.

- Mackenzie, J 1997. "Turn your company's strategy into reality", *Manufacturing Management*, January, pp. 6-8.

- McNichols, G. R. 1979. "Treatment of uncertainty on life-cycle costing", *Proceedings of the 1979 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 56-61.

- McNichols, G. R. 1983. "Uncertainties of LCC predictions. Electronics Systems Effectiveness and Life Cycle Costing", *In NATO ASI Series*, Vol. F, J, K. Skwirzynski (ed.) (Berlin: Springer), pp. 583-594.

- Markeset, T. and Kumar, U. 2001. "R&M and risk analysis tools in product design to reduce life-cycle cost and improve product attractiveness", *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, January, Philadelphia, pp. 116-122.

- Markeset, T. and Kumar, U. 2003. "Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Volume 9, No. 4, pp. 376-392.

- Martorell, S., Carlos, S., Sanchez, A. and Serradell, V. 2000. "Constrained optimization of test intervals using a steady-state genetic algorithm". *Reliability Engineering & System Safety*, 67, pp. 215 – 232.

- Martorell, S., Villanueva, J.F., Nebot, Y., Carlos, S., Sánchez, A., Pitarch, J.L. and Serradell, V. 2005. "RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms". *Reliability Engineering & System Safety*, 87, pp. 65 – 75.

- Meeker, W., Escobar, L. 1998. *Statistical methods for reliability data*, Jhon Wiley & Sons, New York.

- Metzler, E.G. 1974. "Forcing functions integrate R&M into design", *Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 52-55.

- Miyakawa, S., and Ohashi, T. 1986. "The Hitachi new assemblability evaluation method (AFM)", *Proceedings of the Ontario Conference on Product Design for Assembly*, Newport, RI, USA.

- Modarres, M., Kaminskiy, M., Kritsov, V. 1999. *Reliability engineering and risk analysis*, Marcel Dekker, New York.

- Moubray J. 1997. *Reliability Centered Maintenance - RCM II*, (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

- Nachlas, J. 1995. *Fiabilidad,* ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

- Navas, J. 1997. *Ingeniería de Mantenimiento*. Editorial de la Universidad de los Andes, Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento, Mérida, Venezuela.

- Navinchandra, D. 1991. "Design for environmentability", *Design Theory and Methodology*, ASME, DE-31, pp. 119-125.

- Noble, J.S., and Tanchoco, J.M.A. 1990. "Concurrent design and economic justification in developing a product", *International Journal of Production Research*, 28 (7), pp. 1225-1238.

- Ostwald, P. F. 1974. *Cost Estimating for Engineering and Management*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, USA.

- Palmer, RD. 1999. *Maintenance Planning and Scheduling*, New York: McGraw-Hill.

- Parra, C. 2002. "Evaluación de la Influencia de la Confiabilidad en el Ciclo de Vida de 16 Motocompresores del Distrito Maturín", *Informe Técnico INT-9680-2002*, PDVSA INTEVEP, Venezuela, pp. 34-56.

- Parra, C. y López, R. 2006. "Diseño de software de análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad - ICDM 2006", *Informe Técnico INT-8790-2002*, PDVSA INTEVEP, Venezuela, pp. 12-26.

- Parra, C. y Omaña C. 2003. "Análisis determinístico del ciclo de vida y evaluación del factor confiabilidad en 56 motocompresores de gas del Distrito San Tomé", *Congreso Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento*, Ponencias del Congreso, Bogotá Colombia, artículo 23, pp. 122-130.

- Pintelon, LM. and Gelders LF. 1992. "Maintenance management decision making", *European Journal of Operational Research*, 58, pp. 301-317.

- Pugh, S. 1974. "Manufacturing cost information - the needs of the engineering designer", *Proceedings of the Conference Information Systems for Designers*, Southampton, UK, Paper 12, pp.11-18.

- Riddell, H., Jennings, A. 2001. *Asset Investment & Life Cycle Costing*, The Woodhouse Partnership, Technical paper, London.

- Roca, J.L. 1987. "An approach in the life cycle costing of an integrated logistic support", *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, Issue 1, pp. 25-27.

- Ruff, D. N., and Paasch, R. K. 1993. "Consideration of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems", *Design Theory and Methodology*, ASME, DE- 53, pp. 175-187.

- Scarf, P.A. 1997. "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research*, 99 (3), pp. 493-506.

- Scheuring, J. F., Bras, B., and Lee, K.-M. 1994. "Significance of design for disassembly in integrated disassembly and assembly process", *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, 3 (2), pp. 21-33.

- Shields, M. D., and Young, S. M. 1991. "Managing product life cycle costs: an organizational model", *Cost Management*, Autumn, pp. 39-52.

- Smith, C. and Knezevic, J. 1996. "Achieving quality through supportability: part 1: concepts and principles", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 2 No. 2, pp. 21-9.

- Smith, D. J., and Babb, A. H. 1973. *Maintainability Engineering*, Halsted Press.

- Sullivan, J. L., and Young, S. B. 1995. "Life cycle analysis/assessment", *Advanced Materials and Processes*, 147 (2), pp. 37-40.

- Tejms, H.C. 1986. *Stochastic Modelling and Analysis*, Wiley, USA.

- Tipnis, V. A. 1993. "Evolving issues in product life cycle design", *Annals of the CIRP*, 42 (1), pp. 169-173.

- Tsang, A., Jardine, A. and Kolodny, H. 1999. "Measuring maintenance performance: a holistic approach", *International Journal of Operations and Production Management*, 19 (7), pp. 691-715.

- Tzemos, S., and Dippold, D. 1986. "Stochastic cost estimating in repository life-cycle cost analysis", *Proceedings of the Annual Meeting of the Nuclear Materials Management*, 15, New Orleans, LA, June, pp. 279-290.

- Vagliasindi, F. 1989. *Gestire la manutenzione*, Perche e come. Milano: Franco Angeli.

- Vanneste, SG., and Van Wassenhove, LN. 1995. "An integrated and structured approach to improve maintenance", *European Journal of Operational Research*, 82, pp. 241-257.

- Vasily, K., 2000. "A Monte Carlo approach to modeling and estimation of the generalized renewal process in repairable system reliability analysis", Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Maryland.

- Vasiliy, V. 2007. "Recent advances in theory and applications of stochastic point process model in reliability engineering", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 92, No. 5, pp.549-551.

- Weirda, L. S. 1988. "Product cost-estimation by the designer", *Engineering Costs and Production Economics*, 13, pp. 189-198.

- Westney,R. E. 1983. "Computer-aided design - a new tool for the cost engineer?", *Engineering Costs and Production Economics*, 7, pp. 205-212.

- Weule,H. 1993. "Life cycle analysis a strategic element for future products and manufacturing technologies", *Annals of the CIRP*, 42 (1), pp. 181-184.

- Willians, D., Scott R. 2000. "Reliability and Life Cycle Costs", RM-Reliability Group, Technical Paper, Texas, November, pp. 23-45.

- Wilson, R. L. 1986. "Operations and support cost model for new product concept development", *Proceedings of the 8th Annual Conference on Components and Industrial Engineering*, pp. 128-131.

- Wireman, T. 1998. *Developing performance indicators for managing maintenance*, New York: Industrial Press.

- Woodhouse, J. 1991. "Turning engineers into businessmen". *14th National Maintenance Conference*, London.

- Woodhouse, J. 1993. *Managing Industrial Risk*, Chapman Hill Inc, London..

- Woodward, D. G. 1997. "Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application", *International Journal of Project Management*, 15(6). pp. 335-344.

- Yan, X., and Gu, P. 1995. "Assembly/disassembly sequence planning for life-cycle cost estimation", *Manufacturing Science and Engineering*, ASME, MED-2 (2)/Mh-3 (2), pp. 935-956.

- Yañez, M., Joglar, F., Mohammad, M. 2002. "Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience", *Reliability Engineering & System Safety*, 77, pp. 167-180.

- Zussman, E., Kriwet, A., and Seliger, G. 1994. "Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling", *Annals of the CIRP*, 43 (1), pp. 9-14.

- Zust, R., and Wagner,R. 1992. "Approach to the identification and quantification of environmental effects during product life". *Annals of the CIRP*, 41 (1), pp. 473-476.

APÉNDICE I

- Artículo presentado en el Congreso ESREL 08 (European Safety and Reliability Congress, Septiembre, 2008, Valencia, España) denominado: ***"Non-homogeneous Poisson Process (NHPP), stochastic model applied to evaluate the economic impact of failure in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA)"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Moreu, J. Gómez y V. González. Publicado en: ***Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and applications – Martorell et al. (eds), 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5, pp.929 – 938***.

Safety,Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and applications – Martorell et al. (eds), 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5, p.929 – 938.

Non-homogeneous Poisson Process (NHPP), stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the life cycle cost analysis (LCCA)

Carlos Parra Márquez*, Adolfo Crespo Márquez**, Pedro Moreu de León**, Juan Gómez Fernández* & Vicente González Díaz*

Department Industrial Management School of Engineering of the University of Seville
*** Associate Professor, *PhD student of the Industrial Management Program at the School of Engineering of the University of Seville*

Abstract:
This paper aims to explore different aspects related with the failure costs (non reliability costs) within the life cycle cost analysis (LCCA) of a production asset. Life cycle costing is a well-established method used to evaluate alternative asset options. This methodology takes into account all costs arising during the life cycle of the asset. These costs can be classified as the 'capital expenditure' (CAPEX) incurred when the asset is purchased and the 'operating expenditure' (OPEX) incurred throughout the asset's life. In this paper we explore different aspects related with the "failure costs" within the life cycle cost analysis, and we describe the most important aspects of the stochastic model called: **Non-homogeneous Poisson Process (NHPP)**. This model will be used to estimate the frequency failures and the impact that could cause the diverse failures in the total costs of a production asset. The paper also contains a case study where we applied the above mentioned concepts. Finally, the model presented provides maintenance managers with a decision tool that optimizes the life cycle cost analysis of an asset and will increase the efficiency of the decision-making process related with the control of failures.

Keywords: *Asset; Failures; Life Cycle Cost Analysis (LCCA); Non-homogeneous Poisson Process (NHPP); Maintenance; Reliability; Repairable Systems*

1. INTRODUCTION

With the purpose of optimizing the costs and to improve the profitability of the productive processes, the denominated organizations of World Class category (Mackenzie, 1997), dedicate enormous efforts to visualize, analyze, implant and execute strategies for the solution of problems, that involve decisions in high impact areas: security, environment, production goals, products quality, operation costs and maintenance. In the last years, specialists in the areas of value engineering and operations direction have improved the quantification process of the costs, including the use of techniques that quantify the Reliability factor and the impact of the failure events on the total costs of a production system along their life cycle (Woodhouse, 1993). These improvements have allowed diminishing the uncertainty in the process of decisions making in vital importance areas such as: design, development, maintenance, substitution and acquisition of production assets. It is important to clear up that, in this whole process, many decisions and actions exist, technical as much as not technical, that should be adopted through the whole use period of an industrial asset. Product support and maintenance needs of systems are more or less decided during the design and manufacturing phase (Markeset and Kumar, 2001). Outlines that most of these actions, particularly those that correspond to the design phase of the production system, have a high impact in the total life cycle of the asset, being of particular interest, those decisions related with the improvement process of the "Reliability" factor (quality of the design, used technology, technical complexity, frequency of failures, costs of preventive/corrective maintenance, maintainability levels and accessibility), since these aspects, have a great influence on the total cost of the asset's life cycle, and they influence in great measure on the possible expectations to extend the useful life of the production systems to reasonable costs (see, e.g. Blanchard, 2001; Blanchard and Fabrycky, 1998; Goffin, 2000; Markeset and Kumar, 2001; Smith and Knezevic, 1996 and Woodward, 1997).

2. ANTECEDENTS OF THE LCCA TECHNIQUES

In the last years, the investigation area related with the Life cycle Costs Analysis, has continued its development, as much in the academic level as to the industrial level. It is important to mention the existence of other methodologies that have emerged in the area of LCCA, such as: Life cycle Costs Analysis and Environmental Impact, Total Costs Analysis of Production Assets, among other (Durairaj and Ong, 2002). These methodologies have their particular characteristics, although regarding the estimation process of the costs for failure events impact, they propose Reliability analysis usually based on rate of constant failures. The antecedents of the LCCA are shown next (Kirt and Dellisola, 1996):

- 1930, one of the first records that are known of the LCCA techniques is found in the book named *Principles of Engineering Economics by Eugene L. Grant*.
- 1933, the first reference of Life cycle Analysis by the Government of the United States shows up carried out by part of the federal department: *General Accounting Office (GAO)*, which is related to the purchase of a series of tractors.
- 1950, Lawrence D. Miles originated the concept of Value Engineering at *General Electric*, incorporating aspects related with the techniques of LCCA.
- 1960, Stone (1975) began to work in England, giving as a result in the decade of the 70's the publication of two of the biggest texts developed in Europe in relation to costs engineering.
- 1960, the *Logistics Management Institute* of the United States developed an investigation in the area of Obsolescence Engineering for the Ministry of Defense. The final result of this investigation was the publication of the first Life cycle Cost Manual in the year of 1970.
- 1972, the Ministry of Defense of the United States, promoted the development of a group of Manuals with the purpose of applying the LCCA Methodology, in all the Logistics areas.
- 1974, the Department of Energy of the United States, decided to develop its expansion and energy consumption plans supported by the analysis of Life cycle.
- 1975, the Federal Department of Supplies and Services of the United States developed a Logistics and Acquisition technique based on the LCCA.
- 1979, the Department of Energy introduced a proposal (44 FR 25366, April 30 1979) which intended that evaluations of LCCA were included in all the new constructions and mayor modifications in government facilities.
- 1980, the American Society for Testing and Materials (ASTM) developed a series of standards and database oriented to ease the search of necessary information for the application of the LCCA.
- 1992, two investigators of the University of Virginia, Wolter Fabrycky and B.S. Blanchard, developed a model of LCCA - see details in (Fabrycky and Blanchard, 1993), in which they include a structured process to calculate the costs of Non Reliability starting from the estimate of constant values of failures per year (constant rate of failures).
- 1994, Woodward (1997), from the School of Business of the University of Staffordshire (England, Great Britain), developed an investigation line in which included basic aspects of analysis of the Reliability factor and their impact on the Costs of Life cycle.
- 1998, David Willians and Robert Scott of the consulting firm RM-Reliability Group, developed a model of LCCA based on the Weibull Distribution to estimate the frequency of failures and the impact of the Reliability Costs, see details in (Zohrul Kabil, 1987, Ebeling, 1997 and Willians and Scott, 2000).
- 1999, the Woodhouse Partnership consulting group participated in the European Project EUREKA, specifically inside the line of investigation denominated MACRO (Maintenance Cost/Risk Optimization Project) and they developed an LCCA commercial software of denominated APT Lifespan, see details in (Roca, 1987, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Woodhouse, 1991 and Riddell and Jennings, 2001).
- 2001, the Woodhouse Partnership consulting firm and the Venezuelan Oil Technological Institute (INTEVEP), put on test this model, evaluating the Total Costs of Life cycle for 56 gas compression systems, used for the extraction of heavy oil in the San Tomé District (Venezuela), see details in (Parra and Omaña, 2003).

3. BASIC ASPECTS OF THE LCCA

To evaluate the costs associated to the life cycle of a production system, a collection of procedures that group together exists in the denominated: Techniques of Life cycle Costs Analysis. The early implementation of the costs analysis techniques allows to evaluate in advance the potential design problems and to quantify the potential impact in the costs along the life cycle of the industrial assets (Durairaj and Ong, 2002). Next, some basic definitions of Life cycle Cost Analysis are presented:

- Kirt and Dellisolla (1996) defines the LCCA as a technique of economic calculation that allows to optimize the making of decisions associated to the design processes, selection, development and substitution of the assets that conform a production system. It intends to evaluate in a quantitative way all the costs associated to the economic period of expected useful life, expressed in yearly equivalent monetary units (Dollars/year, Euros/year, Pesos/year).
- Woodhouse (1991) defines the LCCA like a systematic process of technical-economical evaluation, applied in the selection and replacement process of production systems that allows to consider in simultaneous way economic and Reliability aspects, with the purpose of quantifying the real impact of all the costs along the life cycle of the assets ($/year), and in this way, be able to select the asset that contributes the largest benefits to the productive system.

The great quantity of variables that must be managed when estimating the real costs of an asset along its useful life generates a scenario of high uncertainty (Durairaj and Ong, 2002). The combination among inflation, rise/decrease of the costs, reduction/increase of the purchasing power, budget limitations, increase of the competition and other similar characteristics, has generated a restlessness and interest about the total cost of the assets. Often the total cost of the production system is not visible, in particular those costs associated with: operation, maintenance, installation tests, personnel's training, among others.

Additionally, the dynamics of the economic scenario generate problems related to the real determination of the asset's cost. Some of them are (Fabrycky, 1997):

- The factors of costs are usually applied incorrectly. The individual costs are inadequately identified and, many times, they are included in the wrong category: the variable costs are treated as fixed (and vice versa); the indirect costs are treated as direct, etc.
- The countable procedures do not always allow a realistic and timely evaluation of the total cost. Besides, it is often difficult (if not impossible) to determine the costs, according to a functional base.
- Many times the budgetary practices are inflexible with regard to the change of funds from a category to another, or, from one year to another.

To avoid the uncertainty in the costs analysis, the studies of economic viability should approach all the aspects of the life cycle cost. The tendency to the variability of the main eco-

nomic factors, together with the additional problems already enunciated, have driven to erroneous estimates, causing designs and developments of production systems that are not suitable from the point of view of cost-benefit (Fabrycky, 1997). It can be anticipated that these conditions will worsen, unless the design engineers assume a bigger grade of consideration of the costs. Inside the dynamic process of change, the acquisition costs associated to the new systems are not the only ones to increase, but rather the operation and maintenance costs of the systems already in use also do it in a quick way. This is due mainly to a combination of such factors as (Fabrycky, 1997):

- Inaccuracies in the estimates, predictions and forecasts of the events of failures (Reliability), ignorance of the probability of occurrence of the different failure events inside the production systems in evaluation.
- Ignorance of the deterioration processes behavior.
- Lack of forecast in the maintenance processes and ignorance of the modern techniques of maintenance management.
- Engineering changes during the design and development.
- Changes in the own construction of the system.
- Changes in the expected production patterns.
- Changes during the acquisition of system components.
- Setbacks and unexpected problems.

3.1. *Characteristics of the costs in a production asset*

The cost of a life cycle is determined identifying the applicable functions in each one of its phases, calculating the cost of these functions and applying the appropriate costs during the whole extension of the life cycle. So that it is complete, the cost of the life cycle should include all the costs of design, fabrication and production (Ahmed, 1995). In the following paragraphs the characteristics of the costs in the different phases of an asset's life cycle are summarized (Levi and Sarnat, 1990):

- Investigation, design and development costs: initial planning, market analysis, product investigation, design and engineering requirements, etc.
- Production, acquisition and construction costs: industrial engineering and analysis of operations, production (manufacturing, assembly and tests), construction of facilities, process development, production operations, quality control and initial requirements of logistics support.
- Operation and support costs: operations inputs of the production system, planned maintenance, corrective maintenance (it depends on the Reliability Factor) and costs of logistical support during the system's life cycle.
- Remove and elimination costs: elimination of non repairable elements along the life cycle, retirement of the system and recycling material.

From the financial point of view, the costs generated along the life cycle of the asset are classified in two types of costs:

- CAPEX: Capital costs (design, development, acquisition, installation, staff training, manuals, documentation, tools and facilities for maintenance, replacement parts for assurance, withdrawal).
- OPEX: Operational costs: (manpower, operations, planned maintenance, storage, recruiting and corrective maintenance - penalizations for failure events / low Reliability).

3.2. *Impact of the reliability in the LCCA*

Woodhouse (1991) outlines that to be able to design an efficient and competitive productive system in the modern industrial environment, it is necessary to evaluate and to quantify in a detailed way the following two aspects:

- Costs: aspect that is related with all the costs associated to the expected total life cycle of the production system. Including: design costs, production, logistics, development, construction, operation, preventive/corrective maintenance, withdrawal.
- Reliability: factor that allows to predict the form in which the production processes can lose their operational continuity due to events of accidental failures and to evaluate the impact in the costs that the failures cause in security, environment, operations and production.

The key aspect of the term Reliability is related to the operational continuity. In other words, we can affirm that a production system is "Reliable" when it is able to accomplish its function in a secure and efficient way along its life cycle. Now, when the production process begins to be affected by a great quantity of accidental failure events - (low Reliability), this scenario causes high costs, associated mainly with the recovery of the function (direct costs) and with growing impact in the production process (penalization costs). See Figure 1:

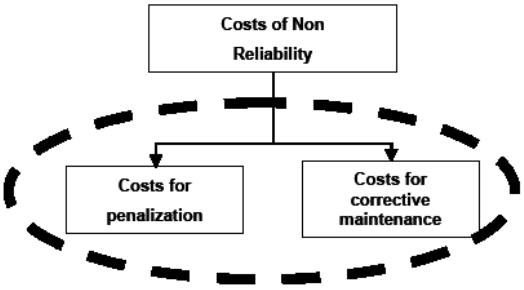


Figure 1: Economic impact of the Reliability

The totals costs of Non Reliability are described next (Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ruff and Paasch, 1993 and Woodhouse, 1993):

- Costs for penalization:

- *Downtime*: opportunity losses/deferred production, production losses (unavailability), operational losses, impact in the quality, impact in security and environment.

- Costs for corrective maintenance:

- Manpower: direct costs related with the manpower (own or hired) in the event of a non planned action.
- Materials and replacement parts: direct costs related with the consumable parts and the replacements used in the event of an unplanned action.

The impact in the costs that an asset of low Reliability generates is associated directly with the behavior of the following index:

$\Lambda(t) =$ expected number of failures in a time interval $[0,t]$

According to Woodhouse (1991), the increase of the costs is caused in its great majority, for the lack of forecast in case of unexpected failures appearances, scenario basically provoked by ignorance and lack of analysis in the design phase of the aspects related with the Reliability. This situation brings as a result an increase in the operation costs (costs that were not considered in a beginning) affecting in this way the profitability of the production process.

It is important to mention that the results obtained from the LCCA, reach their maximum effectiveness during the phases of: initial development, visualization, and conceptual, basic and details engineering. Once the design has been completed, it is substantially difficult to modify the economic results. Also, the economic considerations related with the life cycle should be specifically outlined during the phases previously mentioned, if it is that one wants to totally exploit the possibilities of an effective economic engineering. It is necessary to keep in mind that almost two thirds of the life cycle cost of an asset or system are already determined in the preliminary conceptual and design phase (70-85% of value creation and costs reduction opportunities), according to (Dowlatshahi, 1992).

4. STOCHASTIC MODELS CONSIDERED FOR THE ANALYSIS OF THE RELIABILITY

The following sections discuss the different stochastic models considered for the analysis of the frequency of failures in repairable units and systems.

4.1. Ordinary renewal process (ORP)

This model assumes that, following a repair, the unit returns to an "as good as new" (AGAN) condition. In this process, the interarrival times, xi, between successive failures (see Figure 2) are considered independently and identically distributed random variables. It is a generalization of a Homogeneous Poisson Process (HPP). This model represents an ideal situation; it is only appropriate for replaceable items and hence has very limited applications in the analysis of repairable components and systems. Variations of the ORP can also be defined. The modified renewal process, where the first interarrival time differs from the others, and the superimposed renewal process (union of many independent ORPs) are examples of these possible variations (Ascher and Feingold, 1984).

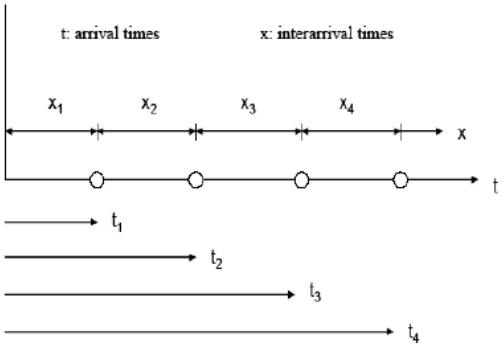


Figure 2. Basic notation for a stochastic point process

4.2. Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)

This model is also called "minimal repair" and it assumes that the unit returns to an "as bad as old" (ABAO) condition after a repair. So that, after the restoration the item is assumed to be operative but as old as it was before the failure. The NHPP differs from the HPP in that the rate of occurrence of failures varies with time rather the being constant (Ascher and Feingold, 1984). Unlike the previous model, in this process the interarrival times are neither independent nor identically distributed. The NHPP is a stochastic point process in which the probability of occurrence of n failures in any interval [*t1, t2*] has a Poisson distribution with:

$$mean = \int_{t1}^{t2} \lambda(t)dt \quad (1)$$

where λ(t) is the rate of occurrence of failures (ROCOF) defined as the inverse of the expected inter-arrival times, 1/E[*xi*] (Ascher and Feinfold, 1984 and Crow, 1974).

4.3 Generalized renewal process (GRP).

A repairable system may end up in one of the five possible states after a repair:
a. As good as new
b. As bad as old
c. Better than old, but worse than new
d. Better than new
e. Worse than old

The two models described before, ordinary renewal process and NHPP, account for the first two states respectively. However, the last three repair states have received less attention since they involve more complex mathematical models. Kijima and Sumita (1987) proposed a probabilistic model for all the after-repair states called Generalized Renewal Process (GRP). According to this approach, the ordinary renewal process and the NHPP are considered specific cases of the generalized model. The GRP theory of repairable items introduces the concept of virtual age (*An*). This value represents the calculated age of the element immediately after the *n*th repair occurs. For $An = y$ the system has a time to the $(n + 1)$th failure, x_{n+1}, which is distributed according to the following cumulative distribution function (*cdf*):

$$F(x|A_n = y) = \frac{F(x+y) - F(y)}{1 - F(y)} \quad (2)$$

where *F(x)* is the *cdf* of the time to the first failure (TTFF) distribution of a new component or system.

The summation:

$$S_n = \sum_{i=1}^{n} x_i \quad (3)$$

with $S_* = 0$, is called the real age of the element. The model assumes that the *n*th repair only compensates for the damage accumulated during the time between the $(n - 1)$th and the *n*th failure. With this assumption, the virtual age of the component or system after the *n*th repair is:

$$A_n = A_{n-1} + qx_n = qS_n \quad (4)$$

where *q* is the repair effectiveness (or rejuvenation) parameter and $A_0 = 0$. According to this model, the result of assuming a value of $q = 0$ leads to an ordinary renewal process (as good as new), while the assumption of $q = 1$ corresponds to a non-homogeneous Poisson process (as bad as old). The values of *q* that fall in the interval $0 < q < 1$ represent the after-repair states in which the condition of the element is better than old but

worse than new, whereas the cases where $q > 1$ correspond to a condition worse than old. Similarly, cases with $q < 0$ would suggest a component or system restored to a state better than new. Therefore, physically speaking, q can be seen as an index for representing the effectiveness and quality of repairs (Yañez et al., 2002). Even though the q value of the GRP model constitutes a realistic approach to simulate the quality of maintenance, it is important to point out that the model assumes an identical q for every repair in the item life. A constant q may not be the case for some equipment and maintenance process, but it is a reasonable approach for most repairable components and systems.

The three models described above have advantages and limitations. In general, the more realistic is the model, the more complex are the mathematical expression involved. The NHPP model has been proved to provide good results even for realistic situations with better-than-old but worse-than-new repairs (Yañez et al., 2002). Based on this, and given its conservative nature and manageable mathematical expressions, the NHPP was selected for this particular work. The specific analytical modeling is discussed in the following section.

4.4. Non-homogeneous Poisson process analytical modeling

The NHPP is a stochastic point process in which the probability of occurrence of n failures in any interval [*t1,t2*] has a Poisson distribution with the mean:

$$\overline{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt \tag{5}$$

where $\lambda(t)$ is the rate of occurrence of failures (ROCOF). Therefore, according to the Poisson process:

$$\Pr[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt\right]^n \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt\right]}{n!} \tag{6}$$

where $n = 0, 1, 2,\ldots$ are the total expected number of failures in the time interval [*t1,t2*]. The total expected number of failures is given by the cumulative intensity function:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t)dt \tag{7}$$

One of the most common forms of ROCOF used in reliability analysis of repairable systems is the Power Law Model (Ascher and Feinfold, 1984 and Crow, 1974):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \tag{8}$$

This form comes from the assumption that the inter-arrival times between successive failures follow a conditional Weibull probability density function, with parameters α and β. The Weibull distribution is typically used in maintenance area due to its flexibility and applicability to various failure processes, however, solutions to Gamma and Log-normal distributions are also possible. This model implies that the arrival of the *i*th failure is conditional on the cumulative operating time up to the $(i - 1)$th failure. Figure 3 shows a schematic of this conditionality (Yañez et al., 2002). This conditionality also arises from the fact that the system retains the condition of as bad as old after the $(i - 1)$th repair. Thus, the repair process does not restore any added life to the component or system.

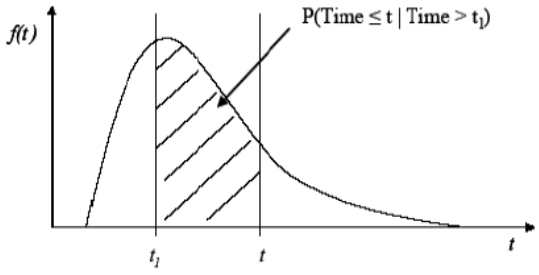


Figure 3. Conditional probability of occurrence of failure

In order to obtain the maximum likelihood (ML) estimators of the parameters of the power law model, consider the following definition of conditional probability:

$$P(T \le t | T > t_1) = \frac{F(t) - F(t_1)}{R(t_1)} = \frac{1 - R(t) - 1 + R(t)}{R(t_1)} = 1 - \frac{R(t)}{R(t_1)} \tag{9}$$

where F(·) and R(·) are the probability of component failure and the reliability at the respective times. Assuming a Weibull distribution, Eq. (9) yields:

$$F(t_i) = 1 - \exp\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{10}$$

Therefore, the conditional Weibull density function is:

$$f(t_i) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta-1} . \exp\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{11}$$

For the case of the NHPP, different expressions for the likelihood function may be obtained. We will use expression based on estimation at a time *t* after the occurrence of the last failure and before the occurrence of the next failure, see details on these expressions in (Modarres et al., 2002).

4.4.1. Time terminated NHPP maximum likelihood estimators

In the case of time terminated repairable components, the maximum likelihood function *L* can be expressed as:

$$L = \prod_{i=1}^{n} f(t_i) = f(t_1)\prod_{i=2}^{n} f(t_i)R(t_n|t) \tag{12}$$

Therefore:

$$L=\left\{\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right\}$$

$$\times\left\{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{n-1}\prod_{i=2}^{n}\left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left(\sum_{i=2}^{n}\left[\left(\frac{t_{i-1}}{\alpha}\right)^{\beta}-\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right)\right\}$$

$$\times\left\{\exp\left[\left(\frac{t_n}{\alpha}\right)^{\beta}-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right\} \quad (13)$$

Again, the ML estimators for the parameters are calculated. The results are (Ascher and Feinfold, 1984 and Crow, 1974):

$$\hat{\alpha}=\frac{t_n}{n^{\frac{1}{\beta}}} \quad (14)$$

$$\hat{\beta}=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{t_n}{t_i}\right)} \quad (15)$$

where t*i* is the time at which the *i*th failure occurs, t*n* is the total time where the last failure occurred, and *n* is the total number of failures. The total expected number of failures in the time interval $[t_n, t_{n+s}]$ by the Weibull cumulative intensity function is (Modarres et al., 2002):

$$\Lambda(t_n,t_{n+s})=\frac{1}{\alpha^{\beta}}\left[(t_n+t_s)^{\beta}-(t_n)^{\beta}\right] \quad (16)$$

where t_s is the time after the last failure occurred in the one which needs to be considered the number of failures and

$$t_n=\sum_{i=1}^{n}t_i \quad (17)$$

5. NHPP MODEL PROPOSED FOR THE EVALUATION OF THE COSTS PER FAILURE

Asiedu and Gu (1998) have published a state of the art review on LCCA. Most of the methodologies proposed in the last years, include basic analysis that allow to quantify the economic impact that the failures inside a production system generate. In relation to the quantification of the costs for non Reliability in the LCCA, we recommend to use NHPP model. This model proposes to evaluate the impact of the main failures on the costs structure of a production system, starting from a simple process, which is summarized next: first, the more important types of failures are determined, then, it is assigned to each failure type a constant value of occurrence frequency per year (this value will not change along the expected useful life), later on, the impact in costs per year is estimated, generated by the failures to the production, operations, environment and security, and finally, the total impact in costs of the failures for the years of expected useful life is considered in present value to a specific discount rate. Next, are detailed the steps to estimate the costs for failures according to NHPP model:

1. Identify for each alternative to evaluate the main types of failures. This way for certain equipment there will be $f = 1 \ldots\ldots$ F types of failures.
2. Determine for the *n* (total of failures), the times to failures t_f. This information will be gathered by the designer based on records of failures, databases and/or experience of maintenance and operations personnel.
3. Calculate the Costs for failures C_f (\$/failure). These costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact.
4. Define the expected frequency of failures per year $\Lambda(t_n, t_{n+s})$. This frequency is assumed as a constant value per year for the expected cycle of useful life. The $\Lambda(t_n, t_{n+s})$ is calculated starting from the expression (16). This process is carried out starting from the times to failures registered t_f by failure type (step 2). The parameters α and β, are set starting from the following expressions (14) and (15). In the expression (16), t_s it will be a year (1 year) or equivalent units (8760 hours, 365 days, 12 months, etc.). This time t_s represents the value for estimate de frequency of failures per year.
5. Calculate the total costs per failures per year TCP_f, generated by the different events of stops in the production, operations, environment and security, with the following expression:

$$TCP_f=\sum_{f}^{F}\Lambda(t_n,t_{n+s})\times C_f \quad (18)$$

The obtained equivalent annual total cost, represents the probable value of money that will be needed every year to pay the problems of reliability caused by the event of Failure, during the years of expected useful life.

6. Calculate the total costs per failures in present value $PTCP_f$. Given a yearly value TCP_f, the quantity of money in the present (today) that needs to be saved, to be able to pay this annuity for the expected number of years of useful life (T), for a discount rate (i). The expression used to estimate the $PTCP_f$ is shown next:

$$PTCP_f=TCP_f\times\frac{(1+i)^T-1}{i\times(1+i)^T} \quad (19)$$

Later on, to the costs calculated by non reliability, the rest of the evaluated costs (investment, planned maintenance, operations, etc.) are added, the total cost is calculated in present value for the selected discount rate and the expected years of useful life and the obtained result is compared with the total costs of the other evaluated options.

5. CASE STUDY

The following data of failures will be used for the three models previously explained. This information was gathered by records of failures of a Gas Compressor from Venezuelan National Oil Company. In this equipment have occurred 24 events of failures in 10 years of useful life. Next, the times to failures t_f are presented in months:

Table 1. Times to failures

5	7	3	7	2	4	3	5	8	9	2	4	6	3	4	2	4	3	8	9	4	4	7

This model proposes to evaluate the impact of the failures in the following way:

- Define the types of failures *(f)*. Where $f = 1 \ldots F$ for F types of failures:
$F = 1$ types of failures

- Calculate the Costs per failure C_f (these costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact):

$$C_f = 5000 \frac{\$}{failure}$$

- Define the expected frequency of failures per year $\Lambda(t_n, t_{n+s})$, use expression (16):

$$\Lambda(t_n, t_{n+s}) = \frac{1}{\alpha^{\beta}} \left[t_n + t_s \right)^{\beta} - \left(t_n \right)^{\beta} \right]$$

Where:
$n = 24$ failures

$t_n = \sum_{i=1}^{n} t_i = 5+7+3.....4+7+4 = 117$ months

$t_s = 12$ months

$t_{n+s} = 119$ months

The parameters α and β, are calculated from the expressions (14) and (15):
$\alpha = 6.829314945$
$\beta = 1.11865901$
The expected frequency of failures per year:

$$\Lambda(t_n, t_{n+s}) = 2.769896307 \frac{failures}{year},$$

this frequency is assumed as a constant value per year for the expected cycle of useful life.

- Calculate the total Costs per failures per year TCP_f, use expression (18):

$$TCP_f = 2.769896307 \frac{failures}{year} \times 5000 \frac{\$}{failures} = 13849.48154 \frac{\$}{year}$$

- Calculate the total cost per failure in present value $PTCP_f$, use expression (19), for a period T=10 years and discount rate *i*=10%:

$$PTCP_f = 73734.805\$,$$

value that represents the quantity of money (today) that the organization needs to be able to cover the annual expenses projected by failures in the next 10 years, with a discount factor of 10%. For this example, the total expected number of failures in the time interval [*tn,tn+s*] is estimated by the NHPP stochastic model (Weibull cumulative intensity function), see Modarres et al., 2002.

5.1. *Limitations of the model evaluated*

The NHPP model has been proved to provide good results even for realistic situations with better-than-old but worse-than-new repairs (Hurtado et al., 2005). Based on this, and given its conservative nature and manageable mathematical expressions, the NHPP was selected for this particular work. The model described above has advantages and limitations. In general, the more realistic is the model, the more complex are the mathematical expression involved. The main strengths and weakness of this model are summarized next:

Strenghts:

- It is a useful and quite simple model to represent equipment under aging (deterioration).
- Involves relatively simple mathematical expressions.
- It is a conservative approach and in most cases provides results very similar to those of more complex models like GRP (Hurtado et al., 2005).

Weakness:

- Is not adequate to simulate repair actions that restore the unit to conditions better than new or worse than old.

6. FUTURE DIRECTIONS

The specific orientation of this work toward the analysis of the Reliability factor and its impact in the costs, is due to, that great part of the increment of the total costs during the expected cycle of useful life of a production system, is caused in its majority, for the lack of prevision in the face of unexpected appearance of failure events, scenario basically provoked by ignorance and by the absence of a technical evaluation in the design phase of the aspects related with the Reliability. This situation brings as a result an increment in the total costs of operation (costs that were not considered in the beginning) affecting in this way the profitability of the production process.
In the process of analysis of the costs along the life cycle of an asset, many decisions and actions exist that should be taken, being of particular interest for this work, those aspects related with the process of improvement of the Reliability (quality of the design, used technology, technical complexity, frequency of failures, costs of preventive/corrective maintenance, maintainability levels and accessibility), since these, have a great impact on the total cost of the life cycle of the asset, and they influence in great measure on the possible expectations to extend the useful life of the assets to reasonable costs. For these reasons, it is of supreme importance inside the process to estimate the life cycle of the assets, to evaluate and to analyze detailedly the aspects related with the Reliability.
It is important to mention that inside the LCCA techniques a potential area of optimization related with the evaluation of the Reliability impact exists. In the near future the new proposals of evaluation of the costs generated by aspects of low Reliability will use advanced mathematical methods such as:

- Stochastic methods see (Tejms, 1986, Karyagina et al., 1998, Yañez et al., 2002, Hurtado et al., 2005 and Vasiliy, 2007).
- Advanced maintenance optimization using genetic algorithms see (Martorell et al., 2000 and Martorell et al., 2005)
- Monte Carlo simulation techniques see (Barringer, 1997, Barringer and Webber, 1996, and Kaminskiy and Krivtsov, 1998)
- Advanced Reliability distribution analysis see (Elsayed, 1982, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ireson, et al., 1996, Elsayed, 1996, Scarf, 1997, Ebeling, 1997 and Dhillon, 1999)
- Markov simulation methods see (Roca, 1987, Kijima and Sumita, 1987 Kijima, 1997 and Bloch-Mercier, 2000).

These methods will have their particular characteristics and their main objective will be to diminish the uncertainty inside the estimation process of the total costs of an asset along the expected useful life cycle.

Finally, it is not feasible to develop a unique LCCA model, which suits all the requirements. However, it is possible to develop more elaborate models to address specific needs such as a Reliability cost-effective asset development.

REFERENCES

Ahmed, N. U. 1995. "A design and implementation model for life cycle cost management system", *Information and Management*, 28, pp. 261-269.

Asiedu, Y. and Gu, P. 1998. "Product lifecycle cost analysis: state of art review", *International Journal of Production Research*, Vol. 36 No. 4, pp. 883-908.

Ascher, H. and Feingold, H. "Repairable System Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes", New York, Marcel Dekker, 1984.

Barlow, R.E., Clarotti, C.A. and Spizzichino, F. 1993. *Reliability and Decision Making*, Chapman & Hall, London.

Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1996. "Life Cycle Cost Tutorial", *Fifth International Conference on Process Plant Reliability*, Gulf Publishing Company, Houston, TX.

Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1997. "Life Cycle Cost & Reliability for Process Equipment", *8th Annual ENERGY WEEK Conference & Exhibition*, George R. Brown Convention Center, Houston, Texas, Organized by American Petroleum Institute.

Barroeta, C. 2005. *Risk and economic estimation of inspection policy for periodically tested repairable components*, Thesis for the Master of Science, University of Maryland, Faculty of Graduate School, College Park,Cod.Umi-umd-2712, p.77, August, Maryland.

Blanchard, B.S. 2001. "Maintenance and support: a critical element in the system life cycle", *Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies*, paper 003, May, Melbourne.

Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J. 1998. *Systems Engineering and Analysis*, 3rd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Bloch-Mercier, S. 2000. "Stationary availability of a semi-Markov system with random maintenance", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 16, pp. 219-234.

Crow, LH. 1974. "Reliability analysis for complex repairable systems", *Reliability and biometry*, Proschan F, Serfling RJ, eds., SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.

Dhillon, B. S. 1989. *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*, Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Dhillon, B.S. 1999. *Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance*, Gulf, Houston, TX.

Dowlatshahi, S. 1992. "Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach", *Journal of Production Research*, Vol. 30 (8), pp. 1803-1818.

Durairaj, S. and Ong, S. 2002. "Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies", *Corporate Environmental Strategy*, Vol. 9, No. 1, pp. 30-39.

DOD Guide LCC-1, DOD Guide LCC-2, DOD Guide LCC-3. 1998. "Life Cycle Costing Procurement Guide, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions", *Department of Defense*, Washington, D.C.

Ebeling, C. 1997. *Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw Hill Companies, USA.

Elsayed, E.A. 1982. "Reliability Analysis of a container spreader", *Microlelectronics and Reliability*, Vol. 22, No 4, pp. 723-734.

Elsayed, E. A. 1996. *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman INC, New York.

Fabrycky, W. J. 1997. *Análisis del Coste de Ciclo de Vida de los Sistemas*, ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

Fabrycky, W. J. and Blanchard, B. S. 1993. *Life Cycle Costing and Economic Analysis*, Prentice Hall, Inc, Englewwod Cliff, New Jersey.

Goffin, K. 2000. "Design for supportability: essential component of new product development", *Research-Technology Management*, Vol. 43, No. 2, pp. 40-7.

Hurtado, J.L., Joglar, F.and Modarres, M. 2005. "Generalized Renewal Process: Models, Parameter Estimation and Applications to Maintenance Problems", *International Journal on Performability Engineering*, Vol. 1, No. 1, paper 3, pp. 37-50.

Ireson, W. Grant, Clyde F. Coombs Jr., Richard Y. Moss. 1996. *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.

Kaminskiy M, Krivtsov V. 1998. "A Monte Carlo approach to repairable system reliability analysis", *Probabilistic safety assessment and management*, Springer, pp. 1063-1068.

Karyagina, M., Wong, W., Vlacic, L. 1998. "Life cycle cost modelling using marked point processes", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 59, pp. 291-298.

Kececioglu, D. 1991. "Reliability and Life Testing Handbook", Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey.

Kijima, M., Sumita, N. 1987. "A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative Markovian increments", *Journal Appl. Prob.*, Vol. 23, pp. 71-88.

Kijima, M. 1977. "Markov processes for stochastic modeling", Chapman &Hall, London.

Kirk, S. and Dellisola, A. 1996. *Life Cycle Costing for Design Professionals*, McGraw Hill, New York, pp. 6-57.

Levy, H. and Sarnat, M. 1990. *Capital Investment and Financial Decisions*, 4th Edition, Prentice Hall, New York.

"Life Cycle Costing Workbook: A guide for implementation of Life on Life Cycle Costing in the Federal Supply Services". 1989. *U.S. General Services Administration*, Washington.

"Life Cycle Analysis as an Aid Decision Making". 1985. *Building Information Circular*, Department of Energy, Office of Facilities Engineering and Property Management, Washington.

Mackenzie, J. 1997. "Turn your company's strategy into reality", *Manufacturing Management*, January, pp. 6-8.

Markeset, T. and Kumar, U. 2001. "R&M and risk analysis tools in product design to reduce life-cycle cost and improve product attractiveness", *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 22-25 January, Philadelphia, pp. 116-122.

Markeset, T. and Kumar, U. 2003. "Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 376-392.

Martorell, S., Carlos, S., Sanchez, A. and Serradell, V. 2000. "Constrained optimization of test intervals using a steady-state genetic algorithm". *Reliability Engineering & System Safety* 67, 215 – 232.

Martorell, S., Villanueva, J.F., Nebot, Y., Carlos, S., Sánchez, A., Pitarch, J.L. and Serradell, V. 2005. "RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms". *Reliability Engineering & System Safety* 87, 65 – 75.

Modarres, M., Kaminskiy, M. and Kritsov V.1999. *Reliability engineering and risk analysis*. Marcel Dekker Inc., New York.

Nachlas, J. 1995. *Fiabilidad*, ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

Navas, J. 1997. *Ingeniería de Mantenimiento*, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Parra, C. 2002. "Evaluación de la Influencia de la Confiabilidad en el Ciclo de Vida de 16 Motocompresores del Distrito Maturín", *Informe Técnico INT-9680*, PDVSA INTEVEP, Venezuela.

Parra, C. y Omaña C. 2003. "Análisis determinístico del Ciclo de Vida y evaluación del factor Confiabilidad en Motocompresores de gas para extracción de petróleo", *Congreso Internacional de Mantenimiento, Colombia*, Bogotá, Colombia.

Riddell, H., Jennings, A. 2001. "Asset Investment & Life Cycle Costing", *The Woodhouse Partnership*, Technical paper, London.

Roca, J.L. 1987. "An approach in the life cycle costing of an integrated logistic support", *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 1, pp. 25-27.

Ruff, D. N., and Paasch, R. K. 1993. "Consideration of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems", *Design Theory and Methodology*, ASME, New York, pp. 175-187.

Scarf, P.A. 1997. "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research,* Vol. 99, No. 3, pp. 493-506.

Smith, C. and Knezevic, J. 1996. "Achieving quality through supportability: part 1: concepts and principles", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 21-9.

Tejms, H.C. 1986. *Stochastic Modelling and Analysis*, Wiley and Sons, New York, NY.

Vasiliy, V. 2007. "Recent advances in theory and applications of stochastic point process model in reliability engineering", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 92, No. 5, pp.549-551

Willians, D., Scott R. 2000. "Reliability and Life Cycle Costs", *RM-Reliability Group*, Technical Paper, Texas, TX, November.

Woodhouse, J. 1991. "Turning engineers into businessmen", *14th National Maintenance Conference*, London.

Woodhouse, J. 1993. *Managing Industrial Risk*, Chapman Hill Inc, London.

Woodward, D. G. 1997. "Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application", *International Journal of Project Management*, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344.

Yañez, M., Joglar, F., Mohammad, M. 2002. "Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 77, pp. 167-180.

APÉNDICE II

- Artículo presentado en el Congreso ESREL 06 (European Safety and Reliability Congress, Septiembre, 2006, Estoril, Portugal) denominado: ***"On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Publicado en: ***Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds), 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5, pp.2203 – 2214.***

Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds)
© 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5

On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models

C. Parra, A. Crespo & P. Cortés
University of Seville, Department of Industrial Management, School of Engineering, Seville, Spain

S. Fygueroa
University of the Andes, Maintenance Engineering Post Graduate School of Mechanical Engineering, Mérida, Venezuela

ABSTRACT: Life cycle costing is a well-established method used to evaluate alternative asset options. This methodology takes into account all costs arising during the life cycle of the asset. In this paper we explore different aspects related with the ´non reliability` costs within the life cycle cost analysis (LCCA), and we describe three basic models found in literature (constant failures rate, deterministic failures rate and Weibull distribution failures rate), these models allow to quantify the economic impact that could cause the diverse failures in the entire costs. The paper also contains a case study where we applied the above mentioned concepts and models to the life cycle cost assessment of a certain asset. Finally we do present a summary of results and discuss about the limitations of the different models. The paper concludes presenting possible directions of future research work.

1. INTRODUCTION

With the purpose of optimizing the costs and to improve the profitability of the productive processes, the denominated organizations of World Class category (Mackenzie, 1997), dedicate enormous efforts to visualize, analyze, implant and execute strategies for the solution of problems, that involve decisions in high impact areas: security, environment, production goals, products quality, operation costs and maintenance. In the last years, specialists in the areas of value engineering and operations direction have improved the quantification process of the costs, including the use of techniques that quantify the Reliability factor and the impact of the failure events on the total costs of a production system along their life cycle (Woodhouse, 1993). These improvements have allowed diminishing the uncertainty in the process of decisions making in vital importance areas such as: design, development, maintenance, substitution and acquisition of production assets. It is important to clear up that, in this whole process, many decisions and actions exist, technical as much as not technical, that should be adopted through the whole use period of an industrial asset. Product support and maintenance needs of systems are more or less decided during the design and manufacturing phase (Markeset and Kumar, 2001). Outlines that most of these actions, particularly those that correspond to the design phase of the production system, have a high impact in the total life cycle of the asset, being of particular interest, those decisions related with the improvement process of the "Reliability" factor (quality of the design, used technology, technical complexity, frequency of failures, costs of preventive/corrective maintenance, maintainability levels and accessibility), since these aspects, have a great influence on the total cost of the asset's life cycle, and they influence in great measure on the possible expectations to extend the useful life of the production systems to reasonable costs (see, e.g. Blanchard, 2001; Blanchard and Fabrycky, 1998; Goffin, 2000; Markeset and Kumar, 2001; Smith and Knezevic, 1996 and Woodward, 1997).

2. ANTECEDENTS OF THE LCCA TECHNIQUES

In the last years, the investigation area related with the Life cycle Costs Analysis, has continued its development, as much in the academic level as to the industrial level. It is important to mention the existence of other methodologies that have emerged in the area of LCCA, such as: Life cycle Costs Analysis and Environmental Impact, Total Costs Analysis of Production Assets, among other (Durairaj and Ong, 2002). These methodologies have their particular characteristics, although regarding the estimation process of the costs for failure events impact, they propose Reliability analysis usually based on rate of constant failures. The antecedents of the LCCA are shown next (Kirt and Dellisola, 1996):

- 1930, one of the first records that are known of the LCCA techniques is found in the book named *Principles of Engineering Economics by Eugene L. Grant*.
- 1933, the first reference of Life cycle Analysis by the Government of the United States shows up carried out by part of the federal department: *General Accounting Office (GAO)*, which is related to the purchase of a series of tractors.
- 1950, Lawrence D. Miles originated the concept of Value Engineering at *General Electric*, incorporating aspects related with the techniques of LCCA.
- 1960, Stone (1975) began to work in England, giving as a result in the decade of the 70's the publication of two of the biggest texts developed in Europe in relation to costs engineering.

- 1960, the *Logistics Management Institute* of the United States developed an investigation in the area of Obsolescence Engineering for the Ministry of Defense. The final result of this investigation was the publication of the first Life cycle Cost Manual in the year of 1970.
- 1972, the Ministry of Defense of the United States, promoted the development of a group of Manuals with the purpose of applying the LCCA Methodology, in all the Logistics areas.
- 1974, the Department of Energy of the United States, decided to develop its expansion and energy consumption plans supported by the analysis of Life cycle.
- 1975, the Federal Department of Supplies and Services of the United States developed a Logistics and Acquisition technique based on the LCCA.
- 1979, the Department of Energy introduced a proposal (44 FR 25366, April 30 1979) which intended that evaluations of LCCA were included in all the new constructions and mayor modifications in government facilities.
- 1980, the American Society for Testing and Materials (ASTM) developed a series of standards and database oriented to ease the search of necessary information for the application of the LCCA.
- 1992, two investigators of the University of Virginia, Wolter Fabrycky and B.S. Blanchard, developed a model of LCCA - see details in (Fabrycky and Blanchard, 1993), in which they include a structured process to calculate the costs of Non Reliability starting from the estimate of constant values of failures per year (constant rate of failures).
- 1994, Woodward (1997), from the School of Business of the University of Staffordshire (England, Great Britain), developed an investigation line in which included basic aspects of analysis of the Reliability factor and their impact on the Costs of Life cycle.
- 1998, David Willians and Robert Scott of the consulting firm RM-Reliability Group, developed a model of LCCA based on the Weibull Distribution to estimate the frequency of failures and the impact of the Reliability Costs, see details in (Zohrul Kabil, 1987, Ebeling, 1997 and Willians and Scott, 2000).
- 1999, the Woodhouse Partnership consulting group participated in the European Project EUREKA, specifically inside the line of investigation denominated MACRO (Maintenance Cost/Risk Optimization Project) and they developed an LCCA commercial software of denominated APT Lifespan, see details in (Roca, 1987, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Woodhouse, 1991 and Riddell and Jennings, 2001).
- 2001, the Woodhouse Partnership consulting firm and the Venezuelan Oil Technological Institute (INTEVEP), put on test this model, evaluating the Total Costs of Life cycle for 56 gas compression systems, used for the extraction of heavy oil in the San Tomé District (Venezuela), see details in (Parra and Omaña, 2003).

3. BASIC ASPECTS OF THE LCCA

To evaluate the costs associated to the life cycle of a production system, a collection of procedures that group together exists in the denominated: Techniques of Life cycle Costs Analysis. The early implementation of the costs analysis techniques allows to evaluate in advance the potential design problems and to quantify the potential impact in the costs along the life cycle of the industrial assets (Durairaj and Ong, 2002). Next, some basic definitions of Life cycle Cost Analysis are presented:

- Kirt and Dellisolla (1996) defines the LCCA as a technique of economic calculation that allows to optimize the making of decisions associated to the design processes, selection, development and substitution of the assets that conform a production system. It intends to evaluate in a quantitative way all the costs associated to the economic period of expected useful life, expressed in yearly equivalent monetary units (Dollars/year, Euros/year, Pesos/year).
- Woodhouse (1991) defines the LCCA like a systematic process of technical-economical evaluation, applied in the selection and replacement process of production systems that allows to consider in simultaneous way economic and Reliability aspects, with the purpose of quantifying the real impact of all the costs along the life cycle of the assets ($/year), and in this way, be able to select the asset that contributes the largest benefits to the productive system.

The great quantity of variables that must be managed when estimating the real costs of an asset along its useful life generates a scenario of high uncertainty (Durairaj and Ong, 2002). The combination among inflation, rise/decrease of the costs, reduction/increase of the purchasing power, budget limitations, increase of the competition and other similar characteristics, has generated a restlessness and interest about the total cost of the assets. Often the total cost of the production system is not visible, in particular those costs associated with: operation, maintenance, installation tests, personnel's training, among others.

Additionally, the dynamics of the economic scenario generate problems related to the real determination of the asset's cost. Some of them are (Fabrycky, 1997):

- The factors of costs are usually applied incorrectly. The individual costs are inadequately identified and, many times, they are included in the wrong category: the variable costs are treated as fixed (and vice versa); the indirect costs are treated as direct, etc.
- The countable procedures do not always allow a realistic and timely evaluation of the total cost. Besides, it is often difficult (if not impossible) to determine the costs, according to a functional base.
- Many times the budgetary practices are inflexible with regard to the change of funds from a category to another, or, from one year to another.

To avoid the uncertainty in the costs analysis, the studies of economic viability should approach all the aspects of the life cycle cost. The tendency to the variability of the main economic factors, together with the additional problems already enunciated, have driven to erroneous estimates, causing designs and developments of production systems that are not suitable from the point of view of cost-benefit (Fabrycky, 1997). It can be anticipated that these conditions will worsen, unless the design engineers assume a bigger grade of consideration of the costs. Inside the dynamic process of change, the acquisition costs associated to the new systems are not the only ones to increase, but rather the operation and maintenance costs of the systems already in use also do it in a quick way. This is due mainly to a combination of such factors as (Fabrycky, 1997):

- Inaccuracies in the estimates, predictions and forecasts of the events of failures (Reliability), ignorance of the probability of occurrence of the different failure events inside the production systems in evaluation.
- Ignorance of the deterioration processes behavior.
- Lack of forecast in the maintenance processes and ignorance of the modern techniques of maintenance management.
- Engineering changes during the design and development.
- Changes in the own construction of the system.
- Changes in the expected production patterns.
- Changes during the acquisition of system components.
- Setbacks and unexpected problems.

3.1. *Characteristics of the costs in a production asset*

The cost of a life cycle is determined identifying the applicable functions in each one of its phases, calculating the cost of these functions and applying the appropriate costs during the whole extension of the life cycle. So that it is complete, the cost of the life cycle should include all the costs of design, fabrication and production (Ahmed, 1995). In the following paragraphs the characteristics of the costs in the different phases of an asset's life cycle are summarized (Levi and Sarnat, 1990):

- Investigation, design and development costs: initial planning, market analysis, product investigation, design and engineering requirements, etc.
- Production, acquisition and construction costs: industrial engineering and analysis of operations, production (manufacturing, assembly and tests), construction of facilities, process development, production operations, quality control and initial requirements of logistics support.
- Operation and support costs: operations inputs of the production system, planned maintenance, corrective maintenance (it depends on the Reliability Factor) and costs of logistical support during the system's life cycle.
- Remove and elimination costs: elimination of non repairable elements along the life cycle, retirement of the system and recycling material.

From the financial point of view, the costs generated along the life cycle of the asset are classified in two types of costs:

- CAPEX: Capital costs (design, development, acquisition, installation, staff training, manuals, documentation, tools and facilities for maintenance, replacement parts for assurance, withdrawal).
- OPEX: Operational costs: (manpower, operations, planned maintenance, storage, recruiting and corrective maintenance - penalizations for failure events / low Reliability).

3.2. *Impact of the reliability in the LCCA*

Woodhouse (1991) outlines that to be able to design an efficient and competitive productive system in the modern industrial environment, it is necessary to evaluate and to quantify in a detailed way the following two aspects:

- Costs: aspect that is related with all the costs associated to the expected total life cycle of the production system. Including: design costs, production, logistics, development, construction, operation, preventive/corrective maintenance, withdrawal.
- Reliability: factor that allows to predict the form in which the production processes can lose their operational continuity due to events of accidental failures and to evaluate the impact in the costs that the failures cause in security, environment, operations and production.

The key aspect of the term Reliability is related to the operational continuity. In other words, we can affirm that a production system is "Reliable" when it is able to accomplish its function in a secure and efficient way along its life cycle. Now, when the production process begins to be affected by a great quantity of accidental failure events - (low Reliability), this scenario causes high costs, associated mainly with the recovery of the function (direct costs) and with growing impact in the production process (penalization costs). See Figure 1:

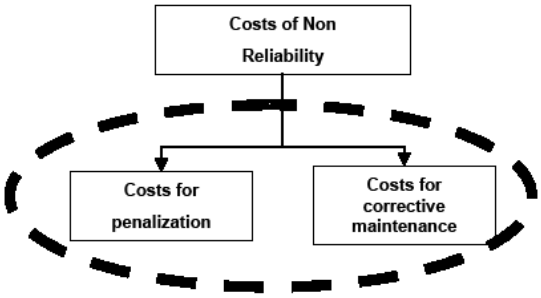


Figure 1: Economic impact of the Reliability

The totals costs of Non Reliability are described next (Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ruff and Paasch, 1993 and Woodhouse, 1993):

- Costs for penalization:

- *Downtime*: opportunity losses/deferred production, production losses (unavailability), operational losses, impact in the quality, impact in security and environment.

- Costs for corrective maintenance:

- Manpower: direct costs related with the manpower (own or hired) in the event of a non planned action.
- Materials and replacement parts: direct costs related with the consumable parts and the replacements used in the event of an unplanned action.

The impact in the costs that an asset of low Reliability generates is associated directly with the behavior of the following two indexes:

- The mean time between failures (MTBF):

$$MTBF = \sum \frac{time \cdot between \cdot failures}{number \cdot of \cdot failures} \quad (1)$$

- The mean time to repair (MTTR):

$$MTTR = \sum \frac{time \cdot to \cdot repair}{number \cdot of \cdot failures} \quad (2)$$

According to Woodhouse (1991), the increase of the costs is caused in its great majority, for the lack of forecast in case of unexpected failures appearances, scenario basically provoked by ignorance and lack of analysis in the design phase of the aspects related with the Reliability. This situation brings as a result an increase in the operation costs (costs that were not considered in a beginning) affecting in this way the profitability of the production process.

It is important to mention that the results obtained from the LCCA, reach their maximum effectiveness during the phases of: initial development, visualization, and conceptual, basic and details engineering. As it is presented in figure 3, once the design has been completed, it is substantially difficult to modify the economic results. Also, the economic considerations re-

lated with the life cycle should be specifically outlined during the phases previously mentioned, if it is that one wants to totally exploit the possibilities of an effective economic engineering. It is necessary to keep in mind that almost two thirds of the life cycle cost of an asset or system are already determined in the preliminary conceptual and design phase (70-85% of value creation and costs reduction opportunities), according to (Dowlatshahi, 1992).

4. EVALUATION OF THE RELIABILITY IMPACT IN THE LCCA - REVIEW OF THE BASIC MODELS

The use of the LCCA techniques has increased in a remarkable way mainly due to the development of a great number of methodologies, which propose simple methods to evaluate different designs or alternative courses of action, with the objective of being able to choose the best way of using the human and economic resources available at the moment of developing a production system (Durairaj and Ong, 2002). Asiedu and Gu (1998) have published a state of the art review on LCCA. Most of the methodologies proposed in the last years, include basic analysis that allow to quantify the economic impact that the failures inside a production system generate. Next, general aspects of the investigation lines are described three basic methods to estimate the impact of the Reliability costs in the LCCA.

4.1. *Constant Failures Rate Model*

In general terms, the Constant Failures Rate Model on LCCA proposes the realization of the following activities, see details in (Woodward, 1997, Woodhouse, 1993 and Riddell and Jennings, 2001):

1. Establish the operational conditions of the system. Describe the ways of operation of the system (Complete loads, half load, without load) and the production capacities to satisfy.
2. Establish the utilization factors. These factors should indicate the functioning state inside each operation mode.
3. Identify the different options to be evaluated. Select the existent alternatives that can be covered with the demanded production needs.
4. Identify for each alternative all the categories of basic costs: initial investment, development, acquisition, planned maintenance, restocking.
5. Determine for each alternative the costs for non Reliability. Identify the main types of failures and the occurrence frequency per year - which will be a constant value along the life cycle of the asset (this aspect is detailed later on).
6. Determine the critical costs. Identify the costs categories of more impact, and analyze the factors that propitiate the high costs (propose control strategies).
7. Calculate all the costs in present value (P) for each alternative. Define the discount factor and the expected period of useful life and estimate the total costs in present value for each evaluated alternative.
8. Select the winning alternative. Compare the total costs of the evaluated alternatives and select the option that generates lesser cost for the expected useful life period.

In relation to the quantification of the costs for non Reliability (point 5), this model proposes to evaluate the impact of the main failures on the costs structure of a production system, starting from a simple process, which is summarized next: first, the more important types of failures are determined, then, it is assigned to each failure type a constant value of occurrence frequency per year (this value will not change along the expected useful life), later on, the impact in costs per year is estimated, generated by the failures to the production, operations, environment and security, and finally, the total impact in costs of the failures for the years of expected useful life is considered in present value to a specific discount rate. Next, the steps are detailed to continue to estimate the costs for failures according to Constant Failures Rate Model:

1. Define the types of failures *(f)*. Where $f = 1 \ldots F$ for F types of failures.
2. Define the expected frequency of failures per year δ_f. This frequency is assumed as a constant value per year for the expected cycle of useful life. The δ_f is calculated starting from the following expression:

$$\delta_f = \frac{N}{T} \tag{3}$$

Where:
N = total of failures
T= expected number of years of useful life

3. Calculate the Costs per failure C_f. These costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact ($/failure).
4. Calculate the total Costs per failures per year TCP_f. The TCP_f is calculated starting from the following expression:

$$TCP_f = \sum_{f=1}^{F} C_f \times \delta_f \tag{4}$$

Where:
$f = 1 \ldots F$ types of different failures, F = total number of failure types
C_f = cost associated to the failure f, in $/ failure
δ_f = frequency of the failure type f, expressed in failures per year

5. Calculate the total cost per failure in present value $PTCP_f$. Given a yearly value TCP_f, the current quantity of money (today) that one needs to start saving (today), to be able to pay this annuity for the expected number of years of useful life (T), for a discount rate (i). The expression to use to estimate the $PTCP_f$ in present value is shown next:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} \tag{5}$$

Later on, to the costs calculated by non Reliability, the rest of the evaluated costs (investment, planned maintenance, operations, etc.) are added, the total cost is calculated in present value for the selected discount rate and the expected years of useful life, and the obtained result is compared to the total costs of the other evaluated options.

4.2. *Deterministic Failures Rate Model*

The Deterministic Failures Rate Model on LCCA proposes the execution of the following steps, see details in (Fabrycky and Blanchard, 1993):

1. Define the production process to evaluate.
2. Identify the possible alternatives that will cover the production demands - systems to evaluate.

3. Define for each alternative the detailed structure of costs. The method classifies the costs in five categories:
   - Investigation and development costs.
   - Construction and production costs.
   - Costs of preventive maintenance,
   - Costs of corrective maintenance - costs for non Reliability, caused by events of accidental failures (this step is detailed later on).
   - Disassembly - withdrawal costs.
4. Quantify for each alternative the costs for each one of the defined categories.
5. Identify for each alternative the factors that contribute the most to the increment of the costs for category.
6. Propose strategies for each alternative that would help to minimize the costs of most impact - analysis of sensibility including the proposed recommendations to diminish the impact from the factors of more contribution to the costs.
7. Quantify for each one of the evaluated alternatives, the total costs in annual equivalent value (A), for a discount rate (i) and a number of years of expected service (t).
8. Select the alternative that generates the lowest costs along the period of expected useful life.

This method is quite similar to the Constant Failure Rate Model and it differs basically for two aspects:

- The total costs are estimated in equivalent annual values (A).
- The frequencies of failures may vary in a deterministic way, in the different periods of time that conform the expected cycle of useful life.

In relation to the quantification of the costs for non Reliability (point 3), this model propose to evaluate the impact of the failures in the following way:

1. Identify for each alternative to evaluate the main types of failures *(f)*. Where $f = 1 \ldots F$, for F types of failures.
2. Define in a deterministic way for each failure type, the expected frequency of failures $\delta_f{}^t$ for the year t. The frequency of failures per year is considered deterministic, since it is defined starting from failures records, databases and/or experience of maintenance and operations personnel. In this case the designer has to carry out an information search related with the frequency in which they occur in a year, each one of the defined failure types.
3. Calculate the Costs for failures C_f (\$/failure). These costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact.
4. Calculate the Costs per failure type per year $CP_f{}^t$.

$$CP_f{}^t = \delta_f{}^t \times C_f \tag{6}$$

5. Convert to present value the costs for failure type per year $PCP_f{}^t$. Given a Future value $CP_f{}^t$ the present value is calculated for every year (t) to a discount rate and a specific period of time.

$$PCP_f{}^t = CP_f{}^t \times \frac{1}{(1+i)^t} \tag{7}$$

6. Calculate the total costs per failure in present value $PTCP_f{}^t$. All the costs for failures types in present value are summed until the expected number of years of useful life (T).

$$PTCP_f^t = \sum_{t=1}^{T} (P) CP_f^t \tag{8}$$

7. Calculate the annual equivalent total cost *AETC*. Given a present value $PTCP_f{}^t$, calculate its annual equivalent total cost *AETC* for the expected number of years of useful life (T) and the defined discount rate (i).

$$AETC = PTCP_f^t \times \frac{i \times (1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \tag{9}$$

Afterwards, to the costs calculated by non Reliability, the rest of the evaluated costs are added (investment, planned maintenance, operations, etc.), the total cost is calculated in annual equivalent value and the obtained result is compared to the total costs of the other evaluated options.

4.3. *Weibull Distribution Failures Rate Model*

In terms of costs analysis structure, the proposal of Weibull Distribution Failures Rate Model, is similar to the Constant Failures Rate Model, the main difference resides in the process to estimate the costs for non Reliability, since, these costs, are estimated with failure frequencies calculated starting from the probabilistic distribution of Weibull, see details in (Zohrul Kabil, 1987, Ebeling, 1997 and Willians and Scott, 2000). In relation to the quantification process of the costs for Reliability, this model proposes to evaluate the impact of the failures in the following way:

1. Identify for each alternative to evaluate the main types of failures. This way for certain equipment there will be $f = 1 \ldots\ldots$ F types of failures.
2. Determine for each failure type the times between expected failures (operative times). This information will be gathered by the designer based on records of failures, databases and/or experience of maintenance and operations personnel.
3. Calculate the Costs for failures C_f (\$/failure). These costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact.
4. Determine in a probabilistic way the frequency of expected failures δ_f with the Weibull Distribution. This process is carried out starting from the times between failures registered t_f by failure type:

Notation:

δ_f = frequency of failures = failure/time

t_f = time between failures

MTBF = mean time between failures - value of expected time between failures = time/failures. The MTBF is the inverse of the frequency

Γ = Gamma function, see in (Kececioglu, 1991) tabulated values of the Γ function

α = characteristic life, time/failures, is calculated starting from the times between failures

β = form parameter, is calculated starting from the times between failures

If the random variable t_f has Weibull Distribution of parameters $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, its density function is (Kececioglu, 1991):

$$f(t_f) = \left(\beta \times t_f{}^{\beta-1}\right) \times e^{-\frac{t_f{}^{\beta}}{\alpha}}, \text{ for } t_f \geq 0 \tag{10}$$

The mean μ is:

$$\mu = \alpha \times \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \quad (11)$$

The variance is:

$$\sigma^2 = \alpha^2 \times \left(\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right) \quad (12)$$

In our case the random variable is represented by the time that the system works without a failure taking place, where the MTBF is the expected value of the random variable t_f is equal to the mean μ .

$$MTBF = \mu = \alpha \times \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \quad (13)$$

The parameters α and β, are set starting from the following expressions, gathered by Navas (1997):

$$\alpha = \exp\left(\frac{\frac{F}{\sum_{i=f}^{F} A_{fi}} - \left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi}\right)\right)}{\left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} - Ln\left(t_{fi}\right)\right) - \left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi}\right)\right)}\right) \quad (14)$$

Where:

$$A_{fi} = \frac{Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-\frac{f}{F+1}}\right)\right)}{Ln\left(t_{fi}\right)} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=f}^{F} A_{fi}}{\sum_{i=f}^{F} \frac{1}{Ln\left(t_{fi}\right)}\left(1 - Ln(\alpha)\right)} \quad (16)$$

In the expressions (14), (15) and (16), f is the number of the specific failure event; F is the total number of evaluated failures and t_{fi} is the time measured between failures in issue.

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \quad (17)$$

5. Calculate the total costs per failures per year TCP_f, generated by the different events of stops in the production, operations, environment and security, with the following expression:

$$TCP_f = \sum_{f}^{F} \delta_f \times C_f \quad (18)$$

The obtained equivalent annual total cost, represents the probable value of money that will be needed every year to pay the problems of reliability caused by the event of Failure, during the years of expected useful life.

6. Calculate the total costs per failures in present value $PTCP_f$. Given a yearly value TCP_f, the quantity of money in the present (today) that needs to be saved, to be able to pay this annuity for the expected number of years of useful life (T), for a discount rate (i). The expression used to estimate the $PTCP_f$ is shown next:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{i \times (1+i)^T} \quad (19)$$

Later on, to the costs calculated by non reliability, the rest of the evaluated costs (investment, planned maintenance, operations, etc.) are added, the total cost is calculated in present value for the selected discount rate and the expected years of useful life and the obtained result is compared with the total costs of the other evaluated options.

5. CASE STUDY

The following data of failures will be used for the three models previously explained. This information was gathered by records of failures of a Gas Compressor from Venezuelan National Oil Company. In this equipment have occurred 24 events of failures in 10 years of useful life. Next, the times between expected failures t_f are presented in months:

Table 1. Times between failures

5	7	3	7	2	4	3	5	8	9	2	4	6	3	4	2	4	3	8	9	4	4	7	4

5.1. *Case study - Constant Failures Rate Model*

This model proposes to evaluate the impact of the failures in the following way:

- Define the types of failures *(f)*. Where $f = 1 \ldots F$ for F types of failures.

$F = 1$ types of failures

- Define the expected frequency of failures per year δ_f , use expression (3).

$N = 24$ events

T =10 years

$\delta_f = 2{,}4 \frac{failures}{year}$, this frequency is assumed as a constant value per year for the expected cycle of useful life.

- Calculate the Costs per failure C_f (these costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact).

$$C_f = 5000 \frac{\$}{failure}$$

- Calculate the total Costs per failures per year TCP_f , use expression (4).

$$TCP_f = 12.000 \frac{\$}{year}$$

- Calculate the total cost per failure in present value $PTCP_f$, use expression (5), for a period T=10 years and discount rate i=10%.

$$PTCP_f = 73734{,}805\$$$

5.2. *Case study – Deterministic Failures Rate Model*

This model proposes to evaluate the impact of the failures in the following way:
- Identify for each alternative to evaluate the main types of failures *(f)*. Where $f = 1 \ldots F$, for F types of failures.
$F = 1$ types of failures
- Define in a deterministic way for each failure type, the expected occurrence frequency for period of time $\delta_f{}^t$.

The frequency of failures per year is defined starting from failures records (Table 1). The expected frequency of failures per year it is shown next:

Table 2. Frequencies of failures per year

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_f{}^t$ =Failures /year	2	3	3	1	3	3	3	1	3	2

- Calculate the Costs for failures C_f ($/ failure) (these costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact).

$$C_f = 5000 \frac{\$}{failure}$$

- Calculate the Costs per failure type per year $CP_f{}^t$, use expression (6). The $CP_f{}^t$ for a 10 year expected useful life, they are shown next:

Table 3. Costs per year for failures: $/year

Year	1	2	3	4	5
$CP_f{}^t$	5.000	15.000	15.000	5.000	15.000
Year	6	7	8	9	10
$CP_f{}^t$	15.000	15.000	5.000	15.000	10.000

- Convert to present value the costs for failure type per year $PCP_f{}^t$, use expression (7). Given a Future value $CP_f{}^t$ the present value is calculated for every year (t) to a discount rate i= 10%. The results in present value are shown next:

Table 4. Costs in present value for failure: $

Year	1	2	3	4	5
$PCP_f{}^t$	4.545,45	12.396,7	11.269,7	3.415,07	9.313,82
Year	6	7	8	9	10
$PCP_f{}^t$	8.467,11	7.697,37	2.332,5	6.361,46	3.855,43

- Calculate the total costs per failure in present value $PTCP_f{}^t$, use expression (8). All the costs for failures types in present value are summed until the expected number of years of useful life T=10 years.

$$PTCP_f^t = 69.954,67\$$$

- Calculate the annual equivalent total cost *AETC*, use expression (9), for the expected number of years of useful life T= 10 years and the defined discount rate i=10%.

$$AETC = 11.335,977 \frac{\$}{year}$$

5.3. Case study - Weibull Distribution Failures Rate Model

In relation to the quantification process of the costs for Reliability, this model proposes to evaluate the impact of the failures in the following way:
- Identify for each alternative to evaluate the main types of failures. This way for certain equipment there will be $f = 1 \ldots\ldots$ F types of failures.
$F = 1$ types of failures
- Determine for each failure type the times between expected failures t_f, see Table 1.

- Calculate the Costs for failures C_f ($/failure). These costs include: costs of replacement parts, manpower, penalization for production loss and operational impact.

$$C_f = 5000 \frac{\$}{failure}$$

- Determine in a probabilistic way the frequency of expected failures δ_f with the Weibull Distribution; use the expressions (13, 14, 15, and 16 y 17):
α = characteristic life = 5,3964 months / failure
β = form parameter = 2,515

$$MTBF = 5{,}3964 \frac{months}{failure} \times \Gamma(1{,}3976)$$

$\Gamma(1,4) = 0,88726$, the Γ value is obtained based on the tabulated Values Chart of the Γ function, see (Kececioglu, 1991).
MTBF = 4,788 months / failure

$$\delta_f = \frac{1}{4{,}788 \frac{months}{failure}} = 0{,}2088 \frac{failure}{month} = 2{,}506 \frac{failures}{year}$$

- Calculate the total costs per failures per year TCP_f, use expression (18).

$TCP_f = 12530 \frac{\$}{year}$, the obtained equivalent annual total cost of 11.000 $, represents the probable value of money that will be needed every year to pay the problems of reliability caused by the event of failures, during the 10 years of expected useful life.

- Calculate the total costs per failures in present value $PTCP_f$, use expression (19), for a period T=10 years and discount rate i=10%.

$$PTCP_f = 76.991,426\$$$

A resume of the results obtained from the three models evaluated are shown next:

- Constant Failures Rate Model
  Total costs per failures in present value: $PTCP_f = 73734,805\$$
  - Value that represents the quantity of money (today), that one needs to be able to cover the annual expenses projected by failures in 10 years, with a discount factor of 10%. It can be visualized, that the frequency of the types of failures per year are constant along the 10 years, it

means that it is expected that the frequency of failures will not change in time and in this way the impact in the costs that the failures generate will also be a constant value per year. The estimation of frequency of failures in this model is very easy (expected number of years of useful life/total of failures).

- Deterministic Failures Rate Model
  Annual equivalent total cost:

  $$AETC = 11.335{,}977 \frac{\$}{year}$$

  - The obtained annual equivalent total cost, represents the mean value of money that will be needed every year to pay the problems of reliability caused by the events of Failures , during the 10 years of expected useful life, with a discount factor of 10%. As it can be visualized, the frequency of failures is not constant and it varies in every year along the expected cycle of useful life

- Weibull Distribution Failures Rate Model
  Total costs per failures in present value: $PTCP_f = 76991{,}426\$$

  - The interpretation is similar to the Constant Failure Rate Model; the value obtained represents the quantity of money (today) that is needed to be able to cover the expected annual expenses by failures in 10 years, with a discount factor of 10%. The difference is that the frequency of failures is estimated with the mean time between failures (MTBF) calculated based on the Weibull Distribution. This model also proposes to keep constant the frequency of failures for each one of the years of expected useful life.

5. 4. *Limitations of the models evaluated*

The limitations of the models evaluated in the process to estimate the Reliability impacts in the LCCA, are shown next:

5.4.1. *Constant Failures Rate Model*

The main limitation is associated with the form of calculation of the Reliability impact in the costs, since it proposes that frequencies of constant failures along the life cycle of the asset to be evaluated are considered, which, in reality does not happen this way, since usually, the frequency of failures changes as the years go by the influenced by of different factors (operations, preventive maintenance, quality of materials, etc.).
This model is regularly used in initial phases of the production systems design, since it provides quick estimates of costs that can guide the selection process of different alternatives. This method should not be used to make conclusive decisions, since it generates a high level of uncertainty in the estimation of the costs for non Reliability, that which can make that erroneous decisions are taken, mainly in the case that the costs per failures are a critical category.

5.4.2. *Deterministic Failures Rate Model*

Is a little more realistic, since it demands the designer to identify patterns of behavior of failure frequency of the systems that it is evaluating, although it continues to be a basic model since the estimate of the frequency of failures is totally deterministic and it depends directly on the designer's capacity in getting good information on the behavior of the different types of failures that can occur in the systems to evaluate.
The main limitation is associated with the process of failure frequency information gathering. In case that the quality of the failures statistical data gathered is not good, it is very probable that real costs estimates of are not made and wrong decisions are made in the selection process of the assets. It is important that the information on the failures is obtained based on historical and well sustained statistical databases. In their defect, one could obtain information, starting from surveys directed to people that have a great experience in the areas of operations, processes and maintenance, and that at the same time, are related with the alternatives to be evaluated.
This method is frequently used in intermediate phases of the project, since for this stage one has better precision on the different alternatives to evaluate and can guide in a more efficient way the search of information related with the types of failures and its occurrence frequency. This model could be used to make conclusive decisions in case the information gathered to estimate the costs of Reliability comes from records of failures and databases of good quality.

5.4.3. *Weibull Distribution Failures Rate Model*

It allows to estimate the expected value of the evaluated random variable (mean time between failures - MTBF) in function of the Weibull Distribution. Starting from this probabilistic value of MTBF, the model quantifies the frequency of failures per year and the costs for non Reliability are estimated. The main limitations of this method are:
- It quantifies the impact of the annual costs for not Reliability in a constant way, since it estimates the frequency of failures for every year with the MTBF calculated with the Weibull Distribution, and it maintains it constant for each one of the years of expected useful life.
- It restricts the Reliability analysis, to the exclusive use of the Weibull Distribution, excluding other existent statistical distributions such as: Log Normal, Exponential Log, Gamma, etc., which can also be used in the calculation of the mean times between failures and the frequencies of failures.
This method is typically used in the final phases of the project, since for this stage one has more precise Reliability information that is adjusted to the operational reality of the different alternatives to evaluate. In relation to the process of Reliability data gathering, the designer should demand to the manufacturers, detailed and good quality information about the more important types of failures and occurrence frequencies.

6. FUTURE DIRECTIONS

The specific orientation of this work toward the analysis of the Reliability factor and its impact in the costs, is due to, that great part of the increment of the total costs during the expected cycle of useful life of a production system, is caused in its majority, for the lack of prevision in the face of unexpected appearance of failure events, scenario basically provoked by ignorance and by the absence of a technical evaluation in the design phase of the aspects related with the Reliability. This situation brings as a result an increment in the total costs of operation (costs that were not considered in the beginning) affecting in this way the profitability of the production process.

In the process of analysis of the costs along the life cycle of an asset, many decisions and actions exist that should be taken, being of particular interest for this work, those aspects related with the process of improvement of the Reliability (quality of the design, used technology, technical complexity, frequency of failures, costs of preventive/corrective maintenance, maintainability levels and accessibility), since these, have a great impact on the total cost of the life cycle of the asset, and they influence in great measure on the possible expectations to extend the useful life of the assets to reasonable costs. For these reasons, it is of supreme importance inside the process to estimate the life cycle of the assets, to evaluate and to analyze detailedly the aspects related with the Reliability.

It is important to mention that inside the LCCA techniques a potential area of optimization related with the evaluation of the Reliability impact exists. In the near future the new proposals of evaluation of the costs generated by aspects of low Reliability will use advanced mathematical methods such as:

- Advanced Reliability distribution analysis see (Elsayed, 1982, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ireson, et al., 1996, Elsayed, 1996, Scarf, 1997, Ebeling, 1997 and Dhillon, 1999)
- Monte Carlo simulation techniques see (Barringer, 1997, Barringer and Webber , 1996, and Kaminskiy and Krivtsov, 1998)
- Markov simulation methods see (Roca, 1987, Kijima and Sumita, 1987 and Kijima, 1997).
- Stochastic methods see (Tejms, 1986, Karyagina et al., 1998, Bloch-Mercier, 2000 and Yañez et al., 2002).

These methods will have their particular characteristics and their main objective will be to diminish the uncertainty inside the estimation process of the total costs of an asset along the expected useful life cycle.

Finally, it is not feasible to develop a unique LCCA model, which suits all the requirements. However, it is possible to develop more elaborate models to address specific needs such as a Reliability cost-effective asset development.

REFERENCES

Ahmed, N. U. 1995. "A design and implementation model for life cycle cost management system", *Information and Management*, 28, pp. 261-269.

Asiedu, Y. and Gu, P. 1998. "Product lifecycle cost analysis: state of art review", *International Journal of Production Research*, Vol. 36 No. 4, pp. 883-908.

Barlow, R.E., Clarotti, C.A. and Spizzichino, F. 1993. *Reliability and Decision Making*, Chapman & Hall, London.

Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1996. "Life Cycle Cost Tutorial", *Fifth International Conference on Process Plant Reliability*, Gulf Publishing Company, Houston, TX.

Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1997. "Life Cycle Cost & Reliability for Process Equipment", *8th Annual ENERGY WEEK Conference & Exhibition*, George R. Brown Convention Center, Houston, Texas, Organized by American Petroleum Institute.

Blanchard, B.S. 2001. "Maintenance and support: a critical element in the system life cycle", *Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies*, paper 003, May, Melbourne.

Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J. 1998. *Systems Engineering and Analysis*, 3rd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Bloch-Mercier, S. 2000. "Stationary availability of a semi-Markov system with random maintenance", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 16, pp. 219-234.

Dhillon, B. S. 1989. Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications, Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Dhillon, B.S. 1999. Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance, Gulf, Houston, TX.

Dowlatshahi, S. 1992. "Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach", *Journal of Production Research*, Vol. 30 (8), pp. 1803-1818.

Durairaj, S. and Ong, S. 2002. "Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies", *Corporate Environmental Strategy*, Vol. 9, No. 1, pp. 30-39.

DOD Guide LCC-1, DOD Guide LCC-2, DOD Guide LCC-3. 1998. "Life Cycle Costing Procurement Guide, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions", *Department of Defense*, Washington, D.C.

Ebeling, C. 1997. *Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw Hill Companies, USA.

Elsayed, E.A. 1982. "Reliability Analysis of a container spreader", *Microlelectronics and Reliability*, Vol. 22, No 4, pp. 723-734.

Elsayed, E. A. 1996. *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman INC, New York.

Fabrycky, W. J. 1997. *Análisis del Coste de Ciclo de Vida de los Sistemas*, ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

Fabrycky, W. J. and Blanchard, B. S. 1993. *Life Cycle Costing and Economic Analysis*, Prentice Hall, Inc, Englewwod Cliff, New Jersey.

Gaete, A. 2001. "Evaluation of Life cycle", *National Congress of Maintenance*, Santiago, Chile.

Goffin, K. 2000. "Design for supportability: essential component of new product development", *Research-Technology Management*, Vol. 43 No. 2, pp. 40-7.

Ireson, W. Grant, Clyde F. Coombs Jr., Richard Y. Moss. 1996. *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.

Kaminskiy M, Krivtsov V. 1998. "A Monte Carlo approach to repairable system reliability analysis", *Probabilistic safety assessment and management*, Springer, pp. 1063-1068.

Karyagina, M., Wong, W., Vlacic, L. 1998. "Life cycle cost modelling using marked point processes", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 59, pp. 291-298.

Kececioglu, D. 1991. "Reliability and Life Testing Handbook", Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey.

Kijima, M., Sumita, N. 1987. "A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative Markovian increments", *Journal Appl. Prob.*, Vol. 23, pp. 71-88.

Kijima, M. 1977. "Markov processes for stochastic modeling", Chapman &Hall, London.

Kirk, S. and Dellisola, A. 1996. *Life Cycle Costing for Design Professionals*, McGraw Hill, New York, pp. 6-57.

Levy, H. and Sarnat, M. 1990. *Capital Investment and Financial Decisions*, 4th Edition, Prentice Hall, New York.

"Life Cycle Costing Workbook: A guide for implementation of Life on Life Cycle Costing in the Federal Supply Services". 1989. *U.S. General Services Administration*, Washington.

"Life Cycle Analysis as an Aid Decision Making". 1985. *Building Information Circular*, Department of Energy, Office of Facilities Engineering and Property Management, Washington.

Mackenzie, J. 1997. "Turn your company's strategy into reality", *Manufacturing Management*, January, pp. 6-8.

Markeset, T. and Kumar, U. 2001. "R&M and risk analysis tools in product design to reduce life-cycle cost and im-

prove product attractiveness", *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 22-25 January, Philadelphia, pp. 116-122.

Markeset, T. and Kumar, U. 2003. "Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 376-392.

Nachlas, J. 1995. *Fiabilidad*, ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España.

Navas, J. 1997. *Ingeniería de Mantenimiento*, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Parra, C. 2002. "Evaluación de la Influencia de la Confiabilidad en el Ciclo de Vida de 16 Motocompresores del Distrito Maturín", *Informe Técnico INT-9680*, PDVSA INTEVEP, Venezuela.

Parra, C. y Omaña C. 2003. "Análisis determinístico del Ciclo de Vida y evaluación del factor Confiabilidad en Motocompresores de gas para extracción de petróleo", *Congreso Internacional de Mantenimiento, Colombia*, Bogotá, Colombia.

Riddell, H., Jennings, A. 2001. "Asset Investment & Life Cycle Costing", *The Woodhouse Partnership*, Technical paper, London.

Roca, J.L. 1987. "An approach in the life cycle costing of an integrated logistic support", *Microelectronics and Reliability*, Vol. 27, No. 1, pp. 25-27.

Ruff, D. N., and Paasch, R. K. 1993. "Consideration of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems", *Design Theory and Methodology*, ASME, New York, pp. 175-187.

Scarf, P.A. 1997. "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research,* Vol. 99, No. 3, pp. 493-506.

Smith, C. and Knezevic, J. 1996. "Achieving quality through supportability: part 1: concepts and principles", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 21-9.

Tejms, H.C. 1986. *Stochastic Modelling and Analysis*, Wiley and Sons, New York, NY.

Willians, D., Scott R. 2000. "Reliability and Life Cycle Costs", *RM-Reliability Group*, Technical Paper, Texas, TX, November.

Woodhouse, J. 1991. "Turning engineers into businessmen", *14th National Maintenance Conference*, London.

Woodhouse, J. 1993. *Managing Industrial Risk*, Chapman Hill Inc, London.

Woodward, D. G. 1997. "Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application", *International Journal of Project Management*, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344.

Yañez, M., Joglar, F., Mohammad, M. 2002. "Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 77, pp. 167-180.

APÉNDICE III

- Trabajo titulado: ***"Evaluación del impacto de la Fiabilidad en el Análisis de Coste del Ciclo de Vida (ACCV) de un activo Industrial"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Este trabajo se presento en los siguientes congresos:
  - VI Congreso Panamericano de Mantenimiento COPIMAN, 23 y 24 de Septiembre 2004, realizado Distrito Federal, México, organizado por UPADI (Unión Panamericana de Ingenieros), ***pp.276 – 285.***
  - V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CONIM 2005, 8 y 9 de Octubre 2005, realizado en Mérida, Venezuela, organizado por la facultad de Ingeniería Mecánica y el Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento de la Universidad de los Andes, ***pp.112 – 121.***

Congreso Panamericano de Mantenimiento,Organizado por Noria Corporación – Trujillo, Ricardo
© 2004 Mexicana Editorial, México, ISSM 1-123-35678, derechos reservados de publicación

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL ANÁLISIS DE COSTE DEL CICLO DE VIDA (ACCV) DE UN ACTIVO INDUSTRIAL

Carlos Parra**
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
**carparmar@us.es (autor principal)
Adolfo Crespo*
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
*adolfo.crespo@esi.us.es
Pablo Cortés*
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
*pca@esi.us.es
Simón Fygueroa*
Universidad de los Andes, Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento, Venezuela
*figueroa@ula.com

RESUMEN

El análisis de coste de ciclo de vida (ACCV) es una metodología desarrollada para evaluar como varían los costes de un activo a lo largo de su vida útil. En este trabajo se exploran los aspectos relacionados con el impacto de la fiabilidad en los costes totales de ciclo de vida y se propone un modelo que permita evaluar el impacto de los fallos (costes por fiabilidad), a partir de frecuencias de fallos constante estimadas según la distribución estadística: Exponencial, Weibull y Log Normal, que mejor se ajuste al resultado obtenido del test de Kolmogorov - Smirnov. El trabajo también incluye un caso de estudio, cuyos resultados permite analizar las ventajas y las limitaciones técnicas del modelo propuesto. Finalmente, el trabajo concluye mostrando los posibles caminos para investigaciones futuras en el área de evaluación de los costes por fiabilidad dentro del proceso de ACCV.

Palabras clave: Fiabilidad, Fallos, Costes de Ciclo de Vida, Mantenimiento, Kolmogorov - Smirnov

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de Análisis de Coste del Ciclo de Vida (ACCV) comenzó a aplicarse de manera estructurada a partir de la década del 70, específicamente en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, en el área de la aviación militar (Asiedu and Gu, 1998). Sin embargo la mayoría de las metodologías desarrolladas en esta etapa por el Departamento de Defensa, estaban orientadas hacia los procesos de procura y logística y no incluían la fase de diseño y producción. Una vez reconocida la necesidad de aplicar las metodologías de ACCV en los procesos de diseño, planificación y control de la producción, la *US National Science Foundation* patrocinó una conferencia en 1984, integrada por las principales academias y organizaciones industriales (Fleischer and Khoshnevis 1986 y Fabrycky, 1987), en esta conferencia se identificaron y priorizaron 34 áreas de investigación, recibiendo las calificaciones más altas de priorización las áreas de: evaluación económica en fase de diseño, análisis de ciclo de vida y diseño asistido por ordenador (CAD - CAE: *computer-aided estimating*).

En el intento para mejorar el diseño de los activos y reducir los cambios en el tiempo, la denominada ingeniería concurrente (ingeniería de ciclo de vida) ha emergido como una técnica efectiva dentro del proceso de optimización de los costes (Keys, 1990). La ingeniería de ciclo de vida considera que la fase inicial de desarrollo de un activo comienza con la identificación de la necesidad del mismo y posteriormente se generarán otras fases tales como diseño (conceptual, preliminar, detallado), producción (manufactura), utilización (operaciones, mantenimiento), soporte (logística) y desincorporación (sustitución).

Kirt and Dellisola (1996) define el ACCV como una técnica de cálculo económico que permite optimizar la toma de decisiones asociadas a los procesos de diseño, selección, desarrollo y sustitución de los activos que conforman un sistema de producción. La misma propone evaluar de forma cuantitativa todos los costes asociados al período económico de vida útil esperado, expresados en unidades monetarias equivalentes anualizadas (Dólares/año, Euros/año, Pesos/año). Alting (1993) distingue 6 fases en el ciclo de vida de un activo: reconocimiento de la necesidad, desarrollo del diseño, producción, distribución, utilización y desincorporación. El proceso de ciclo de vida comienza con la definición de las diferentes tareas de producción para el diseño preliminar (Kriwet *et al*. 1995). Luego se desarrollan actividades tales como: plan de producción, trazado de planta, selección de equipos, definición de procesos de manufactura y otras actividades similares. Posteriormente, se considera la logística previa a la fase de diseño. Esta fase envuelve el desarrollo del soporte necesario para el diseño y las diferentes etapas de producción, el soporte a los posibles usuarios, el plan de mantenimiento previsto para el uso del activo y el proceso de desincorporación del activo. Dentro de la técnica ingeniería de ciclo de vida, Alting (1993) sugiere que se evalúen los siguientes aspectos: procesos de manufactura ágil, protección ambiental, condiciones de trabajo, optimización de recursos humanos y económicos.

En los últimos años, especialistas en las áreas de Ingeniería de Valor , Diseño y Optimización de la Producción, han mejorado el proceso de cuantificación de los costes, incluyendo el uso de técnicas que cuantifican el factor Fiabilidad y el impacto de los eventos de fallos sobre los costes totales de un sistema de producción a lo largo de su Ciclo de Vida (Woodhouse, 1993). Estas mejoras han permitido disminuir la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones de áreas de vital importancia tales como: diseño, desarrollo, sustitución y adquisición de activos de producción. Es importante aclarar, que, en todo este proceso, existen muchas decisiones y acciones, tanto técnicas como no técnicas, que deben adoptarse a través de todo el período de uso de un activo industrial. Markeset and Kumar (2001), plantean que la mayoría de estas acciones, particularmente las que corresponden a la fase de diseño del sistema de producción, tienen un alto impacto en el Ciclo de Vida del activo e influyen en gran medida sobre los costes totales de producción. Son de interés particular, aquellas decisiones relacionadas con el proceso de mejoramiento del factor "Fiabilidad" (calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallos, costes de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad), ya que estos aspectos, tienen una gran influencia sobre el coste total del ciclo de vida del activo, e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los sistemas de producción a costes razonables (ver detalles en Blanchard, 2001; Blanchard and Fabrycky, 1998; Goffin, 2000; Markeset and Kumar, 2001; Smith and Knezevic, 1996 and Woodward, 1997).

2. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS COSTES

El total de costes de un activo desde su conceptualización hasta su retiro serán soportados por el usuario y tendrán un impacto directo sobre la comercialización del activo (Wilson, 1986). Como compradores, nosotros pagaremos por los recursos requeridos para diseñar y comercializar el activo y como usuarios del activo, nosotros pagaremos por los recursos requeridos para utilizar, operar y desincorporar el activo. El total de costes de ciclo de vida se puede descomponer en diferentes categorías como se muestra en la figura 1. Esta descomposición es conocida como: estructura desglosada de costes (CBS - *cost breakdown structure*). La CBS presentada en la figura 1, representa en términos generales los principales tipos de costes asociados al proceso de diseño, producción, comercialización, utilización y desincorporación de un activo específico, aunque hay que tener en cuenta, que el nivel de desglose y las diferentes categorías de los costes dependerán de distintos factores tales como: la naturaleza del activo a desarrollar, el tipo de información disponible, el proceso de diseño y manufactura, las variables económicas, el recurso humano, la tecnología existente, entre otros.

Otro aspecto de interés esta relacionada con la diferencia de importancia entre los distintos tipos de costes, por ejemplo, mientras la organización quiere conocer el total de los costes del activo a desarrollar, el diseñador solo esta interesado en los costes que el/ella pueden controlar. Algunos de los costes incurridos en la vida del activo son difíciles de visualizar en la fase de diseño, estos costes están relacionados con la forma de cómo la organización va a desarrollar el producto. De tal manera que la definición de los costes totales del ciclo de vida de un activo deben clasificarse en costes relacionados con el proceso global de desarrollo y en costes relacionados con el proceso de diseño del activo. Algunas de las categorías de costes en las cuales el diseñador no estaría interesado serían los costes de producción y construcción del activo. En la fase de diseño, estos costes, no son relevantes para el diseñador, lo cual no significa que la organización deba obviar este tipo de costes, ya que más adelante, estos costes deberán ser considerados por las personas encargadas de producir y manufacturar el activo (Fabrycky and Blanchard, 1991 y Ahmed, 1995).

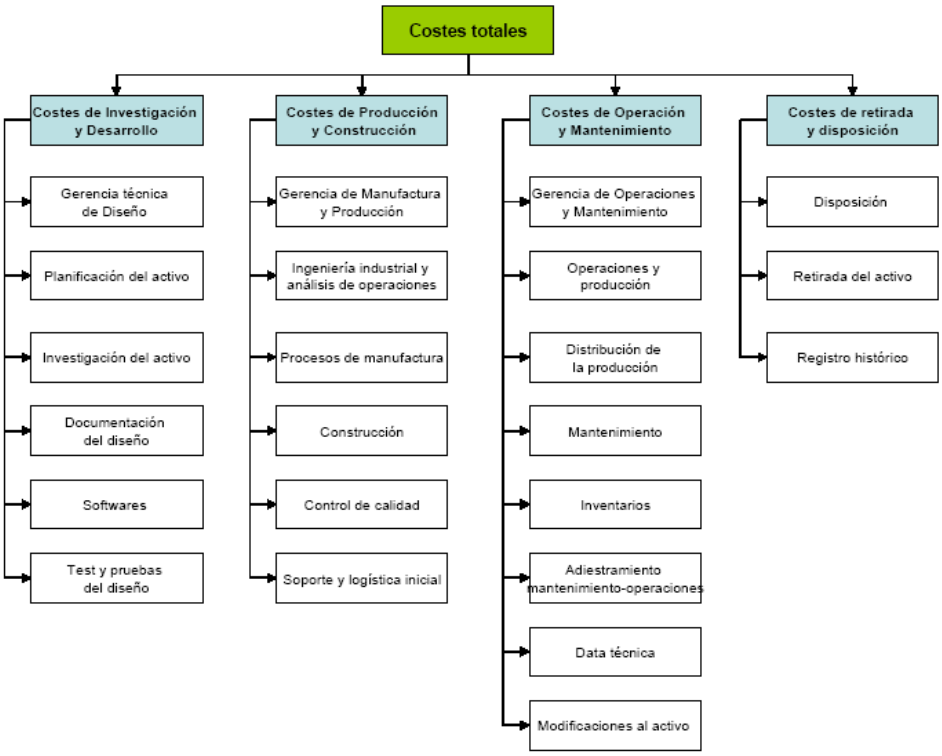


Figura 1: Estructura desglosada de costes (CBS - *cost breakdown structure*)
Fuente: (Fabrycky and Blanchard, 1991)

2.1. COSTES DE PRODUCCIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Los costes en esta fase están asociados con: actividades de manufactura (fabricación, ensamble y pruebas), facilidades de producción, operaciones de producción, control de calidad y costes iniciales de soporte y logística (repuestos para el proceso de manufactura, pruebas y equipos de soporte de producción) (Fabrycky and Blanchard, 1991).

El objetivo principal de esta fase, consiste en determinar las secuencias y los procesos más eficientes para poder desarrollar el activo diseñado. Dos de las más exitosas metodologías desarrolladas para optimizar esta fase son: el diseño del proceso de manufactura (*design for assembly* - DFA) desarrollado por Boothroyd and Dewhurst (Dewhurst and Boothroyd, 1984; Boothroyd, 1994) y el método de evaluación de manufactura (*assembly evaluation method* - AEM) desarrollado por Hitachi (Miyakawa and Ohashi, 1986). Estos métodos evalúan las diferentes opciones de diseño de manufactura y estiman de forma numérica el proceso de producción que genera los menores costes de ensamblaje.

2.2. COSTES DE OPERACIÓN Y SOPORTE

Los costes en esta etapa, afectan especialmente a los usuarios que utilizan el activo desarrollado y están asociados a costes de: operación, energía, insumos y materia prima, mantenimiento preventivo y correctivo, overhaul, diseño y

modificaciones de ingeniería, logística de repuestos, adiestramiento y cualquier otro coste que se genere a los largo de ciclo de vida del activo (Fabrycky and Blanchard, 1991).

Los costes de operación y soporte son los más significativos del ciclo de vida de un activo y adicionalmente, son los más difíciles de predecir. En algunos casos, estos costes podrían llegar a exceder hasta 10 veces más los costes iniciales de adquisición (Wilson, 1986). Un aspecto importante en esta etapa, esta relacionado con la disponibilidad que debe tener el activo para cumplir con las expectativas de producción del usuario. En relación a la disponibilidad, el activo deber diseñarse de tal forma que pueda ser mantenido en el menor tiempo y coste posible sin afectar de forma negativa las características de fiabilidad y seguridad del activo diseñado. En la mayoría de los procesos de producción cada minuto en que el activo este fuera de servicio, representa pérdidas financieras para el usuario. En este escenario el tiempo es "coste", de tal forma que las actividades de mantenimiento deben ejecutarse de forma rápida (tiempos de reparación cortos) y eficiente para poder cumplir con los niveles de disponibilidad requeridos por el usuario (Smith and Babb, 1973 y Ruff and Paasch, 1993).

2.3. COSTES DE DESINCORPORACIÓN Y RETIRADA

Los costes de esta etapa se relacionan específicamente con actividades de conversión de materiales y manejo de recursos energéticos, estas actividades generan desperdicios que son liberados al ambiente. El consumo de energía, la polución del aire y el manejo de los desperdicios en la actualidad son temas de interés mundial y son el centro de debates públicos, de tal forma que en el futuro, los sistemas de producción para poder ser competitivos deberán desarrollar procesos y tecnologías de manufactura que sean ambientalmente limpias (Weule, 1993).

En algunos países, el proceso de toma de conciencia ha comenzado ha surgir a partir de la creación y aplicación de las nuevas leyes medioambientales, un ejemplo de esta situación esta reflejado en la nueva legislación ambiental de los países de la comunidad Europea, la cual es un ejemplo a seguir y esta sustentada en el siguiente principio: quién ocasioné daños al ambiente tendrá que pagar por la limpieza de estos daños (Zussman *et al.* 1994).

Un análisis completo de los costes de ciclo de vida debe incluir todas las actividades que se van a desarrollar durante el proceso de retirada y desincorporación de los activos: disposición y limpieza de desperdicios, control de emisiones al ambiente, saneamiento ambiental de la zona de producción, manejo y almacenamiento de productos de desecho, etc., actividades que conceptualmente son muy buenas pero en la practica en la realidad son difíciles y engorrosas de ejecutar, ver (Navinchandra, 1991, Zust and Wagner, 1992, Benda *et al.* 1993, Tipnis, 1993, Zussman *et al.* 1994 y Sullivan and Young, 1995). Adicionalmente, procedimientos sobre las actividades de desincorporación de un activo y datos sobre el manejo de residuos ambientales son escasos, no son fáciles de conseguir y no hay un consenso sobre como medir el impacto de los costes en esta etapa del proceso de producción (Glantsching, 1994). En la actualidad, un estudio interesante relacionado con la etapa de desincorporación se puede ver en con detalles en (Zussman *et al.* 1994). Como resultado de esta investigación, se definen los siguientes procesos dentro de la etapa de retirada del activo - ver figura 2:

- Reciclaje: consiste en reutilizar a través procedimientos específicos, los desperdicios ó los derivados de la materia prima, dentro del propio proceso de manufactura o como productos que pueden ser utilizados en otros procesos de producción (Yan and Gu, 1995).
- Remanufactura: consiste en actividades de restauración y reconstrucción que permiten que activos que han perdido su función, puedan recuperar la misma y sean capaces de funcionar a niveles de eficiencia muy similares a los que tenían en su estado original (como nuevos) (Yan and Gu, 1995).
- Reutilización: consiste en reutilizar dentro del propio proceso de producción o en otro que lo requiera, los productos de desecho en su estado original (Yan and Gu, 1995).
- Disposición: consiste en la eliminación a través de procedimientos seguros, de los productos de desecho que no se pueden recuperar (Ishii *et al.* 1994).

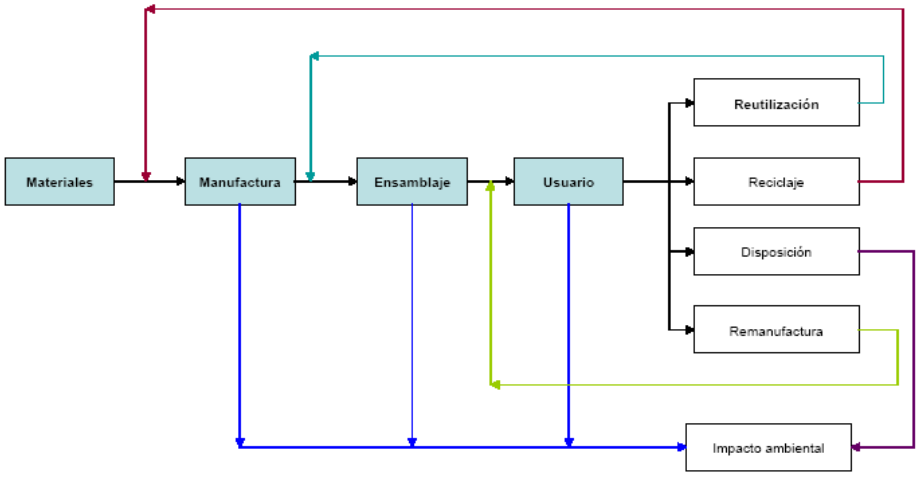


Figura 2: Ciclo de vida del activo y el proceso de retirada
Fuente: Adaptada por (Ishii *et al*. 1994)

Los costes para reciclar, reutilizar y desincorporar, son un factor de alto impacto dentro del análisis de los costes totales de ciclo de vida de un activo de producción, estos aspectos se discuten en detalle en: Jovane *et al*. (1993), Scheuring *et al*. (1994), Kriwet *et al*. (1995) y Zussman *et al*. (1994).

3. PROCESO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCV

Tradicionalmente, aspectos costes y de diseño han sido considerados y evaluados como dos procesos separados. En el caso del diseño, se considera como objetivo principal el diseñar el mejor activo posible y en el caso de los costes, se considera como objetivo principal el minimizar los costes de diseño y producción, aunque hay que tener en cuenta, que ambos procesos, tienen en realidad objetivos comunes, los cuales son: el desarrollar un activo que cumpla y satisfaga de forma eficiente la necesidad de los usuarios y que a su vez sea competitivo desde el punto de vista económico (Noble and Tanchoco, 1990).

Como se mencionó anteriormente, durante la fase de diseño se ven ya determinados entre el 65-85 % del total de los costes del ciclo de vida de un activo, según (Dowlatshahi, 1992). Las técnicas de ACCV proveen de una estructura metodológica que permite cuantificar los costes a lo largo del ciclo de vida de un activo: diseño, desarrollo, producción, operación, logística, retirada y desincorporación. A finales de los años 60, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos fue la primera organización en promover el uso de las técnicas de ACCV, con el fin de incrementar la efectividad del análisis de costes en sus procesos de procura y logística (Shields and Young, 1991). Algunos de los principales procedimientos de ACCV utilizados durante este tiempo por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos son discutidos en detalle en las siguientes referencias: Metzler (1974), Gansler (1974), Earles (1974), Dixon and Anderson (1976), Caver (1979) y Dighton (1980). Previo a la década del 70, el concepto de integración de los aspectos de diseño con los modelos económicos costes recibió muy poca atención. Pugh (1974), fue uno de los primeros en hacer mención de que era necesario proveer de información económica a los diseñadores. La importancia de los modelos de costes en la fase de diseño también ha sido reportada por varias autoridades en el área de costes tales como Boothroyd and Dewhurst (1983a), Ehrlenspiel (1987), Wierda (1988) y Alting (1993). A través de la temprana implementación de las técnicas de ACCV, no solo se puede influir sobre el diseño final sino que también se puede contribuir a la reducción de costes por la identificación previa (en fase de

diseño) de las diferentes categorías de costes y por la definición del impacto que podrían traer las modificaciones realizados sobre el diseño original.

Existen diferentes facetas dentro del diseño y desarrollo de un activo que pueden ser estudiadas mediante el uso de modelos de ACCV. Hay que tener mucho cuidado en el uso y en la aplicación de las técnicas de ACCV ya que su relativa fácil implementación podría orientar por caminos erróneos el proceso de toma de decisiones relacionados con los costes de un activo (Fabrycky and Blanchard, 1991). Un paso importante al inicio del proceso de implantación de un ACCV, consiste en definir de forma clara cual es el objetivo básico del proceso de evaluación de costes, según Blanchard (1979), las técnicas de ACCV se pueden utilizar en la evaluación de los siguientes procesos:

- Alternativas de sistemas de producción
- Alternativas de sistemas de mantenimiento, tipos de actividades de mantenimiento (preventivo vs. correctivo), mantenimiento por condición
- Alternativas de configuraciones de diseño: esquemas de operación, diagnóstico, niveles de fiabilidad y mantenibilidad, estandarización de repuestos, esquemas de monitorización
- Alternativas de sistemas de control y automatización
- Alternativas de procesos de producción: continua vs. discontinua
- Alternativas de sistemas de logística, procura y selección de diferentes suplidores
- Alternativas de canales de distribución, métodos de transporte y manejo de la producción, localización de almacenes
- Alternativas de manejo de residuos, desechos, reciclaje
- Alternativas de procesos de sustitución y reemplazo
- Alternativas de sistemas de protección y seguridad

Uno de los aspectos de mayor importancia para los diseñadores durante un ACCV es que ellos puedan identificar la relación que existe entre los posibles costes de producción y operación (ya desarrollado el activo) y las decisiones a tomar en la fase de diseño. De tal forma, resulta necesario el desarrollar herramientas que le permitan al diseñador de forma rápida y precisa realizar estimaciones económicas de sus decisiones durante la fase de diseño, ver información adicional en (Westney, 1983, Fleischer and Concebís, 1986, Ehrlenspiel, 1987 y Wierda, 1988).

3.1. ESTIMACIÓN DE COSTES

Dependiendo de la fase del análisis y del nivel de detalle esperado, un modelo ACCV podría se una simple sumatoria de costes relacionados o una cadena de complejos cálculos matemáticos de costes. La aplicación del ACCV durante la fase de diseño conceptual, normalmente requiere del uso de técnicas financieras básicas (Fabrycky and Blanchard, 1991). Por otro lado, el análisis de costes de ciclo de vida a ser desarrollado durante la fase de diseño detallado, requerirá de técnicas financieros de mayor complejidad. Justamente durante esta etapa es necesario descomponer los costes a niveles de detalle mínimo, con el fin de de conseguir soluciones de diseño que sean fáciles de implementar. Esta descomposición de costes es conocida como estructura desglosada de costes (CBS - *cost breakdown structure*) (French, 1990). Este proceso descompone el activo a desarrollar por funciones y cuantifica los costes totales sumando los costes individuales de cada una de las funciones estimadas. Un ejemplo de esto es mostrado en la figura 1, modelos de funciones de costes pueden ser asignados a distintas categorías que permitan al final estimar de forma fácil el coste total de ciclo de vida de un activo. En términos generales los procesos de estimación de costes pueden ser clasificados como: estimaciones paramétricas, estimaciones análogas y estimaciones detalladas (Asiedu and Gu, 1998).

3.1.1. ESTIMACIONES PARAMÉTRICAS

Las estimaciones de costes paramétricas se generan a partir de la aplicación de ecuaciones que permiten describir la relación entre los costes previstos de un sistema y los atributos medidos de un sistema que fue diseñado, operado y desincorporado (Dean, 1995). La estimación paramétrica esta basada en la predicción de la relación existente entre los costes de las diferentes actividades inherentes al desarrollo del activo, por ejemplo, actividades de coste de diseño y manufactura, se pueden predecir con el uso de técnicas de regresión lineal en función datos históricos de costes y la información técnica. El método de regresión lineal correlacionará los costes e información técnica con los

atributos técnicos designados estimando la relación existente entre los diferentes tipos de costes. Las estimaciones de costes paramétricas en algunos casos requieren grandes esfuerzos en el proceso de recolección de la información necesaria para poder estimar la relación entre los costes, pero una ves conseguida esta información, la estimación es normalmente rápida (Greves and Schreiber, 1993). Fad and Summers (1988) sugieren que los modelos paramétricos son técnicas que pueden ayudar mucho a estimar los costes en la fase de diseño. Además, existen una gran variedad de modelos paramétricos que han sido desarrollados y están disponibles de forma comercial. Uno de los modelos de mayor uso es el *Lockheed Martin PRICE sytem,* el cual ha sido utilizado por: *British Aerospace Corporation* (Daschbach and Apgar 1988), *European Space Agency* (Greves and Schreiber 1993) y NASA (Dean 1989).

3.1.2. ESTIMACIONES POR ANALOGÍA

Las estimaciones por analogía simplemente identifican los costes de un activo que haya sido desarrollado previamente y que sea similar al que se va a diseñar, y por comparación, considera estos costes de diseño y producción como los costes del futuro activo (Shields and Young, 1991). La efectividad de esta estimación depende en gran manera de la habilidad para identificar correctamente las posibles diferencias entre el proceso de desarrollo previo y el proceso de diseño futuro (Greves and Shreiber, 1993). La principal desventaja de este método es que el mismo esta sustentado en un proceso totalmente cualitativo y depende mucho de la habilidad del encargado de realizar la comparación. En este escenario, las personas que tienen el compromiso de comparar los procesos de diseño, deben tener muchos conocimientos relacionados con el activo a diseñar, esto con el fin de poder identificar las diferencias existentes entre los procesos de diseño y de esta manera, proponer los ajustes en la estimación de los costes.

3.1.3. ESTIMACIONES DETALLADAS

Las estimaciones detalladas de costes permiten que las organizaciones evalúen y clasifiquen sus costes por tipos específicos de actividades (Greves and Shreiber, 1993). En términos generales, estos modelos cuantifican las horas de labor, las cantidades específicas de recursos y materia prima y estiman los costes directos de desarrollo de un activo. Por otra parte, este tipo de estimaciones propone que una cantidad predeterminada sea asignada como costes indirectos. Para implantar un modelo de estimación detallada, primero se tiene que determinar el tiempo necesario para ejecutar cada actividad, luego se tiene que definir el coste por hora de los equipos utilizados y de la mano de obra y posteriormente se obtiene el coste total de la actividad a partir de la suma de los costes unitarios por hora multiplicado por el tiempo total necesario para la ejecución de la actividad (Shields and Young, 1991). Tiempos estandarizados de producción y operación por tipo de industria, se pueden conseguir en bases de datos locales, nacionales e internacionales, o a través de expertos. En el caso de un activo en el cual los procesos de producción sean sencillos y estables es decir que no existan grandes variaciones en el tiempo, esta metodología de costes es muy apropiada (Fabrycky and Blanchard, 1991). Las principales dificultades de este método se presentan a continuación (Weirda, 1988):

- Se necesita determinar o recopilar tiempos estándares de ejecución de actividades
- Los tiempos de ejecución de las actividades se mantienen constantes, lo cual en la realidad no siempre sucede así
- Se necesita manejar una gran cantidad de información para estimar los horas y los costes por actividad
- Se requiere de gran habilidad y experiencia para determinar las distintas actividades a ser evaluadas

3.2. PRECISIÓN EN EL PROCESO DE ESTIMACIÓN DE COSTES

Los costes estimados son el insumo necesario para tomar decisiones relacionadas con la forma de como se va a gastar el dinero en el futuro, lo cual implica, que estas decisiones de costes se realicen en escenarios de incertidumbre. La precisión de tales estimaciones es inversamente proporcional al tiempo que transcurre entre el momento de la estimación de costes y el momento en que los costes proyectados son ejecutados (Ostwald, 1974).

La falta de precisión dentro del proceso de estimación de costes, es un factor de alto impacto que puede llegar a generar consecuencias financieras desastrosas durante el desarrollo de un activo industrial. En términos generales, la falta de precisión en la estimación de los costes de desarrollo de un activo se puede presentar en dos escenarios, el

caso en el que se estimen costes por debajo de los costes reales, o el caso contrario, que es cuando los costes estimados sean superiores a los costes reales (Daschbach and Apgar, 1988).

Cuando los costes estimados están por debajo de los costes reales, los planes iniciales de contratación de mano de obra, la ejecución de ciertas actividades claves y la compra de ciertos materiales y equipos, resultan inalcanzables. Sin embargo, los planes de desarrollo previstos con anterioridad deberán continuar, en este escenario, se tendrá que recurrir a procesos de replanificación y reorganización que normalmente resultarán en un incremento de los costes que a su ves permitirán que se cumplan con las metas y objetivos de los proyectos asociados al desarrollo del activo (Daschbach and Apgar, 1988). En el otro escenario, cuando los costes estimados son superiores a los costes reales, se esperaría que se incrementen los beneficios del proyecto, lo cual normalmente no ocurre y lo que sucede con el dinero que queda disponible es que el mismo se gasta. Sólo en el caso de que la organización tenga un control estricto de los costes, este dinero sobrante no será gastado, lo cual en la práctica resulta muy poco probable (Daschbach and Apgar, 1988).

En el proceso de estimación de costes asociado a el desarrollo de un activo, existen una gran cantidad de requerimientos que van a variar de forma considerable dependiendo de la fase del programa de diseño y producción, de la complejidad de los procesos y de la profundidad de las técnicas de análisis (Fabrycky and Blanchard, 1991). Durante las fases iniciales de desarrollo y diseño conceptual, los datos disponibles son limitados y los análisis de costes dependen normalmente de modelos paramétricos, el nivel de precisión de los datos en esta etapa es entre el 20 y el 50% (Creese and Moore, 1990). En las fases intermedias de diseño, se tiene mayor información disponible y se pueden utilizar modelos análogos de costes que permitan comparar los costes de activos similares, el nivel de precisión de los datos en esta etapa es entre el 70 y el 85% (Creese and Moore, 1990). En la fase de diseño a nivel de detalle, se cuenta con toda la información del activo y se conocen las especificaciones de producción, los procesos de fabricación – manufactura y los requerimientos de soporte y logística, en esta fase es muy frecuente utilizar modelos detallados de estimación de costes, el nivel de precisión de los datos en esta etapa es entre el 85 y el 95% (Creese and Moore, 1990).

4. MODELOS DE ACCV

El uso de los técnicas de ACCV se ha incrementado de forma notable debido principalmente al desarrollo de un gran número de metodologías, las cuales proponen métodos para evaluar distintos diseños o vías alternativas de acción, con el objetivo de poder escoger la mejor forma de emplear los recursos humanos y económicos disponibles al momento de desarrollar un sistema de producción (Durairaj and Ong, 2002). Es importante mencionar que los resultados obtenidos de los Análisis de Costes de Ciclo de Vida, alcanzan su máxima efectividad durante el diseño conceptual y preliminar. Una vez que se ha completado el diseño, resulta difícil modificar sustancialmente los resultados económicos. Es más, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben plantearse específicamente durante la fase de diseño del activo, si es que se quiere explotar totalmente las posibilidades de una ingeniería económica efectiva. Hay que tener en cuenta que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un activo o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar (Dowlatshahi, 1992). El cálculo del coste del ciclo de vida se debe aplicar en todas las fases de diseño del sistema: diseño, desarrollo, producción, construcción, uso operativo y apoyo logístico. Al principio del ciclo de vida se debe poner énfasis en los aspectos de costes, al establecer ciertos factores cuantitativos de coste como requisitos propios del diseño. A medida que transcurre el ciclo de vida, el coste se emplea como un parámetro de importancia en la evaluación de configuraciones de diseño alternativos y en la selección de una solución de preferencia. Por tanto, los datos de costes se preparan basándose en las características establecidas del diseño y la producción, y se usan en el desarrollo de la estimación del coste del ciclo de vida. A su vez, estas estimaciones se comparan con los requisitos iniciales para determinar el grado de cumplimiento y la necesidad de una acción correctiva. En esencia, el coste del ciclo de vida evoluciona desde una serie de estimaciones cualitativas hasta una metodología relativamente refinada, empleándose como una herramienta de gestión orientada a la optimización del proceso de toma de decisiones (Durairaj and Ong, 2002).

La mayoría de los modelos de ACCV se han estructurado en tres líneas de desarrollo: conceptuales, analíticos y heurísticos de simulación avanzada (Kolarik, 1980 y Gupta, 1983). Los modelos conceptuales consisten en un conjunto de relaciones hipotéticas expresadas en una estructura de costes cualitativa. Estos son modelos muy flexibles y pueden ajustarse a rangos de costes muy amplios, su uso no requiere de información detallada de costes y generalmente su aplicación se limita a ACCV de nivel muy macro (Kolarik, 1980). Los modelos analíticos están basados en relaciones matemáticas estructuradas bajo ciertas premisas de diseño, que permiten estimar los costes característicos de un activo a ser desarrollado. Las suposiciones hechas para desarrollar estos modelos tienden a

restringir y limitar la capacidad de estimación de los costes, adicionalmente, estos son de gran aceptación y uso, debido a la gran cantidad de métodos analíticos diseñados a nivel comercial (Kolarik, 1980). Los modelos heurísticos de simulación avanzada utilizan métodos matemáticos avanzados y bien estructurados y su implantación se realiza a través de sistemas de computación que tienen una gran potencia de cálculo. Los modelos heurísticos no son tan comunes como los analíticos y normalmente se utilizan para casos muy específicos, en los cuales se requiere que la estimación de los costes tengan una gran exactitud y un bajo nivel de incertidumbre (Kolarik, 1980).

Según McNichols (1979), existen cuatro problemas básicos en el tratamiento de la incertidumbre que tienen que ser tratados con mucho cuidado por cualquier modelo de estimación de costes, estos problemas se mencionan a continuación: la caracterización de los costes individuales, la caracterización de las familias de costes, la caracterización de los grupos de familias de costes y el tratamiento de la dependencia entre las diferentes categorías de costes. McNichols (1979; 1983) y Tzemos and Dippold (1986) sugieren que la disminución de la incertidumbre en el proceso de estimación de costes, va a mejorar en la medida en que los métodos heurísticos de simulación avanzada se desarrollen y sean capaces de ajustarse a las necesidades y exigencias de las organizaciones modernas.

4. 1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN LOS MODELOS DE ACCV

Woodhouse (1991) plantea que para poder diseñar un sistema productivo eficiente y competitivo en el ámbito industrial moderno, es necesario evaluar y cuantificar de forma detallada los siguientes dos aspectos:

- Costes: aspecto que está relacionado con todos los costes asociados al Ciclo de Vida Total esperado del sistema de producción. Incluyendo: costes de diseño, producción, logística, desarrollo, construcción, operación, mantenimiento / preventivo-correctivo, desincorporación.
- Fiabilidad: factor que permite predecir la forma en que los procesos de producción pueden perder su continuidad operacional debido a eventos de fallos imprevistos y evaluar el impacto en los costes que ocasionan los fallos en la seguridad, el ambiente, las operaciones y la producción.

El aspecto clave del término Fiabilidad esta relacionado con la continuidad operacional. En otras palabras, podemos afirmar que un sistema de producción es "Fiable" cuando es capaz de cumplir su función de forma segura y eficiente a lo largo de su Ciclo de Vida. Ahora, cuando el proceso de producción comienza a estar afectado por una gran cantidad de eventos de fallos imprevistos – (baja Fiabilidad), este escenario provoca altos costes, asociados principalmente con la recuperación de la función (costes directos) e impacto en el proceso de producción (costes de penalización).

Los Costes totales por Fiabilidad (fallos imprevistos), se pueden caracterizar de la siguiente forma (Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ruff and Paasch, 1993 and Woodhouse, 1993):

- Costes por penalización:
  - *Downtime* (indisponibilidad de producción), pérdidas de oportunidad/producción diferida, pérdidas de producción, pérdidas operacionales, impacto en la calidad, impacto en seguridad y ambiente.
- Costes directos por mantenimiento correctivo:
  - Mano de obra: costes directos relacionados con la mano de obra (propia o contratada) en caso de una acción no planificada.ç
  - Materiales y repuestos: costes directos relacionados con los consumibles y los repuestos utilizados en caso de una acción no planificada.

El impacto en los costes que genera un activo de baja Fiabilidad está asociado directamente con el comportamiento de los siguientes dos índices:

El tiempo promedio entre fallos (MTBF):

$$MTBF = \frac{tiempos \cdot operacionales}{número \cdot de \cdot fallos} \quad (1)$$

- Sistemas con MTBF cortos, reflejan valores de Fiabilidad bajos y un alto número de fallos.

El tiempo promedio para reparar (MTTR):

$$MTTR = \frac{tiempos \cdot de \cdot reparación}{número \cdot de \cdot fallos} \quad (2)$$

- Sistemas con MTTR largos, reflejan valores de Mantenibilidad bajos (sistemas en los que se necesita gran cantidad de tiempo para poder recuperar su función).

Según Woodhouse (1991), el aumento de los costes es ocasionado en su gran mayoría, por la falta de previsión ante la aparición inesperada de eventos de fallos, escenario provocado básicamente por el desconocimiento y por la falta de análisis en la fase de diseño de los aspectos relacionados con la Fiabilidad. Esta situación trae como resultado un incremento en los costes de operación (costes que no fueron considerados en un principio) afectando de esta forma la rentabilidad del proceso de producción.

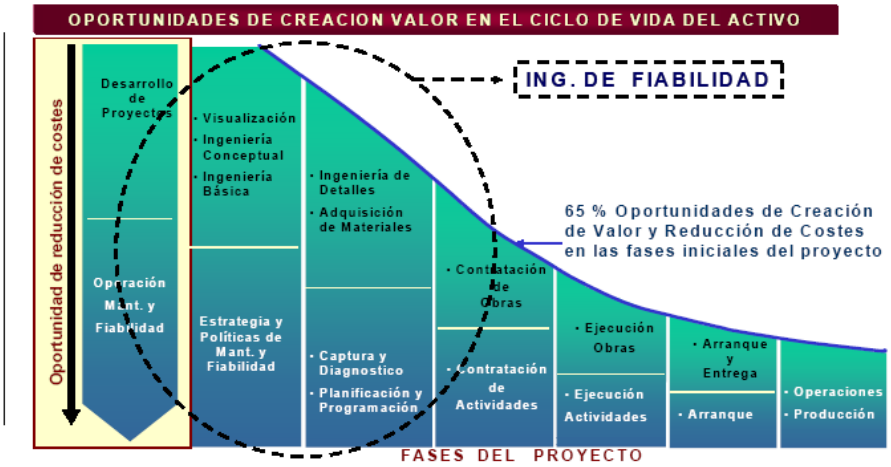


Figura 3: Oportunidades de reducción de Costes

Es importante mencionar que los resultados obtenidos de los Análisis de Coste de Ciclo de Vida, alcanzan su máxima efectividad durante las fases de: desarrollo inicial, visualización, ingeniería conceptual, básica y de detalles. Como se presenta en la figura 3, una vez que se ha completado el diseño, resulta difícil modificar sustancialmente los resultados económicos. Es más, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben plantearse específicamente durante las fases citadas anteriormente, si es que se quiere explotar totalmente las posibilidades de una ingeniería económica efectiva. Hay que tener en cuenta que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un activo o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar (65-85 % de oportunidades de creación de valor y reducción de costes), según (Dowlatshahi, 1992).

5. MODELO PROPUESTO DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD BASADO EN TASA DE FALLOS CONSTANTE ESTIMADA A PARTIR DE DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS (EXPONENCIAL, WEIBULL Y LOG NORMAL) SELECCIONADAS CON EL TEST DE KOLMOGOROV - SMIRNOV

El test de Kolmogorov - Smirnov es una de las diversas pruebas de mayor uso en el campo estadístico, la misma permite verificar si una distribución se ajusta o no adecuadamente al comportamiento real de un conjunto de datos (Kececioglu, 1991). Una vez que se ha validado el ajuste de la distribución seleccionada con el comportamiento real de los datos, entonces se podrá tomar con seguridad la hipótesis de que los datos recopilados se pueden representar a través del modelo matemático respectivo a la distribución evaluada. El test calcula la distancia máxima entre la frecuencia acumulada de los tiempos observados y la frecuencia teórica acumulada provista por el modelo seleccionado. Si la distancia entre estas frecuencias acumuladas es igual o mayor, se puede concluir que el modelo seleccionado no provee un buen ajuste para los datos evaluados, ver detalles del test en (Kececioglu, 1991).

En términos generales, la estructura básica del Modelo de Tasa de Fallos Constante estimada a partir de distribuciones estadísticas seleccionadas con el test de Kolmogorov - Smirnov propone el siguiente esquema para calcular el impacto de los costes de los fallos en el ACCV, ver detalles en (Fabrycky and Blanchard, 1991):

1. Establecer las condiciones operacionales del sistema. Describir los modos de operación del sistema (carga completa, media carga, sin carga) y las capacidades de producción a satisfacer.

2. Establecer los factores de utilización. Estos factores deben indicar el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación.

3. Identificar las distintas opciones a ser evaluadas. Seleccionar las alternativas existentes que pueden cubrir con las necesidades de producción exigidas.

4. Identificar para cada alternativa todas las categorías de costes básicos: inversión inicial, desarrollo, adquisición, mantenimiento planificado, reposición.

5. Determinar para cada alternativa los costes por fiabilidad. Identificar los principales tipos de fallos y la frecuencia de ocurrencia por año - la cual será un valor constante a lo largo del ciclo de vida del activo (este aspecto se detalla más adelante).

6. Determinar los costes críticos. Identificar las categorías de costes de mayor impacto, y analizar los factores que propician los altos costes (proponer estrategias de control).

7. Calcular todos los costes en valor presente (P) para cada alternativa. Definir el factor de descuento y el período de vida útil esperado y estimar los costes totales en valor presente por cada alternativa evaluada.

8. Seleccionar la alternativa ganadora. Comparar los costes totales de las alternativas evaluadas y seleccionar la opción que menor coste genere para el período de vida útil esperado.

Los diferentes costes que se generan a lo largo del ciclo de vida de un activo industrial, son calculados a partir de la siguiente expresión (Blanchard and Fabrycky, 1998):

$$(P)CTCV = \sum_{T=1}^{T} CI + CO + CMP + TCPf + CMM \qquad (3)$$

Dónde:
(P) = Valor presente
$CTCV$ = Costes totales del ciclo de vida en valor presente (P), para una tasa de descuento (i) y un período de vida útil esperado (T).
CI = Coste inicial de adquisición e instalación, normalmente dado en valor Presente.
CO = Costes operacionales, normalmente dado como valor Anualizado**.
CMP = Costes de Mantenimiento Preventivo, normalmente dado como valor Anualizado**.
TCP_f = Costes Totales por fiabilidad (costes por fallos), normalmente dado como valor Anualizado. En este caso se asume tasa de fallos constante, por lo cual el impacto en costes es igual en todos los años **.
CMM = Costes de Mantenimiento Mayor - Especiales, normalmente dado como valor Futuro**.
** Todas las categorías de costes se convertirán a valor presente (P) a una tasa de descuento (i) y un período de vida útil esperado (T).

En relación a la cuantificación de los costes totales por Fiabilidad TCP_f, el Modelo propuesto de Tasa de Distribución de Fallos Constante seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov propone utilizar evaluar los datos de tiempos entre fallos y tiempos fuera de servicio en las distribuciones estadísticas más utilizadas en fiabilidad y mantenibilidad (Exponencial, Weibull y Log normal) (Kenecevic, 1993), y en función de la distribución que mejor se ajuste al test de Kolmogorov - Smirnov, se estimará: la frecuencia de fallos, los tiempos fuera de servicio y los costes por fiabilidad. A continuación se detallan los pasos a seguir para estimar los costes por fallos según este modelo de Tasa de Fallos Constante:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos. Así para un equipo determinado habrá f = 1…….F tipos de fallos.

2. Aplicar el test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se explican de forma detallada cada uno de los pasos del test (Kececioglu, 1991):

   2.1. Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. Esta información será recopilada por el diseñador a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia de personal de mantenimiento y operaciones.

   2.2. Calcular el número total de tiempos operativos y tiempos fuera de servicio registrados - N.

   2.3. Ordenar los t_{f_i} y los t_{fs_i} en forma creciente y asignarle a cada uno de ellos una posición (i) en orden creciente desde 1 hasta N.

   2.4. Calcular la probabilidad de fallo observada $Q_{o(i)}$. Cada valor asignado a la posición (i) se divide entre N y se obtiene la probabilidad de fallo observada para cada (i).

$$Q_{o(i)} = \frac{(i)}{N} \tag{4}$$

   2.5. Calcular para cada t_{f_i} la probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ y para cada t_{fs_i} la probabilidad de recuperación de la función $F(t_{fs_i})$, correspondiente a la distribución estadística evaluada. Las expresiones de cálculo de probabilidad de fallo y probabilidad de recuperación de las distribuciones más comunes, se presentan en la Tabla 1.

   2.6. Calcular para cada t_{f_i} y para cada t_{fs_i} la diferencia en valor absoluto entre la probabilidad de fallo observada y la probabilidad de fallo acumulada, esta diferencia se denota como $D(tf_i), D(tfs_i)$:

$$D(tf_i) = \left| Q_{o(i)} - F(tf_i) \right| \tag{5}$$

$$D(tfs_i) = \left| Q_{o(i)} - F(tfs_i) \right| \tag{6}$$

   2.7. Identificar las diferencias absolutas $D(tf_i), D(tfs_i)$ de mayor valor. Este valores se denominarán: $\boldsymbol{Dmáx}_{(tf_i)}$ y $\boldsymbol{Dmáx}_{(tfs_i)}$

Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ **Probabilidad de recuperación** $F(tfs_i)$	**Parámetros****
Distribución Exponencial: $F(tf_i)=1-e^{-\lambda(tf_i)}$ $F(tfs_i)=1-e^{-\lambda(tfs_i)}$	$\lambda(tf_i,tfs_i)=\frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} t(f_i,fs_i)}{N}}$, tasa de fallos y tasa de reparación
Distribución Weibull: $F(tf_i)=1-e^{\left(-\frac{tf_i}{\alpha}\right)^{\beta}}$ $F(tfs_i)=1-e^{\left(-\frac{tfs_i}{\alpha}\right)^{\beta}}$	α = vida característica β = parámetro de forma Los parámetros α y β, se fijan a partir de las siguientes expresiones, recopiladas por Navas (1997): $\alpha=\exp\left(\frac{\frac{N}{\sum_{i=1}^{N} A_i}-\left(\sum_{i=1}^{N} A_i\times Ln\left(t_{(fi,\,fsi)}\right)\right)}{\left(\sum_{i=1}^{N} A_{fi}-Ln\left(t_{(fi,\,fsi)}\right)\right)-\left(\sum_{i=1}^{N} A_{fi}\times Ln\left(t_{(fi,\,fsi)}\right)\right)}\right)$ $\beta=\frac{\sum_{i=1}^{N} A_i}{\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{Ln\left(t_{(fi,\,fsi)}\right)}\left(1-Ln(\alpha)\right)}$ Dónde: $A_i=\frac{Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-\frac{i}{N+1}}\right)\right)}{Ln\left(t_{(fi,\,fsi)}\right)}$
Distribución Log Normal: $F(tf_i)=\frac{1}{\sigma t_{(fs_i,f_i)}\sqrt{2\pi}}At(f_i,fs_i)$ Dónde: $At(f_i,fs_i)=\int_0^{\infty}\frac{1}{t(f_i,fs_i)}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t(f_i,fs_i))-\mu t(f_i,fs_i)}{\sigma t(fi,fs_i)}\right)^2}dt(f_i,fs_i)$	$\mu t(f_i,fs_i)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln(t(f_i,fs_i))$, media logarítmica $\sigma t(f_i,fs_i)=\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(t(f_i,fs_i))-\mu t(f_i,fs_i)^2\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 1: Expresiones más comunes de probabilidad de fallo acumulado $F(tf_i)$ **y probabilidad de recuperación** $F(tfs_i)$

** La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 1, puede encontrarse fácilmente en la literatura de fiabilidad/mantenibilidad, ver (Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

2.8. Buscar los valores críticos $Dcr_{(tf_i)}$ y $Dcr_{(tfz_i)}$ de Kolmogorov - Smirnov, para el nivel de significancia requerido. Este valor se obtiene de la tabla de Kolmogorov - Smirnov con el valor de N y el nivel de significancia previamente asignado, ver valores críticos ***Dcr*** en la tabla 2:

N	Nivel de Significancia				
	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.575	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.424	0.510	0.454	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.557
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.405
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.293	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
> 35	1.07 / (N) ^1/2	1,14 / (N) ^1/2	1.22 / (N) ^1/2	1.36 / (N) ^1/2	1.63 / (N) ^1/2

Tabla 2: Valores críticos *Dcr* de Kolmogorov - Smirnov (Kececioglu, 1991)

2.9. Realizar la prueba de hipótesis, comparando los valores críticos: $Dcr_{(tf_i)}$ y $Dcr_{(tfz_i)}$ con los valores máximos obtenidos: $Dmáx_{(tf_i)}$ y $Dmáx_{(tfz_i)}$, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Si el ***Dmáx*** es menor que ***Dcr***, la distribución seleccionada es aceptada y representa el comportamiento estadístico de la data evaluada para el nivel de significancia seleccionado.
- Si el ***Dmáx*** es igual o mayor que ***Dcr***, la distribución seleccionada "no" es aceptada y no representa el comportamiento estadístico de la data evaluada para el nivel de significancia seleccionado.

2.10. Seleccionar para cada variable tf_i y tfz_i, la distribución cuyo valor máximo ***Dmáx*** haya sido el menor obtenido de cada una de las distribuciones evaluadas y que a su ves este valor también sea menor al valor crítico ***Dcr*** obtenido de la tabla de Kolmogorov - Smirnov para el valor de significancia respectivo.

3. Calcular los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes directos Cdi (mano de obra (Cmo), materiales (Cmt), repuestos (Crp)) y los costes de penalización Cpe (impacto operacional por fallos (Cio)). Los costes por fallos se estiman a partir de la siguiente expresión:

$$C_f = Cdi + Cpe \tag{7}$$

Dónde:

$$Cdi = \frac{Cmo + Cmt + Crp}{fallo} = \frac{\$}{fallo} \tag{8}$$

$$Cpe = MTTR\left(\frac{horas}{fallo}\right) \times Cio\left(\frac{\$}{hora}\right) = \frac{\$}{fallo} \tag{9}$$

Para el cálculo de los costes de penalización es necesario estimar el tiempo promedio de reparación (*MTTR*) correspondiente a la distribución seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov. Este proceso se realiza a partir de los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. A continuación se presentan las expresiones de cálculo de los tiempos promedios de reparación de las distribuciones más comunes:

Distribuciones	**Tiempos promedios de reparación *MTTR***	**Parámetros ****
Exponencial	$MTTR = \frac{1}{\lambda}$	$\lambda(tfs_i) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} tfs_i}{N}}$, tasa de reparación
Weibull	$MTTR = \alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	α = vida característica, ver tabla 1 β = parámetro de forma, ver tabla 1 Γ = función Gamma
Log normal	$MTTR = e^{\left(\mu_{tfs_i} + \frac{\sigma_{tfs_i}^2}{2}\right)}$	$\mu(tfs_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln(tfs_i)$, media logarítmica $\sigma(tfs_i) = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(tfs_i) - \mu(tfs_i)^2\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 3: Expresiones más comunes de tiempos promedios de reparación - *MTTR*

** La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 3, se puede encontrar en la literatura de mantenibilidad, ver (Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

4. Determinar la frecuencia de fallos esperados δ_f a partir del tiempo promedio entre fallos *(MTBF)* correspondiente a la distribución seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov. Este proceso se realiza a partir de los tiempos entre fallos t_{f_i} registrados por tipo de fallo. La frecuencia de fallos se estima a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \tag{10}$$

A continuación se presentan las expresiones de cálculo de los tiempos promedios entre fallos de las distribuciones más comunes:

Distribuciones	Tiempos promedios entre fallos *MTBF*	Parámetros **
Exponencial	$MTBF=\frac{1}{\lambda}$	$\lambda(tf_i)=\frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N} tf_i}{N}}$, tasa de fallos
Weibull	$MTBF=\alpha\times\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	α = vida característica, ver tabla 1 β = parámetro de forma, ver tabla 1 Γ = función Gamma
Log normal	$MTBF=e^{\left(\mu_{tf_i}+\frac{\sigma_{tf_i}^2}{2}\right)}$	$\mu(tf_i)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln(tf_i)$, media logarítmica $\sigma(tf_i)=\sqrt{\left(\left(\frac{1}{N}\right)\left(\sum_{i=N}^{N}\left(\ln(tf_i)-\mu(tf_i)^2\right)\right)\right)}$, desviación estándar logarítmica

Tabla 4: Expresiones más comunes de tiempos medios entre fallos - *MTBF*

** La estimación de los parámetros de las distribuciones presentados en la tabla 4, se puede encontrar en la literatura de fiabilidad, ver (Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

5. Calcular los costes totales por Fiabilidad por año TCP_f, generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la siguiente expresión:

$$TCP_f=\sum_{f}^{F}\delta_f\times C_f=\frac{\$}{año} \tag{11}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante los años de vida útil esperada.

6. Calcular los costes totales en valor presente $(P)TCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f, se estima la cantidad de dinero en el presente (hoy) que necesita comenzar a ahorrar, para poder pagar dicha anualidad durante los próximos años de vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión a utilizar para estimar los $(P)TCP_f$ en valor presente se muestra a continuación:

$$(P)TCPf=TCPf\times\frac{(1+i)^T-1}{i\times(1+i)^T} \tag{12}$$

El valor presente $(P)TCP_f$, representa la cantidad de dinero - hoy, que se necesita para poder cubrir con los gastos anuales esperados por los fallos durante (T) años. Posteriormente, a los costes calculados por fiabilidad, se le adicionan el resto de los costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.), se calcula el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados y se compara el resultado obtenido con los costes totales de las otras opciones evaluadas.

5.1. CASO DE ESTUDIO

A continuación se van a seguir los pasos descritos en sección anterior:

1. Definir los tipos de fallos.
   Dónde $f = 1 \ldots F$ para $F = 1$ tipo de fallo.
2. Aplicar el test de Kolmogorov - Smirnov.

2.1. Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i}. A continuación se presenta la información recopilada de los historiales de fallos de un compresor de Gas de la compañía Petróleos de Venezuela. En la tabla 5 se presentan los tiempos entre fallos esperados (tiempos operativos) t_{f_i} en meses y los tiempos fuera de servicio t_{fs_i} en horas, asociados a 24 eventos ocurridos durante los 10 años de vida útil.

t_{f_i}	5	7	3	7	2	4	3	5	8	9	2	4	6	3	4	2	4	3	8	9	4	4	7	4
t_{fs_i}	24	36	26	34	34	25	12	15	15	16	23	25	26	36	36	28	21	25	35	18	16	25	25	25

Tabla 5: Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas)

2.2. Calcular el número total de tiempos operativos y tiempos fuera de servicio registrados, N = 24 eventos.

2.3. Ordenar los t_{f_i} y los t_{fs_i} en forma creciente y asignarle a cada uno de ellos una posición (i) en orden creciente desde 1 hasta 24.

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
t_{fs_i}	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36

Tabla 6: Tiempos entre fallos (meses) y tiempos fuera de servicio (horas) -ordenados de forma creciente

2.4. Calcular la probabilidad de fallo observada $Qo(i)$. Cada valor asignado a la posición (i) se divide entre 24 y se obtiene la probabilidad de fallo observada para cada (i).

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Qo(i) = \frac{(i)}{N}$	0,04166	0,08333	0,125	0,16666	0,20833	0,25	0,29166	0,33333	0,375	0,41666	0,45833	0,5
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$Qo(i) = \frac{(i)}{N}$	0,54166	0,58333	0,625	0,66666	0,70833	0,75	0,79166	0,83333	0,875	0,91666	0,95833	1

Tabla 7: Probabilidad de fallo observada $Qo(i)$

2.5. Calcular para cada t_{f_i} la probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ y para cada t_{fs_i} la probabilidad de recuperación de la función $F(t_{fs_i})$, correspondiente a la distribución estadística evaluada. Las estimaciones de probabilidades de fallo y probabilidades de recuperación se realizarán para las distribuciones: Exponencial, Weibull y Log normal. Los resultados presentados en las siguientes tablas se calcularon con la herramienta de denominada ICDM 2002, ver (López, 2002, Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

t_{f_i}	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(t_{f_i})$	0,3366	0,3366	0,3366	0,4595	0,4595	0,4595	0,4595	0,5597	0,5597	0,5597	0,5597	0,5597
t_{f_i}	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(t_{f_i})$	0,5597	0,5597	0,6414	0,6414	0,7079	0,7620	0,7620	0,7620	0,8062	0,8062	0,8421	0,8421

Tabla 8: Probabilidad de fallo acumulada $F(t_{f_i})$ **- Distribución Exponencial**

tf_i	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(tf_i)$	0,0790	0,0790	0,0790	0,2042	0,2042	0,2042	0,2042	0,3755	0,3755	0,3755	0,3755	0,3755
tf_i	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(tf_i)$	0,3755	0,3755	0,5619	0,5619	0,7289	0,8539	0,8539	0,8539	0,9322	0,9322	0,9732	0,9732

Tabla 9: Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ - Distribución Weibull

tf_i	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
$F(tf_i)$	0,0457	0,0457	0,0457	0,2058	0,2058	0,2058	0,2058	0,4185	0,4185	0,4185	0,4185	0,4185
tf_i	4	4	5	5	6	7	7	7	8	8	9	9
$F(tf_i)$	0,4185	0,4185	0,6069	0,6069	0,7458	0,8391	0,8391	0,8391	0,8991	0,8991	0,9367	0,9367

Tabla 10: Probabilidad de fallo acumulada $F(tf_i)$ - Distribución Log normal

tfs_i	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(tfs_i)$	0,3807	0,4506	0,4506	0,4721	0,4721	0,5126	0,5676	0,6008	0,6164	0,6315	0,6315	0,6315
tfs_i	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(tfs_i)$	0,6315	0,6315	0,6315	0,6459	0,6459	0,6731	0,7427	0,7427	0,7528	0,7625	0,7625	0,7625

Tabla 11: Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Exponencial

tfs_i	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(tfs_i)$	0,0518	0,1093	0,1093	0,1349	0,1349	0,1962	0,3116	0,4009	0,4480	0,4958	0,4958	0,4958
tfs_i	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(tfs_i)$	0,4958	0,4958	0,4958	0,5439	0,5439	0,6379	0,8642	0,8642	0,8901	0,9124	0,9124	0,9124

Tabla 12: Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Weibull

tfs_i	12	15	15	16	16	18	21	23	24	25	25	25
$F(tfs_i)$	0,014	0,068	0,125	0,1001	0,1001	0,1823	0,3385	0,4492	0,5030	0,5546	0,5546	0,5546
tfs_i	25	25	25	26	26	28	34	34	35	36	36	36
$F(tfs_i)$	0,5546	0,5546	0,5546	0,6033	0,6033	0,6905	0,8674	0,8674	0,8862	0,9025	0,9025	0,9025

Tabla 13: Probabilidad de recuperación $F(tfs_i)$ - Distribución Log normal

2.6. Calcular para cada tf_i y para cada tfs_i la diferencia en valor absoluto entre la probabilidad de fallo observada y la probabilidad de fallo acumulada, esta diferencia se denota como $D(tf_i), D(tfs_i)$. Aplicar las expresiones 5 y 6.

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,29494	0,25327	0,2116	0,29284	0,25117	0,2095	0,16784	0,22637	0,1847	0,14304	0,10137	0,0597
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,01804	0,02363	0,0164	0,02526	0,00043	0,012	0,02966	0,07133	0,0688	0,11046	0,11623	0,1579

Tabla 14: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Exponencial

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,03734	0,00433	0,046	0,03754	0,00413	0,0458	0,08746	0,04217	0,0005	0,04116	0,08283	0,1245
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,16616	0,20783	0,0631	0,10476	0,02057	0,1039	0,06224	0,02057	0,0572	0,01554	0,01487	0,0268

Tabla 15: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Weibull

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tf_i)$	0,00404	0,03763	0,0793	0,03914	0,00253	0,0442	0,08586	0,08517	0,0435	0,00184	0,03983	0,0815
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tf_i)$	0,12316	0,16483	0,0181	0,05976	0,03747	0,0891	0,04744	0,00577	0,0241	0,01756	0,02163	0,0633

Tabla 16: Diferencia absoluta de probabilidades de fallo $D(tf_i)$ - Distribución Log normal

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfz_i)$	0,33904	0,36727	0,3256	0,30544	0,26377	0,2626	0,27594	0,26747	0,2414	0,21484	0,17317	0,1315
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfz_i)$	0,08984	0,04817	0,0065	0,02076	0,06243	0,0769	0,04896	0,09063	0,1222	0,15416	0,19583	0,2375

Tabla 17: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfz_i)$ - Distribución Exponencial

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfz_i)$	0,01014	0,02597	0,0157	0,03176	0,07343	0,0538	0,01994	0,06757	0,073	0,07914	0,03747	0,0042
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfz_i)$	0,04586	0,08753	0,1292	0,12276	0,16443	0,1121	0,07254	0,03087	0,0151	0,00426	0,04593	0,0876

Tabla 18: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfz_i)$ - Distribución Weibull

(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D(tfz_i)$	0,02766	0,01533	0	0,06656	0,10823	0,0677	0,04684	0,11587	0,128	0,13794	0,09627	0,0546
(i)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$D(tfz_i)$	0,01294	0,02873	0,0704	0,06336	0,10503	0,0595	0,07574	0,03407	0,0112	0,01416	0,05583	0,0975

Tabla 19: Diferencia absoluta de probabilidades de recuperación $D(tfz_i)$ - Distribución Log normal

2.7. Identificar las diferencias absolutas $D(tf_i), D(tfz_i)$ de mayor valor ($\boldsymbol{Dmáx}_{(tf_i)}$ y $\boldsymbol{Dmáx}_{(tfz_i)}$). A continuación se presentan los ***Dmáx*** obtenidos de cada una de las distribuciones evaluadas.

	Exponencial	Weibull	Log normal
$\boldsymbol{Dmáx}_{(tf_i)}$	0,29494	0,20783	0,16483
$\boldsymbol{Dmáx}_{(tfz_i)}$	0,36727	0,16443	0,13794

Tabla 20: Diferencias absolutas máximas de probabilidades de fallo $\boldsymbol{Dmáx}_{(tf_i)}$ y probabilidades de recuperación $\boldsymbol{Dmáx}_{(tfz_i)}$

2.8. Buscar los valores críticos $\boldsymbol{Dcr}_{(tf_i)}$ y $\boldsymbol{Dcr}_{(tfz_i)}$ de Kolmogorov - Smirnov (tabla 2), para el nivel de significancia de 0,05 y N = 24.

$\boldsymbol{Dcr}_{(tf_i)}$, $\boldsymbol{Dcr}_{(tfz_i)}$ = 0,26931

2.9. Realizar la prueba de hipótesis, comparando los valores críticos: $\boldsymbol{Dcr}_{(tf_i)}$ y $\boldsymbol{Dcr}_{(tfz_i)}$ con los valores máximos obtenidos: $\boldsymbol{Dmáx}_{(tf_i)}$ y $\boldsymbol{Dmáx}_{(tfz_i)}$, según los criterios explicados en la sección anterior.

	Exponencial	Weibull	Log normal
Dmáx (tf_i) ***y Dcr*** (tf_i)	0,29494 > 0,26931 Hipótesis rechazada	0,20783<0,26931 Hipótesis aceptada	0,16483<0,26931 Hipótesis aceptada
Dmáx (tfs_i) ***y Dcr*** (tfs_i)	0,36727 > 0,26931 Hipótesis rechazada	0,16443<0,26931 Hipótesis aceptada	0,13794<0,26931 Hipótesis aceptada

Tabla 21: Prueba de hipótesis - nivel de significancia de 0,05

2.10. Seleccionar para cada variable: tf_i y tfs_i la distribución cuyo valor máximo ***Dmáx*** haya sido el menor obtenido de cada una de las distribuciones evaluadas.

	Distribución seleccionada
Dmáx (tf_i) **de menor valor**	**Log normal (0,16483)**
Dmáx (tfs_i) **de menor valor**	**Log normal (0,13794)**

Tabla 22: Distribución seleccionada

3. Calcular los costes por fallos C_f ($/fallo). Estos costes incluyen: costes directos Cdi (mano de obra (Cmo), materiales (Cmt), repuestos (Crp)) y los costes de penalización Cpe (impacto operacional por fallos (Cio)). Los costes por fallos se estiman con las expresiones 7, 8 y 9.

$$Cmo = 500\frac{\$}{fallo},\ Cmt = 700\frac{\$}{fallo},\ Cro = 800\frac{\$}{fallo}$$

$$Cdi = 2000\frac{\$}{fallo}$$

Para el cálculo de los costes de penalización es necesario estimar el tiempo promedio de reparación (*MTTR*) correspondiente a la distribución Log normal seleccionada a partir del test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se presenta la expresión para calcular el (*MTTR)* con la distribución Log normal:

$$MTTR = e^{\left(\mu_{tfs_i} + \frac{\sigma fs_i^2}{2}\right)}$$

Los parámetros μ_{tfs_i} (media logarítmica) y σfs_i (desviación estándar logarítmica) se estiman a partir de los tiempos fuera de servicio tfs_i (tabla 5), este calculo se realizó con la herramienta ICDM 2002, ver (López, 2002, Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

$$\mu_{tfs_i} = 3{,}175621$$

$$\sigma fs_i = 0{,}314718$$

$$MTTR = 25{,}16\frac{horas}{fallo}$$

$$Cio = 100\frac{\$}{hora}$$

$$Cpe = 25{,}16\frac{horas}{fallo} \times 100\frac{\$}{hora} = 2516\frac{\$}{fallo}$$

$$C_f = 4516\frac{\$}{fallo}$$

4. Determinar la frecuencia de fallos esperados δ_f a partir del tiempo promedio entre fallos *(MTBF)* correspondiente a la distribución Log normal seleccionada a partir del test de Kolmogorov - Smirnov. A continuación se presenta la expresión para calcular el *(MTBF)* con la distribución Log normal:

$$MTBF = e^{\left(\mu_{tf_i} + \frac{\sigma_{f_i}^2}{2}\right)}$$

Los parámetros μ_{tf_i} (media logarítmica) y σ_{f_i} (desviación estándar logarítmica) se estiman a partir de los tiempos entre fallos t_{f_i} (tabla 5), este cálculo se realizó con la herramienta ICDM 2002, ver (López, 2002, Navas, 1997, Knezevic, 1993 y Ebeling, 1997).

$\mu_{tf_i} = 1{,}482485$

$\sigma_{f_i} = 0{,}467647072$

$MTBF = 4{,}91 \frac{meses}{fallo}$

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} = 0{,}20366 \frac{fallos}{mes} = 2{,}44399 \frac{fallos}{año}$$

5. Calcular los costes totales por Fiabilidad por año TCP_f, generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, con la expresión 11:

$$TCP_f = 6149{,}07 \frac{\$}{año}$$

El coste total anual equivalente obtenido, representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de fiabilidad ocasionados por fallos, durante cada año de vida útil esperada.

6. Calcular los costes totales en valor presente $(P)TCP_f$. Dado un valor anualizado TCP_f, usar la expresión 12, para un período T= 10 años y una tasa de descuento i= 10%.

$(P)TCP_f = 37783{,}372\$$

El valor presente $(P)TCP_f$, representa la cantidad de dinero - hoy, que se necesita para poder cubrir con los gastos anuales esperados por los fallos durante 10 años.

Un sumario de ventajas y limitaciones asociadas al proceso de estimación del impacto de la fiabilidad en el modelo propuesto de tasa de distribución de fallos seleccionada con el test de Kolmogorov - Smirnov, son presentadas a continuación:

- Este modelo es más realista que los tres modelos básicos explicados anteriormente, ya que permite que el diseñador evalúe diferentes distribuciones estadísticas y seleccione la distribución que mejor se ajuste al set de datos según el test de Kolomogorov - Smirnov. Adicionalmente, el impacto de los costes por fallos, se cuantifica a partir de los valores esperados de las variables aleatorias (tiempo promedio entre fallos - MTBF y tiempo promedios para reparar - MTTR) calculados en función de la distribución seleccionada. Su aplicación se ajusta normalmente a las fases finales del proyecto, ya que para esta etapa se tiene información más precisa sobre los aspectos de fiabilidad y mantenibilidad de las distintas alternativas a evaluar. En cuanto a la recopilación de datos de fiabilidad y mantenibilidad, el diseñador debe exigir a los fabricantes, información detallada sobre los tipos de fallos más importantes y las frecuencias de ocurrencia. Este método se utiliza para tomar decisiones concluyentes, sobre todo cuando la información recopilada para estimar los costes de fiabilidad proviene de datos de buena calidad.

- La principal limitación está asociada con la forma de cálculo del impacto de la fiabilidad en los costes, ya que este modelo propone que se consideren frecuencias de fallos constantes a lo largo del ciclo de vida del activo a ser evaluado, lo cual, en la realidad no ocurre de esta manera, ya que normalmente, la frecuencia de fallos cambia a medida que van pasando los años por la influencia de diferentes factores (operaciones, mantenimiento preventivo, calidad de materiales, etc.).

7. CONSIDERACIONES FINALES Y ÁREAS FUTURAS DE TRABAJO

La orientación específica de este trabajo hacia el análisis del Factor Fiabilidad y su impacto en los costes, se debe, a que gran parte del incremento de los costes totales durante el Ciclo de Vida útil esperado de un sistema de producción, es ocasionado en su mayoría, por la falta de previsión ante la aparición inesperada de eventos de fallos, escenario provocado básicamente por el desconocimiento y por la ausencia de una evaluación técnica en la fase de diseño de los aspectos relacionados con la Fiabilidad. Esta situación trae como resultado un incremento en los costes de totales de operación (costes que no fueron considerados en un principio) afectando de esta forma la rentabilidad del proceso de producción.

En el proceso de Análisis de los Costes a lo largo del Ciclo de Vida de un activo, existen muchas decisiones y acciones, que deben ser tomadas, siendo de interés particular para este trabajo, aquellos aspectos relacionados con el proceso de mejoramiento de la Fiabilidad (calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallos, costes de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad), ya que estos, tienen un gran impacto sobre el coste total del ciclo de vida del activo, e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los activos a costes razonables.

Por estos motivos, es de suma importancia dentro del proceso de estimación del ciclo de vida de los activos, evaluar y analizar detalladamente los aspectos relacionados con la Fiabilidad. En el futuro cercano, nosotros pensamos que las nuevas propuestas de evaluación de los Costes de Fiabilidad en los ACCV, aprovecharán el desarrollo en el área de las matemáticas y se utilizarán métodos tales como:

- Técnicas avanzadas de análisis estadístico de Fiabilidad, ver (Elsayed, 1982, Barlow, Clarotti and Spizzichino, 1993, Ireson, et al., 1996, Elsayed, 1996, Scarf, 1997, Ebeling, 1997 and Dhillon, 1999)
- Técnicas de simulación de Montearlo, ver (Barringer, 1997, Barringer and Webber , 1996, and Kaminskiy and Krivtsov, 1998)
- Métodos de simulación de Markov, ver (Roca, 1987, Kijima and Sumita, 1987 and Kijima, 1997).
- Modelos Estocásticos, ver (Tejms, 1986, Karyagina et al., 1998, Bloch-Mercier, 2000 and Yañez et al., 2002).

Finalmente, estos métodos tendrán sus características particulares, ya que no es factible desarrollar una metodología única de ACCV que cubra todas las expectativas y exigencias técnicas. Sin embargo, es necesario incluir dentro de las metodologías actuales de ACCV, modelos que permitan estimar el impacto de la Fiabilidad, con el fin de poder disminuir el nivel de incertidumbre en el proceso de evaluación de los costes totales esperados en el ciclo de vida útil de un activo de producción.

REFERENCIAS

- Ahmed, N. U. (1995). A design and implementation model for life cycle cost management system. Information and Management, 28, 261-269.
- Alting, L. (1993). Life-cycle design of products: a new opportunity for manufacturing enterprises. In Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques. A. Kusiak (ed.) (New York: Wiley), 1± 17.
- Asiedu, Y. and Gu, P. (1998). Product lifecycle cost analysis: state of art review. International Journal of Production Research, Vol. 36 No. 4, 883-908.
- Barlow, R.E., Clarotti, C.A. and Spizzichino, F. (1993). Reliability and Decision Making. Chapman & Hall.
- Barringer, H. Paul and David P. Weber. (1996). Life Cycle Cost Tutorial. Fifth International Conference on Process Plant Reliability, Gulf Publishing Company, Houston, TX.
- Barringer, H. Paul and David P. Weber. (1997). Life Cycle Cost & Reliability for Process Equipment. 8th Annual ENERGY WEEK Conference & Exhibition George R. Brown Convention Center, Houston, Texas, Organized by American Petroleum Institute.
- Blanchard, B. S. (1979). Life cycle costing - a review. Terotechnica, 1, 9± 15.

- Blanchard, B.S. (2001). Maintenance and support: a critical element in the system life cycle. Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies, May, Melbourne, Paper 003.
- Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J. (1998). Systems Engineering and Analysis. 3rd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Benda, J., Narayan, R., and Sticklen, J. (1993). Use of expert systems for life cycle analysis. Automobile Life Cycle Tools and Recycling Technologies SAE Special Publications, 966 (Warrendale, PA: SAE), 53± 57.
- Bloch-Mercier, S. (2000). Stationary availability of a semi-Markov system with random maintenance. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 16, 219-234.
- Boothroyd,G., and Dewhurst, P. (1983a). Design for assembly selecting the right method. Machine Design, November 10, 94± 98.
- Boothroyd, G. (1994). Product design for manufacture and assembly. Computer-Aided Design, 26 (7), p.505± 520.
- Caver, T. V. (1979). Life-cycle cost: attitudes and latitudes. Defense Management Journal, July - August, 12-17.
- Creese, R. C., and Moore, L. T. (1990). Cost modeling for concurrent engineering. Cost Engineering, 32 (6) June, 23± 27.
- Crespo, A., Sánchez, A. (2002). Models for maintenance optimization. A study for repairable systems and finite time periods. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 75, No.3, p.367-377.
- Crespo, A., Iung, B. and Sánchez, A. (2005). Monte Carlo based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, No.3, p.273-289.
- Dean, E. B. (1989). Parametric cost analysis: a design function. Transactions of the American Association of Cost Engineers 33rd Annual Meeting, June, San Diego, CA.
- Dean, E. B. (1995). Parametric cost deployment. Proceedings of the Seventh Symposium on Quality Function Deployment, June, Nov., MI, USA, 27± 34.
- Daschbach, J.M., and Apgar, H. (1988). Design analysis through techniques of parametric cost estimation. Engineering Costs and Production Economics, 14, 87± 93.
- Dewhurst, P., and Boothroyd, G. (1984). Design for assembly: automatic assembly. Machine Design, January 26, p.87± 92.
- Dighton, R. D. (1980). The Hornet program: a design to life cycle costs. Proceedings of the Design to Cost and Life Cycle Cost AGARD, Conference, 289, May, 8± 1 to 8± 12.
- Dhillon, B. S. (1989). Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Dhillon, B.S. (1999). Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance. Gulf, Houston, TX.
- Dixon, T. E., and Anderson, R. H. (1976). Implementation of the design to cost concept. Proceedings of the 1976 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 224± 229.
- Dowlatshahi, S. (1992). Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach. Journal of Production Research, 30 (8), 1803-1818.
- Durairaj, S. and Ong, S. (2002). Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies. Corporate Environmental Strategy, Vol. 9, No. 1, p.30-39.
- DOD Guide LCC-1, DOD Guide LCC-2, DOD Guide LCC-3. (1998). Life Cycle Costing Procurement Guide, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions, Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions. Department of Defense, Washington, D.C.
- Earles, D. R. (1974). Design to operation and support costs. Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 149± 153.
- Ebeling, C. (1997). Reliability and Maintainability Engineering. McGraw Hill Companies, USA.
- Ehrlenspiel, K. (1987). Reduction of product costs in West Germany. International Conference on Engineering Design, ICED '87, August, 796± 806.
- Elsayed, E.A. (1982). Reliability Analysis of a container spreader. Microlelectronics and Reliability, Vol. 22, Issue 4, 723-734.
- Elsayed, E. A. (1996). Reliability Engineering. Addison Wesley Longman INC, New York.
- Fabrycky,W. J. (1987). Designing for the life cycle. Mechanical Engineering, January, 72± 74.
- Fabrycky, W. J. (1997). Análisis del Coste de Ciclo de Vida de los Sistemas. ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España, 19-33.
- Fabrycky, W. J. and Blanchard, B. S. (1991). Life Cycle Costing and Economic Analysis. Prentice Hall, Inc, Englewwod Cliff, New Jersey.
- Fad, B. E., and Summers, R. M. (1988). Parametric estimating for new business ventures. Engineering Costs and Production Economics, 14, 165± 176.

- Fleischer, G. A., and Khoshnevis, B. (1986). Incorporating economic impact assessment into computer-aided design. Proceedings of the International Industrial Engineering Conference, 163± 174.
- French, M. J. (1990). Function costing: potential aid to designers. Journal of Engineering Design, 1 (1), 47± 53.
- Gaete, A. (2001). Evaluation of Life cycle. National Congress of Maintenance, Santiago, Chile.
- Gansler, J. S. (1974). Application of life cycle costing to the DoD system acquisition decision process. Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 147±148.
- Glantsching, W. J. (1994). Green design: an introduction to issues and challenges. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology ± Part A, 17 (4), 508± 513.
- Goffin, K. (2000). Design for supportability: essential component of new product development. Research-Technology Management, Vol. 43 No. 2, March/April. p. 40-7.
- Greves, D., and Schreiber, B. (1993). Engineering costing techniques in ESA. WWW-http://esapub.esriu.esa.it.pointtobullet/greves1.html
- Gupta, Y. P. (1983). Life cycle cost models and associated uncertainties. In Electronics Systems Effectiveness and Life Cycle Costing, NATO ASI Series, Vol. F,J,K. Skwirzynski (ed.) (Berlin: Springer) 535± 549.
- Ireson, W. Grant, Clyde F. Coombs Jr., Richard Y. Moss. (1996). Handbook of Reliability Engineering and Management. 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- Ishii, K., Eubanks, C. F., and Di Marco, P. (1994). Design for product retirement and material life-cycle. Materials and Design, 15 (4), 225± 233.
- Jovane,A., Atling, L., Armillotta, A., Eversheim,W., Feldmann,K., Seliger,G., and Roth,M. (1993). A key issue in product life cycle: disassembly. Annals of the CIRP, 42, 651± 658.
- Kaminskiy M, Krivtsov V. (1998). A Monte Carlo approach to repairable system reliability analysis. Probabilistic safety assessment and management, New York: Springer; 1998. p. 1063-8.
- Karyagina, M., Wong, W., Vlacic, L. (1998). Life cycle cost modelling using marked point processes. Reliability Engineering & System Safety, 59, p. 291-298
- Kececioglu, D. (1991). Reliability and Life Testing Handbook. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey.
- Knezevic, J. (1993). Maintainability and Supportability Engineering - A Probabilistic Approach. pág. 292, plus software PROBCHAR, McGraw Hill, Londres (Inglaterra).
- Keys, L. K. (1990). System life cycle engineering and DF X. IEEE Transactions on
Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 13 (1), p. 83± 93.
- Kijima, M., Sumita, N. (1987). A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative Markovian increments. Journal Appl. Prob., 23, 71-88.
- Kijima, M., (1977). Markov processes for stochastic modeling. Chapman &Hall, London.
- Kirk, S. and Dellisola, A. (1996). Life Cycle Costing for Design Professionals. McGraw Hill, New York, 6-57.
- Kolarik,W. J. (1980). Life cycle costing and associated models. Proceedings of the American Institute of Industrial Engineers 1980 Spring Annual Conference, 58± 64.
- Kriwet, A., Zussman, E., and Seliger, G. (1995). Systematic integration of design for recycling into product design. International Journal of Production Economics, 38, p.15± 22.
- Levy, H. and Samat, M. (1990). Capital Investment and Financial Decisions. 4th Edition, Prentice Hall.
- Life Cycle Costing Workbook: A guide for implementation of Life on Life Cycle Costing in the Federal Supply Services. (1989). U.S. General Services Administration, Washington.
- Life Cycle Analysis as an Aid Decision Making. (1985). Building Information Circular, Department of Energy, Office of Facilities Engineering and Property Management, Washington.
- López, R. (2002). Diseño de software de análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad - ICDM 2002. Informe Técnico INT-8790-2002, PDVSA INTEVEP, Venezuela.
- Mackenzie, J (1997). Turn your company's strategy into reality. Manufacturing Management, January. p. 6-8.
- McNichols, G. R. (1979). Treatment of uncertainty on life-cycle costing. Proceedings of the 1979 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 56± 61.
- McNichols, G. R. (1983). Uncertainties of LCC predictions. Electronics Systems Effectiveness and Life Cycle Costing, In NATO ASI Series, Vol. F, J, K. Skwirzynski (ed.) (Berlin: Springer) 583± 594.
- Markeset, T. and Kumar, U. (2001). R&M and risk analysis tools in product design to reduce life-cycle cost and improve product attractiveness. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 22-25 January, Philadelphia. p. 116-22.
- Markeset, T. and Kumar, U. (2003). Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems. Journal of Quality in Maintenance Engineering; Volume 9 No. 4. p. 376-392.
- Metzler, E.G. (1974). Forcing functions integrate R&M into design. Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 52± 55.

- Miyakawa, S., and Ohashi, T. (1986). The Hitachi new assemblability evaluation method (AFM). Proceedings of the Ontario Conference on Product Design for Assembly, Newport, RI, USA.
- Nachlas, J. (1995). Fiabilidad. ISDEFE, Ingeniería de Sistemas, Madrid, España, 17-25.
- Navas, J. (1997). Ingeniería de Mantenimiento. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 58-66.
- Navinchandra, D. (1991). Design for environmentability. Design Theory and Methodology, ASME, DE-31, 119± 125.
- Noble, J.S., and Tanchoco, J.M.A. (1990). Concurrent design and economic justification in developing a product. International Journal of Production Research, 28 (7), 1225± 1238.
- Ostwald, P. F. (1974). Cost Estimating for Engineering and Management (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall).
- Parra, C. (2002). Evaluación de la Influencia de la Confiabilidad en el Ciclo de Vida de 16 Motocompresores del Distrito Maturín. Informe Técnico INT-9680-2002, PDVSA INTEVEP, Venezuela.
- Parra, C. y Omaña C. (2003). Análisis determinístico del ciclo de vida y evaluación del factor confiabilidad en 56 motocompresores de gas del Distrito San Tomé. Congreso Internacional de Mantenimiento, Colombia, 2-10.
- Pugh, S. (1974). Manufacturing cost information - the needs of the engineering designer. Proceedings of the Conference Information Systems for Designers, Southampton, UK, Paper 12, 1± 8.
- Riddell, H., Jennings, A. (2001). Asset Investment & Life Cycle Costing, The Woodhouse Partnership, Technical paper, London.
- Roca, J.L. (1987). An approach in the life cycle costing of an integrated logistic support. Microelectronics and Reliability, Vol. 27, Issue 1, 25-27.
- Ruff, D. N., and Paasch, R. K. (1993). Consideration of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems. Design Theory and Methodology, ASME, DE- 53, 175-187.
- Scarf, P.A. (1997). On the application of mathematical models in maintenance. European Journal of Operational Research, 99 (3), 493-506.
- Scheuring, J. F., Bras, B., and Lee, K.-M. (1994). Significance of design for disassembly in integrated disassembly and assembly process. International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing, 3 (2), 21± 33.
- Shields, M. D., and Young, S. M. (1991). Managing product life cycle costs: an organizational model. Cost Management, Autumn, 39± 52.
- Smith, C. and Knezevic, J. (1996). Achieving quality through supportability: part 1: concepts and principles. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 2 No. 2, p.21-9.
- Smith, D. J., and Babb, A. H. (1973). Maintainability Engineering, Halsted Press.
- Sullivan, J. L., and Young, S. B. (1995). Life cycle analysis/assessment. Advanced Materials and Processes, 147 (2), 37± 40.
- Tejms, H.C. (1986). Stochastic Modelling and Analysis. Wiley.
- Tipnis, V. A. (1993). Evolving issues in product life cycle design. Annals of the CIRP, 42 (1), 169± 173.
- Tzemos, S., and Dippold, D. (1986). Stochastic cost estimating in repository life-cycle cost analysis. proceedings of the Annual Meeting of the Nuclear Materials Management, 15, New Orleans, LA, June, 279± 290.
- Weirda, L. S. (1988). Product cost-estimation by the designer. Engineering Costs and Production Economics, 13, 189± 198.
- Westney,R. E. (1983). Computer-aided design - a new tool for the cost engineer? Engineering Costs and Production Economics, 7, 205± 212.
- Weule,H. (1993). Life cycle analysis a strategic element for future products and manufacturing technologies. Annals of the CIRP, 42 (1), 181± 184.
- Willians, D., Scott R. (2000). Reliability and Life Cycle Costs. RM-Reliability Group, Technical Paper, Texas, November.
- Wilson, R. L. (1986). Operations and support cost model for new product concept development. Proceedings of the 8th Annual Conference on Components and Industrial Engineering, 128± 131.
- Woodhouse, J. (1991). Turning engineers into businessmen. 14th National Maintenance Conference, London.
- Woodhouse, J. (1993). Managing Industrial Risk. Chapman Hill Inc, London, 200-241.
- Woodward, D. G. (1997). Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application. International Journal of Project Management, 15(6). p. 335- 344.
- Yan, X., and Gu, P. (1995). Assembly/disassembly sequence planning for life-cycle cost estimation. Manufacturing Science and Engineering, ASME, MED-2 (2)/Mh-3 (2), 935± 956.
- Yañez, M., Joglar, F., Mohammad, M. (2002). Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience. Reliability Engineering & System Safety, 77. p. 167-180.
- Zussman, E., Kriwet, A., and Seliger, G. (1994). Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling. Annals of the CIRP, 43 (1), 9± 14.

- Zust, R., and Wagner,R. (1992). Approach to the identification and quantification of environmental effects during product life. Annals of the CIRP, 41 (1), 473± 476.

V Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Mecánica, Organizado por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Mérida,Venezuela Octubre, 2005 – Fygueroa, Simón. Editorial de la Universidad de los Andes

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL ANÁLISIS DE COSTE DEL CICLO DE VIDA (ACCV) DE UN ACTIVO INDUSTRIAL

Carlos Parra**
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
**carparmar@us.es (autor principal)
Adolfo Crespo*
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
*adolfo.crespo@esi.us.es
Pablo Cortés*
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
*pca@esi.us.es
Simón Fygueroa*
Universidad de los Andes, Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento, Venezuela
*figueroa@ula.com

RESUMEN

El análisis de coste de ciclo de vida (ACCV) es una metodología desarrollada para evaluar como varían los costes de un activo a lo largo de su vida útil. En este trabajo se exploran los aspectos relacionados con el impacto de la fiabilidad en los costes totales de ciclo de vida y se propone un modelo que permita evaluar el impacto de los fallos (costes por fiabilidad), a partir de frecuencias de fallos constante estimadas según la distribución estadística: Exponencial, Weibull y Log Normal, que mejor se ajuste al resultado obtenido del test de Kolmogorov - Smirnov. El trabajo también incluye un caso de estudio, cuyos resultados permite analizar las ventajas y las limitaciones técnicas del modelo propuesto. Finalmente, el trabajo concluye mostrando los posibles caminos para investigaciones futuras en el área de evaluación de los costes por fiabilidad dentro del proceso de ACCV.

Palabras clave: Fiabilidad, Fallos, Costes de Ciclo de Vida, Mantenimiento, Kolmogorov - Smirnov

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de Análisis de Coste del Ciclo de Vida (ACCV) comenzó a aplicarse de manera estructurada a partir de la década del 70, específicamente en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, en el área de la aviación militar (Asiedu and Gu, 1998). Sin embargo la mayoría de las metodologías desarrolladas en esta etapa por el Departamento de Defensa, estaban orientadas hacia los procesos de procura y logística y no incluían la fase de diseño y producción. Una vez reconocida la necesidad de aplicar las metodologías de ACCV en los procesos de diseño, planificación y control de la producción, la *US National Science Foundation* patrocinó una conferencia en 1984, integrada por las principales academias y organizaciones industriales (Fleischer and Khoshnevis 1986 y Fabrycky, 1987), en esta conferencia se identificaron y priorizaron 34 áreas de investigación, recibiendo las calificaciones más altas de priorización las áreas de: evaluación económica en fase de diseño, análisis de ciclo de vida y diseño asistido por ordenador (CAD - CAE: *computer-aided estimating*).

En el intento para mejorar el diseño de los activos y reducir los cambios en el tiempo, la denominada ingeniería concurrente (ingeniería de ciclo de vida) ha emergido como una técnica efectiva dentro del proceso de optimización de los costes (Keys, 1990). La ingeniería de ciclo de vida considera que la fase inicial de desarrollo de un activo comienza con la identificación de la necesidad del mismo y posteriormente se generarán otras fases tales como diseño (conceptual, preliminar, detallado), producción (manufactura), utilización (operaciones, mantenimiento), soporte (logística) y desincorporación (sustitución).

Kirt and Dellisola (1996) define el ACCV como una técnica de cálculo económico que permite optimizar la toma de decisiones asociadas a los procesos de diseño, selección, desarrollo y sustitución de los activos que conforman un sistema de producción. La misma propone evaluar de forma cuantitativa todos los costes asociados al período

APÉNDICE IV

- Artículo publicado: ***"Ingeniería de Fiabilidad aplicada al proceso de Análisis de Coste de Ciclo de Vida (ACCV). Revisión de modelos básicos"***. Autores: C. Parra, A. Crespo, P. Cortés y S. Fygueroa. Publicado en: ***Ingeniería y Gestión de Mantenimiento, Editorial Alción, Madrid, España, ISSN 1695-3754, Número 47, Mayo/Junio, 2006, pp.31 – 43.***

Ingeniería y Gestión de Mantenimiento - Juric, Zoran
© 2006 Editorial Alción, Madrid, ISSN 1695-3754

INGENIERÍA DE FIABILIDAD APLICADA AL PROCESO DE ANÁLISIS DE COSTE DE CICLO DE VIDA (ACCV). REVISIÓN DE MODELOS BÁSICOS.

Carlos Parra**
**Autor correspondiente
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
Phone: +34 954 487215, FAX: +34 954 486112
carparmar@alum.us.es,
Adolfo Crespo
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
adolfo.crespo@esi.us.es
Pablo Cortés
Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería, Departamento de Organización Industrial, España
pca@esi.us.es
Simón Fygueroa
Universidad de los Andes, Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento, Venezuela
figueroa@ula.com

RESUMEN

El análisis de coste de ciclo de vida (ACCV) es una metodología desarrollada para evaluar como varían los costes de un activo a lo largo de su vida útil. En este trabajo se exploran los aspectos relacionados con el impacto de la fiabilidad en los costes totales de ciclo de vida y se describen tres modelos básicos (Tasa de Fallos Constante, Tasa de Fallos Determinístico y Tasa de fallos por la Distribución de Weibull), que incluyen dentro de su proceso de evaluación, la cuantificación de las consecuencias (costes por fiabilidad) que podrían ocasionar los diversos eventos de fallos de un activo dentro de un sistema de producción. El trabajo también incluye un caso de estudio, cuyos resultados permiten analizar las limitaciones técnicas de cada uno de los modelos evaluados. Finalmente, el trabajo concluye mostrando los posibles caminos para investigaciones futuras en el área de evaluación de los costes por fiabilidad dentro del proceso de ACCV.

Palabras clave: Fiabilidad, Fallos, Costes de Ciclo de Vida, Mantenimiento

ABSTRACT

Life cycle costing is a well-established method used to evaluate alternative asset options. This methodology takes into account all costs arising during the life cycle of the asset. These costs can be classified as the 'capital expenditure' (CAPEX) incurred when the asset is purchased and the 'operating expenditure' (OPEX) incurred throughout the asset's life.

In this paper we explore different aspects related with the ´non reliability` costs within the life cycle cost analysis (LCCA), and we describe three basic models found in literature (constant failures rate, deterministic failures rate and Weibull distribution failures rate), that include in their evaluation process the quantification of the impact that could cause the diverse failure events in the total costs of a production asset. The paper also contains a case study where we applied the above mentioned concepts and models to the life cycle cost assessment of a certain asset. Finally we do present a summary of results and discuss about the limitations of the different models. The paper concludes presenting possible directions of future research work.

Keywords: Life Cycle Cost Analysis (LCCA), Reliability, Maintenance, Failures.

APÉNDICE V

- Artículo publicado: ***"A structured approach to maintenance management. Process and framework to manage maintenance"***. Autores: A. Crespo y C. Parra.
- Presentado en el Congreso: ***EUROMAINTENANCE 08, Brussels, 8 - 10 April 2008, paper 12***
- ***Página web:*** ***www.euromaintenace.org***

EUROMAINTENANCE 08
CONFERENCE ON ASSET MANAGEMENT & PRODUCTION RELIABILITY
PAPER Brussels • 8-10 April 2008

A STRUCTURED APPROACH TO MAINTENANCE MANAGEMENT. PROCESS AND FRAMEWORK TO MANAGE MAINTENANCE.

Short content:

- Presenting a model for maintenance management.
- Ensuring maintenance management efficiency and effectiveness.
- Presenting a framework for maintenance management, describing the techniques that can be used to improve the maintenance decision making process.

Key learning points:

- Description of a suggested process and framework to manage maintenance properly.
- Phases and engineering techniques that can be used and when.
- Strong points of different maintenance engineering techniques.

Speaker

- Adolfo Crespo
- Carlos Parra

Abstract

This paper presents a structured approach to manage maintenance of complex production systems. We first discuss about effectiveness and efficiency of maintenance management, and then we present a process ensuring these points in a maintenance organization. Finally, a framework of methods and techniques that may be used to improve each building block decision making process is presented.

Company

Name	University of Seville
Address	Escuela de Ingenieros
	Camino de los Descubrimientos s/n. Seville
City + zip code	41092
Country	Spain
Web site	http://www.terra.es/personal8/adolfo_crespo

Introduction

Maintenance management includes [1], "all the activities of the management that determine the maintenance objectives or priorities (defined as targets assigned and accepted by the management and maintenance department), strategies (defined as a management method in order to achieve maintenance objectives), and responsibilities and implement them by means such as maintenance planning, maintenance control and supervision, and several improving methods including economical aspects in the organization". It can be shown that [2], in order to manage maintenance effectively and efficiently, we can summarize these points by clearly understanding the following two: The maintenance management process, the course of action and the series of stages or steps to follow and; The maintenance management framework — the essential supporting structure and the basic system — needed to manage maintenance.

The maintenance management process

The maintenance management process can be divided into two parts: the definition of the strategy, and the strategy implementation. The first part, definition of the maintenance strategy, requires the definition of the maintenance objectives as an input, which will be derived directly from the business plan. This initial part of the maintenance management process conditions the success of maintenance in an organization, and determines the effectiveness of the subsequent implementation of the maintenance plans, schedules, controls and improvements.

Effectiveness shows how well a department or function meets its goals or company needs, and is often discussed in terms of the quality of the service provided, viewed from the customer's perspective. This will allow us to arrive at a position where we will be able to minimize the maintenance indirect costs [3], those costs associated with production losses, and ultimately, with customer dissatisfaction. In the case of maintenance, effectiveness can represent the overall company satisfaction with the capacity and condition of its assets [4], or the reduction of the overall company cost obtained because production capacity is available when needed [5]. Effectiveness concentrates then on the correctness of the process and whether the process produces the required result.

The second part of the process, the implementation of the selected strategy has a different significance level. Our ability to deal with the maintenance management implementation problem (for instance, our ability to ensure proper skill levels, proper work preparation, suitable tools and schedule fulfilment), will allow us to minimize the maintenance direct cost (labour and other maintenance required resources). In this part of the process we deal with the efficiency of our management, which should be less important. Efficiency is acting or producing with minimum waste, expense, or unnecessary effort. Efficiency is then understood as providing the same or better maintenance for the same cost.

In this paper we present a generic model proposed for maintenance management integrates other models found in the literature (see for instance [6,7]) for built and in-use assets, and consists of eight sequential management building blocks, as presented in Figure 1. The first three building blocks condition maintenance effectiveness, the fourth an fifth ensure maintenance efficiency, blocks six and seven are devoted to maintenance and assets life cycle cost assessment, finally block number eight ensures continuous maintenance management improvement.

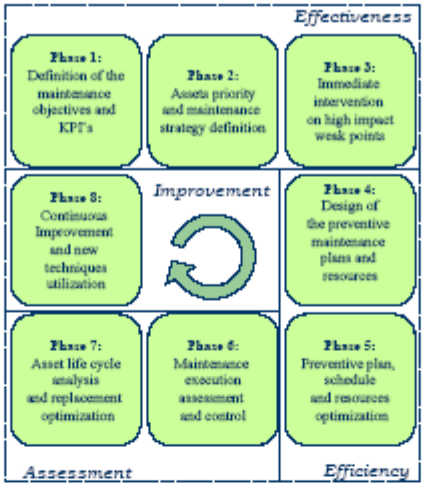


Figure 1. Maintenance management model

Maintenance management framework

In this section, we will briefly introduce each block and discuss methods that may be used to improve each building block decision making process (see Figure 2).

Figure 2. Sample of techniques within the maintenance management framework

Regarding the Definition of Maintenance Objectives and KPI's (Phase 1), it is common the operational objectives and strategy, as well as the performance measures, are inconsistent with the declared overall business strategy [8]. This unsatisfactory situation can indeed be avoided by introducing the Balanced Scorecard (BSC) [9]. The BSC is

specific for the organization for which it is developed and allows the creation of key performance indicators (KPIs) for measuring maintenance management performance which are aligned to the organization's strategic objectives. Unlike conventional measures which are control oriented, the Balanced Scorecard puts overall strategy and vision at the centre and emphasizes on achieving performance targets. The measures are designed to pull people toward the overall vision. They are identified and their stretch targets established through a participative process which involves the consultation of internal and external stakeholders, senior management, key personnel in the operating units of the maintenance function, and the users of the maintenance service. In this manner, the performance measures for the maintenance operation are linked to the business success of the whole organization [10].

Once the Maintenance Objectives and Strategy are defined, there are a large number of quantitative and qualitative techniques which attempt to provide a systematic basis for deciding what assets should have priority within a maintenance management process (Phase 2), a decision that should be taken in accordance with the existing maintenance strategy. Most of the quantitative techniques use a variation of a concept known as the "probability/risk number" (PRN) [11]. Assets with the higher PRN will be analysed first. On some occasions, there is no hard data about historical failure rates, but the maintenance organization may require a certain gross assessment of assets priority to be carried out. In these cases, qualitative methods may be used and an initial assets assessment, as a way to start building maintenance operations effectiveness, may be obtained. Once there is a certain definition of assets priority, we have to set up the strategy to be followed with each category of assets. Of course, this strategy will be adjusted over time, but an initial starting point must be stated.

Once the assets have been prioritized and the maintenance strategy to follow defined, the next step would be to develop the corresponding maintenance actions associated with each category of assets. Before doing so, we may focus on certain repetitive — or chronic — failures that take place in high priority items (Phase 3). Finding and eliminating, if possible, the causes of those failures could be an immediate intervention providing a fast and important initial payback of our maintenance management strategy. The entire and detailed equipment maintenance analysis and design could be accomplished, reaping the benefits of this intervention if successful.

There are different methods developed to carry out this weak point analysis, one of the most well known being root-cause failure analysis (RCFA). This method consists of a series of actions taken to find out why a particular failure or problem exists and to correct those causes. Causes can be classified as physical, human or latent. The physical cause is the reason why the asset failed, the technical explanation on why things broke or failed. The human cause includes the human errors (omission or commission) resulting in physical roots. Finally, the latent cause includes the deficiencies in the management systems that allow the human errors to continue unchecked (flaws in the systems and procedures). Latent failure causes will be our main concern at this point of the process.

Designing the preventive maintenance plan for a certain system (Phase 4) requires identifying its functions, the way these functions may fail and then establish a set of applicable and effective preventive maintenance tasks, based on considerations of system safety and economy. A formal method to do this is the Reliability Centred Maintenance (RCM).

Optimization of maintenance planning and scheduling (Phase 5) can be carried out to enhance the effectiveness and efficiency of the maintenance policies resulting from an initial preventive maintenance plan and program design. Models to optimize maintenance plan and schedules will vary depending on the time horizon of the analysis. Long-term models address maintenance capacity planning, spare parts provisioning and the maintenance/replacement interval determination problems, mid-term models may address, for instance, the scheduling of the maintenance activities in a long plant shut down, while short term models focus on resources allocation and control [13]. Modelling approaches, analytical and empirical, are very diverse. The complexity of the problem is often very high and forces the consideration of certain assumptions in order to simplify the analytical resolution of the models, or sometimes to reduce the computational needs.

The execution of the maintenance activities — once designed, planned and scheduled using techniques described for previous building blocks — has to be evaluated and deviations controlled to continuously pursue business targets and approach stretch values for key maintenance performance indicators as selected by the organization (Phase 6). Many of the high level maintenance KPIs, are built or composed using other basic level technical and economical indicators. Therefore, it is very important to make sure that the organization captures suitable data and that that data is properly aggregated/disaggregated according to the required level of maintenance performance analysis.

A life cycle cost analysis (Phase 7) calculates the cost of an asset for its entire life span. The analysis of a typical asset could include costs for planning, research and development, production, operation, maintenance and disposal. Costs such as up-front acquisition (research, design, test, production, construction) are usually obvious, but life cycle cost analysis crucially depends on values calculated from reliability analyses such us failure rate, cost

of spares, repair times, and component costs. A life cycle cost analysis is important when making decisions about capital equipment (replacement or new acquisition) [12], it reinforces the importance of locked in costs, such as R&D, and it offers three important benefits:

- All costs associated with an asset become visible. Especially: Upstream; R&D, Downstream; Maintenance;
- Allows an analysis of business function interrelationships. Low R&D costs may lead to high maintenance costs in the future;
- Differences in early stage expenditure are highlighted, enabling managers to develop accurate revenue predictions.

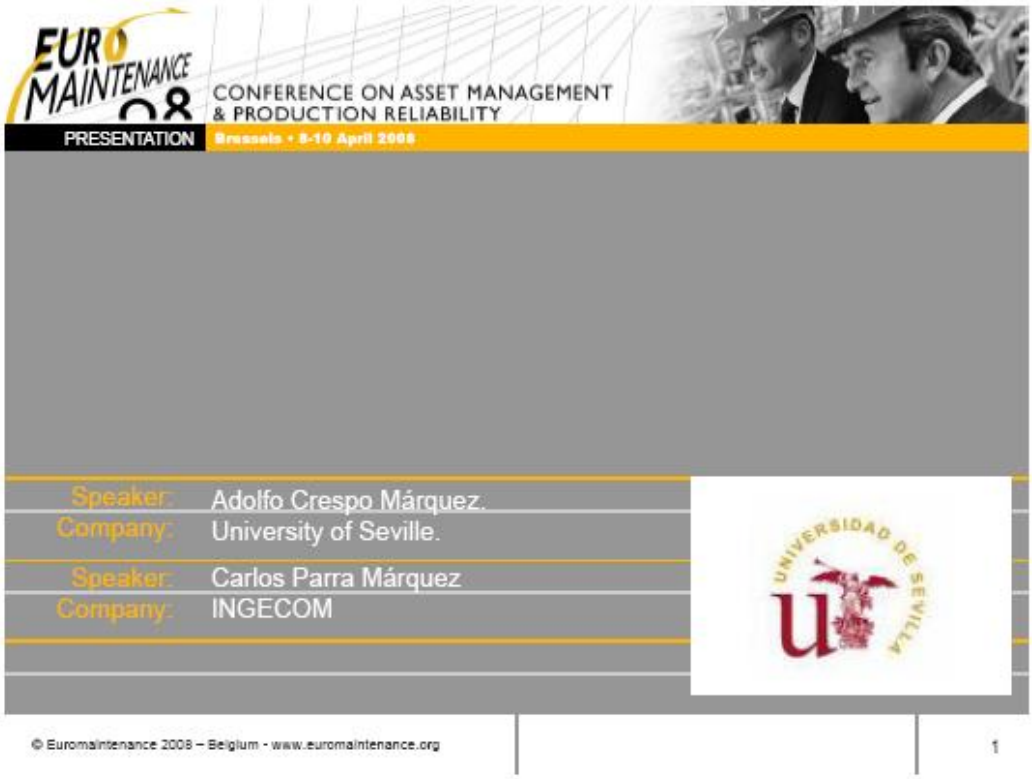
Continuous improvement of maintenance management (Phase 8) will be possible due to the utilization of emerging techniques and technologies in areas that are considered to be of higher impact as a result of the previous steps of our management process. Regarding the application of new technologies to maintenance, the "e-maintenance" concept is put forward as a component of the e-manufacturing concept [14], which profits from the emerging information and communication technologies to implement a cooperative and distributed multi-user environment. E-Maintenance can be defined [10] as a maintenance support which includes the resources, services and management necessary to enable proactive decision process execution. This support not only includes e-technologies (i.e. ICT, Web-based, tether-free, wireless, infotronic technologies) but also, e-maintenance activities (operations or processes) such as e-monitoring, e-diagnosis, e-prognosis…etc. Besides new technologies for maintenance, the involvement of maintenance people within the maintenance improvement process will be a critical factor for success. Of course, higher levels of knowledge, experience and training will be required, but at the same time, techniques covering the involvement of operators in performing simple maintenance tasks will be extremely important to reach higher levels of maintenance quality and overall equipment effectiveness.

Conclusions

This paper summarizes the process (the course of action and the series of stages or steps to follow) and the framework (the essential supporting structure and the basic system) needed to manage maintenance. A set of models and methods to improve maintenance management decision making is presented. Models are then classified according to their more suitable utilization within the maintenance management process. For further discussion of these topics the reader is addressed to a recent work of the author [2].

References

[1] EN 13306:2001, (2001) Maintenance Terminology. European Standard. CEN (European Committee for Standardization), Brussels.
[2] Crespo Márqyez A, (2007) The maintenance management Framework. Models and methods for complex systems maintenance. London: Springer Verlag.
[3] Vagliasindi F, (1989) Gestire la manutenzione. Perche e come. Milano: Franco Angeli.
[4] Wireman T, (1998) Developing performance indicators for managing maintenance. New York: Industrial Press.
[5] Palmer RD, (1999) Maintenance Planning and Scheduling. New York: McGraw-Hill.
[6] Pintelon, LM, Gelders LF, (1992) Maintenance management decision making. European Journal of Operational Research, 58: 301-317.
[7] Vanneste SG, Van Wassenhove LN, (1995) An integrated and structured approach to improve maintenance. European Journal of Operational Research, 82: 241-257.
[8] Gelders L, Mannaerts P, Maes J, (1994) Manufacturing strategy, performance indicators and improvement programmes. International Journal of production Research, 32(4):797-805.
[9] Kaplan RS, Norton DP, (1992) The Balanced Scorecard - measures that drive performance. Harvard Business Review, 70(1): 71-9.
[10] Tsang A, Jardine A, Kolodny H, (1999) Measuring maintenance performance: a holistic approach. International Journal of Operations and Production Management, 19(7):691-715.
[11] Moubray J, (1997) Reliability-Centred Maintenance (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
[12] Campbell JD, Jardine AKS, (2001) Maintenance excellence. New York: Marcel Dekker.
[13] Duffuaa SO, (2000) Mathematical models in maintenance planning and scheduling. In Maintenance, Modelling and Optimization. Ben-Daya M, Duffuaa SO, Raouf A, Editors. Boston : Kluwer Academic Publishers.
[14] Lee J, (2003) E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 19(6): 501-507.



Content

- Introduction
- Background
- A maintenance management model
- Process and framework
- Conclusions

Start with a short overview of the content of your presentation.
(delete this text)

Introduction

Maintenance management (EN 13306:2001)

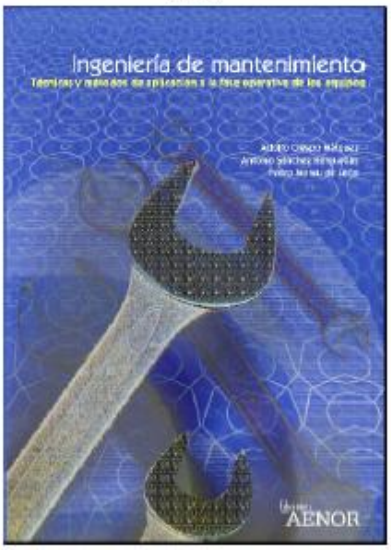
"All the activities of the management that determine the maintenance objectives or priorities (defined as targets assigned and accepted by the management and maintenance department), strategies (defined as a management method in order to achieve maintenance objectives), and responsibilities and implement them by means such as maintenance planning, maintenance control and supervision, and several improving methods including economical aspects in the organization".

We claim that, in order to manage maintenance effectively and efficiently, we can summarize these points by clearly understanding the following two:

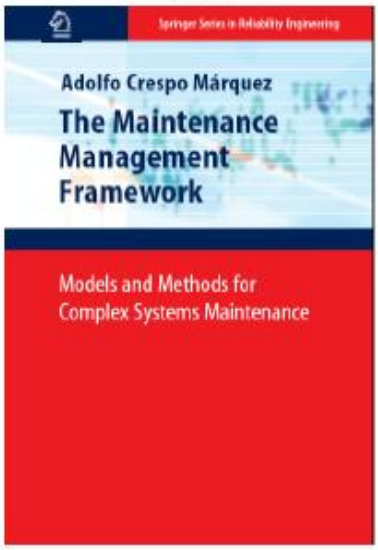
- The **maintenance management process**, the course of action and the series of stages or steps to follow and;
- The **maintenance management framework** — the essential supporting structure and the basic system — needed to manage maintenance.

Background

2004



2007



© Euromaintenance 2008 – Belgium - www.euromaintenance.org

4

MM model

Chapter VII.

A Review of key decision areas in maintenance management.

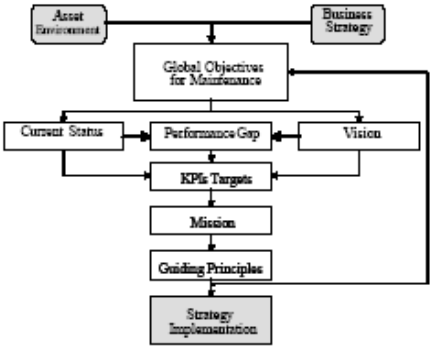
Crespo Márquez A.

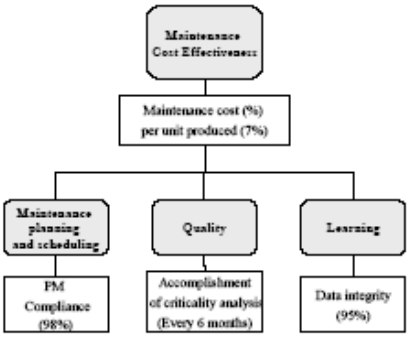
2007. The Maintenance Management Framework. Springer Verlag

MM Process

- The maintenance management process can be divided into two parts: the **definition of the strategy, and the strategy implementation**.
- The first part, definition of the maintenance strategy, requires the definition of the maintenance objectives as an input, which will be derived directly from the business plan. This initial part of the maintenance management process conditions the success of maintenance in an organization, and determines the effectiveness of the subsequent implementation of the maintenance plans, schedules, controls and improvements.
- The second part of the process, the implementation of the selected strategy has a different significance level. Our ability to deal with the maintenance management implementation problem (for instance, our ability to ensure proper skill levels, proper work preparation, suitable tools and schedule fulfilment), will allow us to minimize the maintenance direct cost (labour and other maintenance required resources)

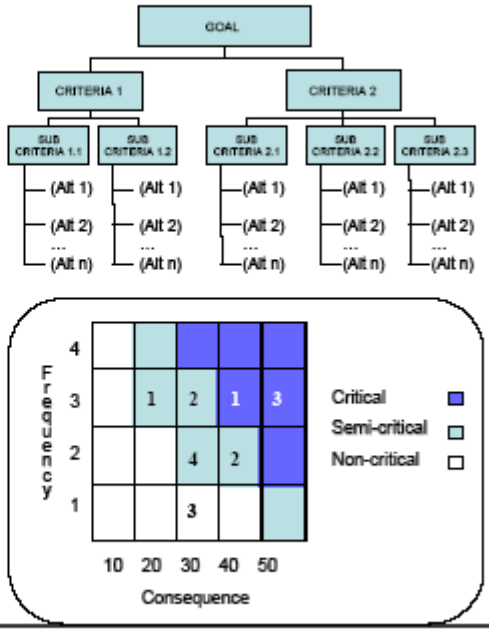
- MM Framework (**Phase 1**)
  - Regarding the Definition of Maintenance Objectives and KPI's (**Phase 1**), we propose the utilization of the Balanced Scorecard (BSC).



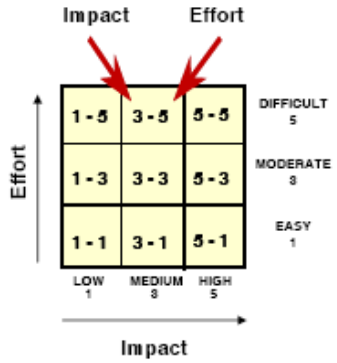


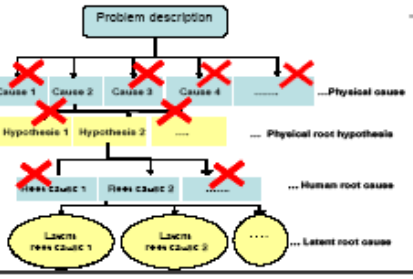
From KPIs to functional indicators

- MM Framework (**Phase 2**)
  - there are a large number of quantitative and qualitative techniques which attempt to provide a systematic basis for deciding what assets should have priority within a maintenance management process (Phase 2), a decision that should be taken in accordance with the existing maintenance strategy

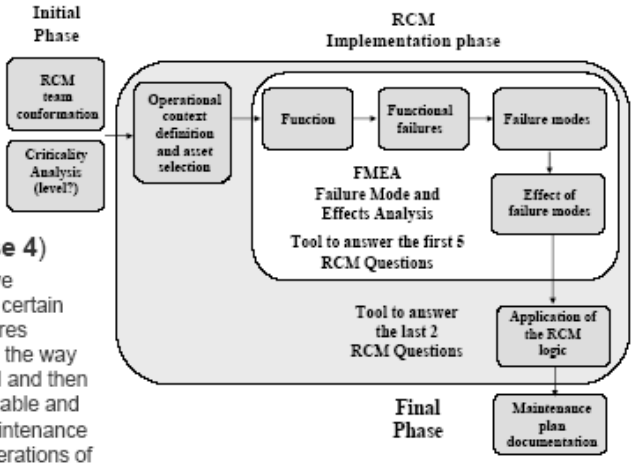


- MM Framework (**Phase 3**)
  - The next step would be to develop the corresponding maintenance actions associated with each category of assets. Before doing so, we may focus on certain repetitive — or chronic — failures that take place in high priority items (Phase 3)

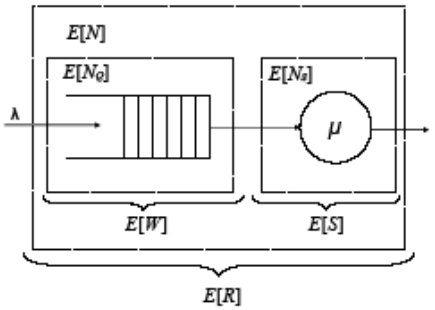


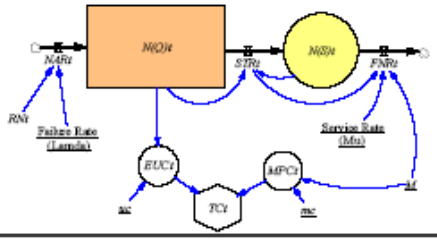


- MM Framework (**Phase 4**)
  - Designing the preventive maintenance plan for a certain system (Phase 4) requires identifying its functions, the way these functions may fail and then establish a set of applicable and effective preventive maintenance tasks, based on considerations of system safety and economy. A formal method to do this is the Reliability Centred Maintenance (RCM).

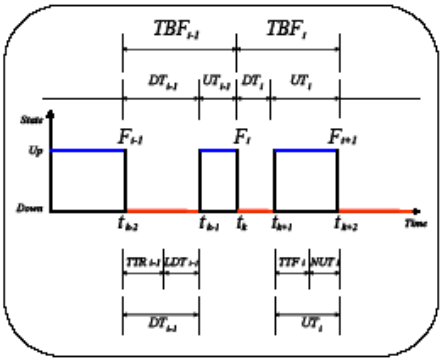


- MM Framework (**Phase 5**)
  - Optimization of maintenance planning and scheduling (Phase 5) can be carried out to enhance the effectiveness and efficiency of the maintenance policies resulting from an initial preventive maintenance plan and program design. Models to optimize maintenance plan and schedules will vary depending on the time horizon of the analysis.

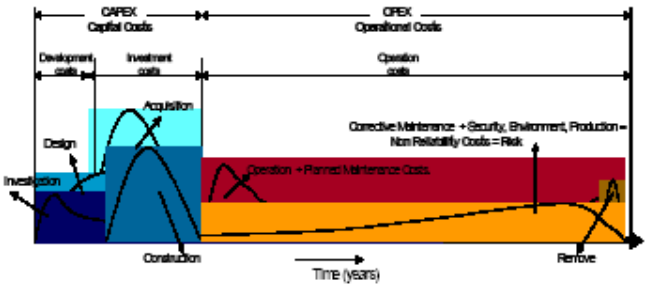




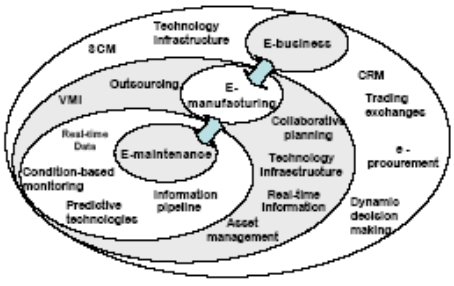
- MM Framework (**Phase 6**)
  - The execution of the maintenance activities — once designed, planned and scheduled using techniques described for previous building blocks — has to be evaluated and deviations controlled to continuously pursue business targets and approach stretch values for key maintenance performance indicators as selected by the organization (Phase 6).

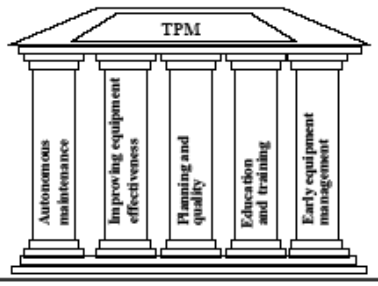


- MM Framework (**Phase 7**)
  - A life cycle cost analysis (Phase 7) calculates the cost of an asset for its entire life span. The analysis of a typical asset could include costs for planning, research and development, production, operation, maintenance and disposal.



- MM Framework (**Phase 8**)
  - Continuous improvement of maintenance management (Phase 8) will be possible due to the utilization of emerging techniques and technologies in areas that are considered to be of higher impact as a result of the previous steps of our management process.





- Conclusions

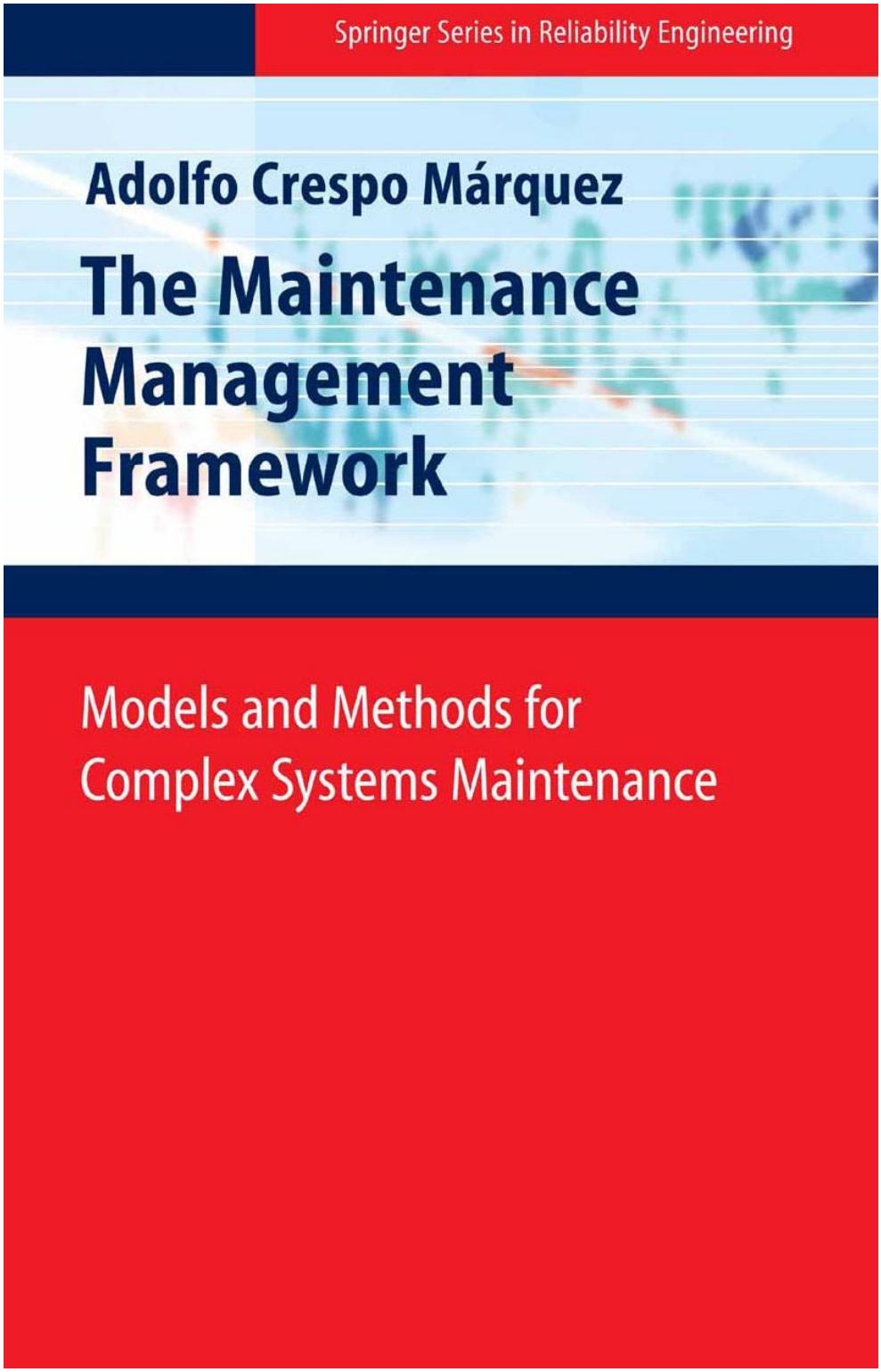
  This paper summarizes the process (the course of action and the series of stages or steps to follow) and the framework (the essential supporting structure and the basic system) needed to manage maintenance.

  A set of models and methods to improve maintenance management decision making is presented. Models are then classified according to their more suitable utilization within the maintenance management process.

  For further discussion of these topics the reader is addressed to a recent work of the author

APÉNDICE VI

- Colaborador en redacción del capítulo 16 del libro: "***The maintenance management framework. Models and methods for complex systems maintenance".*** Este capítulo forma parte de la tesis de doctorado. Autor del libro: Adolfo Crespo Márquez. **Libro editado por Springer, serie: Reliability Engineering, 2007, ISBN: 978-1-84628-820-3, Londres, *pp*. 273 – 293.**


Springer Series in Reliability Engineering
Adolfo Crespo Márquez
The Maintenance Management Framework
Models and Methods for Complex Systems Maintenance

Acknowledgements

The author wishes to thank specific people and institutions for providing their help during the year 2006, making the publication of this book possible.

Rafael Ruiz-Usano has been for many years the Head of the Research Group "Organización Industrial" at the School of Engineering of the University of Seville. Within this group, several colleagues have found an amicable and friendly working atmosphere where the area of maintenance management and engineering could develop. We all thank Rafael for his support and this book is dedicated to him.

Pedro Moreu de León has been a great help in many of the issues related to maintenance and maintenance management concepts. He is currently Chairman of the Committee for Maintenance Standardization (AEN/CTN 151 "Mantenimento") of AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), and Convenor of the European Working Group for Maintenance Management Standardization (CEN WG8/TC 319 "Maintenance") of CEN (Committee for European Standardization, Brussels).

Carlos Parra (from IngeCon, Venezuela) provided several case studies related to his consulting activities with organizations in different parts of the world. His support was especially valuable with material regarding Criticality Analysis, RCFA, RCM and LCCA. Carlos is a leading international expert in the field of Operational Reliability.

Marcelo Tardelli, from Heineken, provided extremely valuable input regarding the practical implementation of the maintenance concept, the assessment of critical equipment, the planning and improvement of preventive maintenance, and the set-up of TPM programs to optimize the organizational efficiency for maintenance. Marcelo is an extremely experienced and knowledgeable maintenance engineer, responsible for many maintenance improvement projects in his company in Europe.

Benoit Iung and Alexandre Muller from CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy, France) co-authored a recent review of e-maintenance, from where the contents of Chapter 18 were extracted. Benoit also led the edition of a special issue about e-maintenance for the journal *Computers in Industry*, which served as the main source for that review.

16

Failures Impact on Life Cycle Cost Analysis

16.1 Introduction

Life cycle costing is a well-established method used to evaluate alternative asset options. This methodology takes into account all the costs arising during the life cycle of the asset. These costs can be classified as the 'capital expenditure' (CAPEX) incurred when the asset is purchased and the 'operating expenditure' (OPEX) incurred throughout the asset's life.

In this chapter we explore different aspects related to the ´non reliability` cost within the life cycle cost analysis (LCCA), and we describe three basic models found in the literature (constant failures rate, deterministic failures rate and Weibull distribution failures rate) that include in their evaluation processes the quantification of the impact that could cause the diverse failure events in the total costs of a production asset. The chapter also contains a case study in which the above-mentioned concepts and models were applied to the life cycle cost assessment of a specific asset. Finally, we present a summary of results and discuss the limitations of the different models. The chapter concludes by presenting possible directions of future research work.

Product support and maintenance needs of systems are more or less decided during the design and manufacturing phase [1]. These decisions have a high impact in the total life cycle of the system, specially those related to the "reliability" factor (like for instance decisions related to the quality of the design, the selection of technology, the technical complexity, the costs of preventive/corrective maintenance or the maintainance levels and maintainability). Clearly, these aspects have a great influence on the possible expectations to extend the useful life of the production systems to reasonable costs (see, for instance, [1—3]).

Let us now highlight some of the most important milestones in the development of the LCCA methodology [4]:

- *1933*. The first reference of a "Life Cycle Analysis" carried out by one of the Federal Departments of the Government of the United States, the *General Accounting Office (GAO)*, appeared. The analysis was related to the purchase of machinery;

APÉNDICE VII

- Artículo a proponer: ***"NHPP (Non-Homogeneous Poisson Process), reliability model applied to evaluate the economic impact of failure in the life cycle cost analysis (LCCA). Case study the in oil industry".*** Autores: Carlos Parra Márquez y Adolfo Crespo Márquez. Journal propuesto: Reliability Engineering & System Safety, Editorial Elsevier (abstract).

Paper proposal:
Journal: Reliability Engineering & System Safety. Published by Elsevier in association with the European Safety and Reliability Association, and the Safety Engineering and Risk Analysis Division

Title:
NHPP (Non - Homogeneous Poisson Process), reliability model applied to evaluate the economic impact of the failure in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Case study in oil industry

Carlos Parra Márquez*, Adolfo Crespo Márquez**

Department Industrial Management School of Engineering of the University of Seville
*** Associate Professor, *PhD student of the Industrial Management Program at the School of Engineering of the University of Seville*

Abstract:
This paper aims to explore different aspects related with the failure costs (non reliability costs) within the life cycle cost analysis (LCCA) of a production asset. Life cycle costing is a well-established method used to evaluate alternative asset options. This methodology takes into account all costs arising during the life cycle of the asset. These costs can be classified as the 'capital expenditure' (CAPEX) incurred when the asset is purchased and the 'operating expenditure' (OPEX) incurred throughout the asset's life. In this paper we explore different aspects related with the "failure costs" within the life cycle cost analysis, and we describe the most important aspects of the model: Non-homogeneous Poisson Process (NHPP, Repairable systems). This model will be used to estimate the frequency of failures and the impact that could cause the diverse failures in the total costs of a production asset. The article also contains a case of study where we applied the above mentioned concepts in the oil industry. Finally, the model presented provide maintenance managers with a decision tool that optimizes the life cycle cost analysis of an asset and will increase the efficiency of the decision-making process related with the control of failures.

Keywords: *Asset; Failures; Life Cycle Cost Analysis (LCCA); Non-homogeneous Poisson Process (NHPP); Maintenance; Reliability; Repairable Systems*

1. INTRODUCTION

In the last years, the investigation area related with the Life cycle Costs Analysis, has continued its development, as much in the academic level as to the industrial level. It is important to mention the existence of other methodologies that have emerged in the area of LCCA, such as: Life cycle Costs Analysis and Environmental Impact, Total Costs Analysis of Production Assets, among other (Durairaj and Ong, 2002). These methodologies have their particular characteristics, although regarding the estimation process of the costs for failure events impact, they propose Reliability analysis usually based on rate of constant failures. The antecedents of the LCCA are shown next (Kirt and Dellisola, 1996):

- 1930, one of the first records that are known of the LCCA techniques is found in the book named *Principles of Engineering Economics by Eugene L. Grant*.
- 1933, the first reference of Life cycle Analysis by the Government of the United States shows up carried out by part of the federal department: *General Accounting Office (GAO)*, which is related to the purchase of a series of tractors.
- 1950, Lawrence D. Miles originated the concept of Value Engineering at *General Electric*, incorporating aspects related with the techniques of LCCA.
- 1960, Stone (1975) began to work in England, giving as a result in the decade of the 70's the publication of two of the biggest texts developed in Europe in relation to costs engineering.
- 1960, the *Logistics Management Institute* of the United States developed an investigation in the area of Obsolescence Engineering for the Ministry of Defense. The final result of this investigation was the publication of the first Life cycle Cost Manual in the year of 1970.
- 1972, the Ministry of Defense of the United States, promoted the development of a group of Manuals with the purpose of applying the LCCA Methodology, in all the Logistics areas.
- 1974, the Department of Energy of the United States, decided to develop its expansion and energy consumption plans supported by the analysis of Life cycle.
- 1975, the Federal Department of Supplies and Services of the United States developed a Logistics and Acquisition technique based on the LCCA.
- 1979, the Department of Energy introduced a proposal (44 FR 25366, April 30 1979) which intended that evaluations of LCCA were included in all the new constructions and mayor modifications in government facilities.
- 1980, the American Society for Testing and Materials (ASTM) developed a series of standards and database oriented to ease the search of necessary information for the application of the LCCA.
- 1992, two investigators of the University of Virginia, Wolter Fabrycky and B.S. Blanchard, developed a model