11° CONGRESO MEXICANO DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO

26 – 29 DE SEPTIEMBRE, 2016

"HOMENAJE A LOURIVAL TAVARES"

MEMORIAS DE LAS CONFERENCIAS

¡El foro en México que reune a los máximos exponentes de la confiabilidad en Latinoamérica!

PATROCINADO POR

Cu

International Copper Association Mexico

Copper Alliance

"EL COBRE LO HACE POSIBLE"

CONGRESO MEXICANO DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO

AMGA

ASOCIACIÓN MEXICANA DE PROFESIONALES EN GESTIÓN DE ACTIVOS A.C.

CONGRESO MEXICANO
DE CONFIABILIDAD
Y MANTENIMIENTO

IMPACTO DE LA CONFIABILIDAD EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS

AUTOR:

Ing. Carlos Parra

E-mail: parrac37@yahoo.com
Web: www.confiabilidadoperacional.com
Linkedin: www.linkedin.com/groups/4134220
Teléfono de contacto en Venezuela: 58-414-1080052

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.

1. INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de optimizar 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 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. ANTECEDENTES DE LAS TÉCNICAS DE ACCV

En los últimos años, el área de investigación relacionada con el Análisis de Costes en el Ciclo de Vida, 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. Un resumen de los antecedentes del ACCV es presentado a continuación (los antecedentes descritos en el periodo entre 1930 y 1985, fueron 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 dependencia federal: General Accounting Office (GAO), la cual está relacionada con la compra de una serie de tractores.
- Entre 1940 y 1950, Lawrence D. Miles originó el concepto de Ingeniería de Valor en la compañía General Electric, incorporando aspectos relacionados con las técnicas de ACCV.
- Entre 1955 y 1965, (Stone, 1975) comenzó a trabajar en el área de ACCV en Inglaterra, dando como resultado en la década del 70 la publicación de los dos mayores textos desarrollados en Europa en relación a la Ingeniería 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.
- Entre 1980 y 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, 1993), en el cual incluyen un proceso estructurado para calcular los costes por fiabilidad a partir de la estimación 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 detalles en (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 detalles en (Parra and Omaña, 2003).

3. ASPECTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE COSTES DEL CICLO DE VIDA (ACCV)

Para evaluar los costes asociados al Ciclo de Vida de un sistema de producción, existe un conjunto de procedimientos que se agrupan en las denominadas: Técnicas de Análisis de Costes del Ciclo de Vida (ACCV). 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 incuietud 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, el entrenamiento del personal, entre otros.

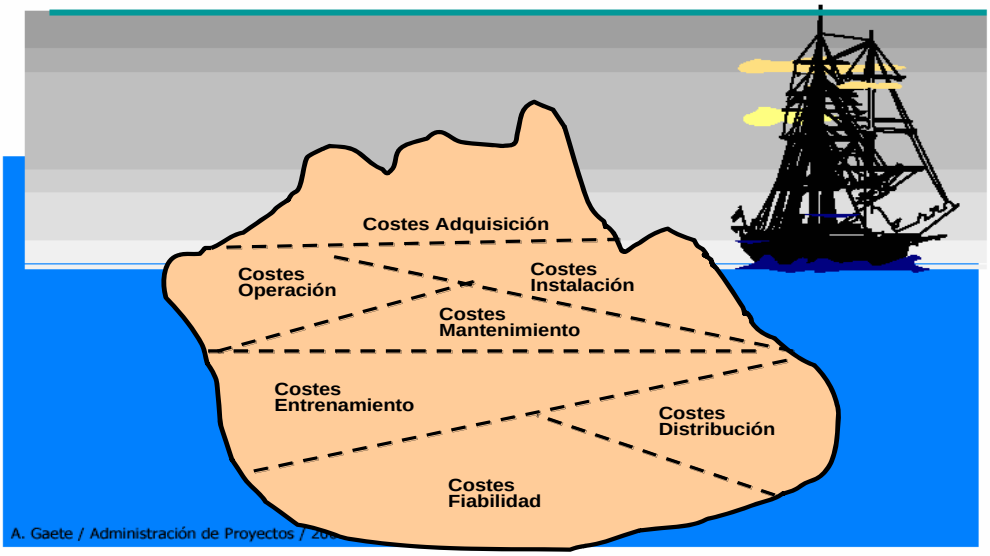

Figura 1: Incertidumbre en los Costes

En la figura 1 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. Algunos de ellos 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 SISTEMA DE PRODUCCIÓN

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 2.

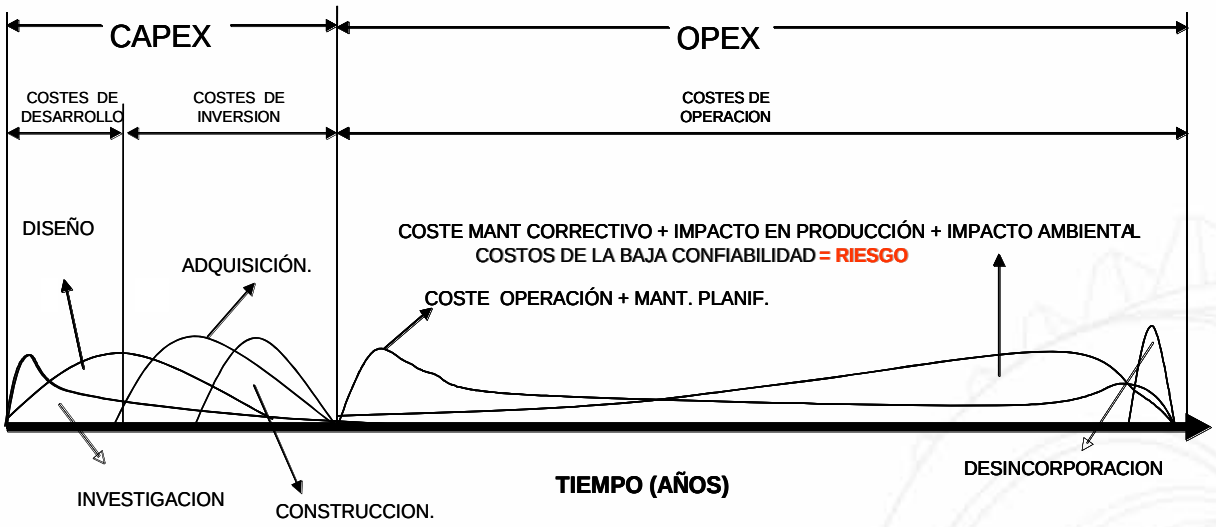

Figura 2: Estructura de Costes en el Ciclo de Vida de un activo

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, entrenamiento staff, manuales, documentación, herramientas e instalaciones para mantenimiento, repuestos de aseguramiento, desincorporación).
- **OPEX:** Costes operacionales: (mano de obra, operaciones, mantenimiento planificado, almacenamiento, contrataciones, mantenimiento correctivo - penalizaciones por eventos de fallos / baja Fiabilidad).

4. 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, 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) ver Figura 3.

Figura 3: Impacto de la Fiabilidad en los Costes

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 (TPEF):

$$TPEF = \sum \frac{tiempos \cdot operacionales}{número \cdot de \cdot fallos} \quad (1)$$

- Sistemas con TPEF cortos, reflejan valores de Fiabilidad bajos y un alto número de fallos.

El tiempo promedio para reparar (TPPR):

$$TPPR = \sum \frac{tiempos \cdot de \cdot reparación}{número \cdot de \cdot fallos} \quad (2)$$

- Sistemas con TPPR 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 4: Oportunidades de reducción de Costes

Fuente: Yañes, M., "Introducción a la Ingeniería de Confiabilidad", Curso de Adiestramiento, Petróleos de Venezuela, Caracas, 2001.

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. 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. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA FIABILIDAD EN EL PROCESOS DE ACCV – REVIVIÒN DE MODELOS BÁSICOS

El uso de las 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). 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 de evaluación del impacto del factor "Fiabilidad" en el ACCV de un activo:

5.1. MODELO DE TASA DE FALLOS COSNTANTE

En términos generales, el Modelo de Tasa de Fallos Constante propone el siguiente esquema para calcular el impacto de los costes de los fallos en el ACCV, ver detalles en (Woodward, 1997, Woodhouse, 1993 and 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 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.

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 a 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. 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:

$$\delta_f = \frac{N}{T} \qquad (3)$$

Dónde:

N = número total de fallos
T = número total esperado de años de vida útil

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 los Costes totales por fallos por año TCP_f y se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f=1}^{F} C_f \times \delta_f = \frac{\$}{año} \quad (4)$$

Dónde:
$f = 1...F$ tipos de fallos diferentes, F = número total de tipos de fallos
C_f = coste asociado al fallo f, en \$/fallo
δ_f = frecuencia del tipo de fallo f, expresada en fallos por año

5. Calcular los costes totales por fallo 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 el número de 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:

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

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.

5.2. MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINÍSTICO

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, 1993). 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 varían 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… F*, para *F* tipos de fallos.
2. Definir 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, se considera determinística, ya que la misma 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 repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.
4. Calcular los Costes por tipo de fallo por año $CP_f{}^t$.

$$CP_f{}^t = \delta_f{}^t \times C_f = \frac{\$}{año} \quad (6)$$

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

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

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

$$(P)TCP_f^t = \sum_{t=1}^{T} (P)CP_f^t \quad (8)$$

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

$$(A)ETC = (P)TCP_f^t \times \frac{i \times (+i)^T}{(+i)^T - 1} = \frac{\$}{año} \quad (9)$$

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.

5.3. 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, ver detalles en (Zohrul Kabil, 1987, Ebeling, 1997 and Willians and Scott,

2000). En relación al proceso de cuantificación de los costes por Fiablidad, 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…….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, ver en (Kececioglu, 1991) los Valores tabulados de la función Γ

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 es:

$$f(t_f) = \left(\beta \times {t_f}^{\beta-1}\right) \times e^{-\frac{t_f}{\alpha}^{\beta}} \text{, para } t_f \geq 0 \qquad (10)$$

La media μ es:

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

La varianza es:

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

En nuestro caso la variable aleatoria esta 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 la media μ.

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

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

$$\alpha = \exp\left(\frac{\frac{F}{\sum_{i=f}^{F} A_{fi}} - \left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi} \right) \right)}{\left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} - Ln\left(t_{fi} \right) \right) - \left(\sum_{i=f}^{F} A_{fi} \times Ln\left(t_{fi} \right) \right)} \right) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=f}^{F} A_{fi}}{\sum_{i=f}^{F} \frac{1}{Ln\left(t_{fi} \right)} - Ln\left(\quad \right)} \quad (15)$$

Dónde,

$$A_{fi} = \frac{Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1 - \frac{f}{F+1}} \right) \right)}{Ln\left(t_{fi} \right)} \quad (16)$$

En las expresiones 14, 15 y 16, *f* es el número del evento de fallo específico, *F* 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:

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \quad (17)$$

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:

$$TCPf = \sum_{f}^{F} \delta_f \times C_f = \frac{\$}{año} \quad (18)$$

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 $(P)TCP_f$. 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:

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

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.

6. CASO 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 de los historiales de fallos de un compresor de Gas de una compañía de extracción de gas en 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

6.1. 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:

- Definir los tipos de fallos.
  Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.
- Definir la frecuencia de fallos esperada por año δ_f , usar 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.

- 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.

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

- Calcular los Costes totales por fallos por año TCP_f , usar la expresión (4):

  $$TCP_f = 12.000 \frac{\$}{año}$$

- Calcular los costes totales por fallo en valor presente $(P)TCP_f$, usar la expresión (5) para un período T= 10 años y para una tasa de descuento i= 10%.

  $$(P)TCP_f = 73.734{,}80\$$$

6.2. CASO DE ESTUDIO – MODELO DE TASA DE FALLOS DETERMINÍSTICO

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

- Definir los tipos de fallos.
  Dónde $f = 1 \ldots F$ para F = 1 tipo de fallo.
- Definir 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 1 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

- 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.

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

- Calcular los Costes por tipo de fallo por año $CP_f{}^t$, usar 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

- Convertir a valor presente los costes por tipo de fallo por año $(P)CP_f{}^t$, usar 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
$(P)CP_f{}^t =$	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: \$

- Calcular los costes totales por tipos de fallos en valor presente $(P)TCP_f{}^t$, usar 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.

  $(P)TCP_f^t = 69.954{,}67\$$

- Calcular el coste total equivalente anual *(A)ETC*, usar la expresión (9). Dado un valor presente $(P)TCP_f{}^t$, calcular 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%.

  $(A)ETC = 11.335{,}977 \frac{\$}{año}$

6.3. 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:

- Definir los tipos de fallos.
  Dónde $f = 1 \ldots F$ para $F = 1$ tipo de fallo.
- Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados t_f, ver tabla 1.
- 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.

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

- Determinar de forma probabilística la frecuencia de fallos esperados δ_f con la Distribución de Weibull, usar las expresiones (13, 14, 15, 16 y 17).

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

α = 5,3964 mes / fallos
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

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

- Calcular los costes totales por Fiabilidad por año TCP_f, usar 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.

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

$$(P)TCP_f = 76.991{,}426\$$$

6.4. LIMITACIONES DE LOS MODELOS EVALUADOS

Un sumario de los resultados obtenidos a partir de los tres modelos evaluados, es mostrado en la tabla 5, al mismo tiempo, las limitaciones encontradas en cada modelo en relación al proceso de estimación del impacto de la Fiabilidad en el ACCV, son presentadas en la tabla 6.

Resultados por Modelo del impacto de los costes por fallos	Consideraciones
Tasa de Fallos Constante: Costes totales por fallos en valor presente: $(P)TCP_f = 73.734,80\$$	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 va a cambiar 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 Determinístico: Coste total equivalente anual por fallos: $(A)ETC = 11.335,98\frac{\$}{año}$	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: $(P)TCP_f = 76.991,42\$$	La interpretación de este valor es similar a 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: 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 Determinístico:** 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	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,

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.	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

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.
- 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. (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.
- Bloch-Mercier, S. (2000). Stationary availability of a semi-Markov system with random maintenance. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 16, 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, 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.
- 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, Issue 4, 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, 19-33.
- 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, March/April. p. 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, 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.
- 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.
- 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. p. 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. 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.
- 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.
- 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 motocompresores de gas para extracción del petróleo. Congreso Mundial de Mantenimiento, Colombia, 2-10.
- 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.
- 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.
- Tejms, H.C. (1986). Stochastic Modelling and Analysis. Wiley.
- Willians, D., Scott R. (2000). Reliability and Life Cycle Costs. RM-Reliability Group, Technical Paper, Texas, November.
- 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.
- 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.

Autor principal: Parra, Carlos. PhD. MSc. Eng.
Email: parrac37@yahoo.com
https://app.box.com/s/eqr9da0tg4tseo86olj6j8p7jjogxybt
www.confiabilidadoperacional.com
Grupo de investigación: http://taylor.us.es/sim/index.php