

APROXIMACIÓN AL REEMPLAZO DE EQUIPO INDUSTRIAL

RESUMEN

En este artículo se ilustran algunos modelos que intentan determinar el momento óptimo para reemplazo de equipo industrial, sus virtudes y sus defectos. Se presenta también un recorrido por la investigación de operaciones (I.O.) en el que se puede observar cómo han sido utilizadas algunas de sus técnicas para dar solución al problema del reemplazo y se dejan abiertas discusiones acerca de la aplicabilidad de otras.

PALABRAS CLAVE: Reemplazo de equipos, investigación de operaciones.

ABSTRACT

In this paper some models that try to determine the best moment for industrial equipment replacement, their virtues and their defects, are illustrated. It is also presented a journey by the operation research (O.R.) in which you can observe how some of the O.R.'s techniques has been used to give solution to the replacement's problem, this paper also want to leave open some discussions about the applicability of other O.R.'s tools.

KEYWORDS: *Equipment replacement, operation research.*

AMANDA VIVEROS FOLLECO

Ingeniera Industrial
Universidad Nacional de Colombia.
Sede Manizales.
kaloalu@hotmail.com

GUILLERMO A. GONZÁLEZ V.

Ingeniero Industrial
Universidad Nacional de Colombia.
Sede Manizales.
ingguillego@hotmail.com

RODOLFO RODRÍGUEZ B.

Ingeniero Mecánico, MsC
Universidad Nacional de Colombia.
Sede Manizales.
rrodrigu@nevado.manizales.unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia y en muchos otros países en desarrollo el tema de estudiar y decidir la compra o la construcción de equipos y de establecer un programa de operaciones para estos se resuelve, en la práctica, mediante conjeturas intuitivas o basadas en los antecedentes rutinarios, la experiencia de años, o en suposiciones más o menos fundadas en consideraciones puramente cualitativas e intuitivas [1]. La tendencia general de los propietarios es efectuar los reemplazos en función de una serie de circunstancias que la mayoría de veces nada tienen que ver con un apropiado análisis que combine aspectos técnicos y económicos. Entre estas circunstancias se encuentran la iniciación de nuevos trabajos, las oportunidades que se presentan en el mercado de los equipos y el tener capital extra disponible.

Teniendo en cuenta el panorama reciente de la empresa manufacturera colombiana, la escasez de los recursos disponibles para inversión y la importancia de los equipos dentro de las finanzas de las empresas (lo que se demuestra con datos del DANE [2] participación promedio de 59% de la maquinaria y equipo, en el rubro TOTAL ACTIVOS y graves problemas de desinversión desde 1997 en inversión neta y específicamente en maquinaria y equipo), se hace innegable la importancia de acercarse a la realidad del reemplazo de equipos, por lo que con el presente documento se pretende dar a conocer algunos de los modelos que facilitan la toma de la decisión del momento óptimo para reemplazar equipo industrial. Es así que se presenta un análisis crítico de la evolución de los modelos de reemplazo existentes y las técnicas de investigación de

operaciones aplicables a la solución del problema de reemplazo de equipos.

2. POR QUE REEMPLAZAR EQUIPO INDUSTRIAL?

En la medida en que los equipos son operados estos envejecen, fallan por diversas causas y generan paros de tal forma que estos deben ser sometidos a ciertas actividades de mantenimiento, de modo que a los costos usuales de operación se suman los costos de mantenimiento disminuyendo los beneficios [3] y, aunque la misión del mantenimiento es la de conservar los equipos en la mejor forma posible, muchas fuerzas se oponen a este empeño, de tal modo que tarde o temprano el equipo pierde por completo las condiciones técnicas que lo habilitan para prestar determinado servicio [4].

Desde luego y en primer lugar se debe reconocer que el equipo tiene una vida útil específica; entendiendo como vida útil el período de tiempo durante el cual un determinado equipo presta el servicio para el cual fue diseñado, manteniendo su integridad estructural [5]; en el curso del cual y prestando servicio, el equipo envejece y va paulatinamente perdiendo su valor inicial hasta llegar al fin de la vida útil, a tener sólo un valor residual muy menguado y casi de desecho [4]. Este espacio temporal (vida útil) depende de factores múltiples y complejos, tales como fallas de fabricación, condiciones de trabajo, mantenimiento, pericia y cuidado de los operadores, etc. Normalmente, los fabricantes sugieren valores de la vida útil de los equipos, los cuales son el resultado de estudios estadísticos desarrollados para condiciones ideales con estándares norteamericanos o europeos [6], sin embargo, las

condiciones locales, que podrán tener carácter circunstancial o más o menos permanente, son las que en realidad determinan la vida útil del equipo. Estas características se relacionan con su empleo, el que implica un ritmo mayor o menor de desgaste [5].

En general, los equipos industriales durante los periodos de utilización, sufren desgaste en sus diversas partes y mecanismos, por lo cual es necesario repararlos o sustituirlos para que el equipo pueda seguir trabajando. Sin embargo, con el transcurso del tiempo es tal el deterioro de una máquina, que en vez de constituir para el propietario un bien de producción, se convierte en un gravamen. Por otra parte, las cada vez más frecuentes averías aumentan los tiempos muertos o improductivos, y llegan incluso a afectar la productividad de otros equipos que trabajan conjuntamente con ellos. Además, con el tiempo el equipo se va volviendo obsoleto, por lo cual su propietario queda en desventaja frente a otros competidores que poseen equipos más modernos y eficientes [6]. Es preciso destacar que llega siempre un momento en que es técnica y tecnológicamente necesario, o económicamente preferible, no prolongar más el funcionamiento de un equipo sino desecharlo definitivamente, para no caer en un costo que puede ser exagerado si se mantiene excesivamente, tratando de lograr el funcionamiento indefinido de un equipo [7,8,9].

Al decir de Figuera *et al* [8], los equipos industriales se deben retirar del servicio por causas que pueden agruparse en dos grandes grupos, a saber:

2.1 Razones Técnicas:

- Destrucción Física.
- Imposibilidad de seguir prestando un nivel de servicio adecuado.

2.2 Razones Económicas: Éstas comprometen la competitividad del equipo. Con el tiempo se produce una degradación del rendimiento económico por necesidad de más mantenimiento, aumento de consumo de energía, incremento en productos defectuosos, llamándose a esto envejecimiento.

- Envejecimiento: Se evidencia cuando es preciso gastar cada vez más, obteniendo una disponibilidad y calidad cada vez menores.
- Obsolescencia: Se evidencia por la evolución del contexto socioeconómico y especialmente el progreso tecnológico en el cual se desarrollan las actividades de la empresa. Un equipo industrial se debe retirar del servicio por obsolescencia cuando se agotan las materias primas que procesa o aparecen otras a partir de las cuales se pueden obtener mejores condiciones; cuando los productos que manufactura caen en desuso o cuando aparecen mejores equipos.

Lo anterior evidencia la necesidad de determinar en cada caso particular el tiempo en que operar determinado equipo

es técnicamente eficiente y económicamente factible permitiendo maximizar los beneficios para el propietario.

3. CÓMO DETERMINAR EL MEJOR MOMENTO PARA EFECTUAR EL REEMPLAZO?

El análisis científico de los problemas de renovación además de contribuir a un mejor conocimiento y previsión de los costos y las necesidades de capital, busca proveer información referente al momento oportuno para llevar a cabo el reemplazo, momento en el cual el equipo deja de prestar un trabajo eficiente y económico. Por tanto es necesario que cada sistema productivo tome decisiones adecuadas en cuanto a la sustitución de sus equipos; algunas de las primeras conclusiones al respecto son las citadas por Selivanov [7], afirmaciones sencillas sin sustento teórico, realizadas por A. S. Konson, Yu. N. Artemiev, N. S. Raibman y otros (s/f); los cuales concuerdan en que el plazo óptimo de servicio de las máquinas es aquel en el que el costo de la reparación ordinaria se aproxima al costo de una máquina nueva. Esta deducción tiene una demostración lógica que consiste en que es más ventajoso gastar los recursos no en la reparación de una máquina vieja, sino en la adquisición de una nueva; sin embargo esta deducción no se puede considerar puramente científica ya que no se analiza la eficacia de la utilización de los recursos para la adquisición y el mantenimiento de la capacidad de trabajo de la máquina vieja [7].

3.1. Modelos De Reemplazo

En la literatura existen diversos modelos que pretenden resolver la incógnita del momento óptimo de reemplazo, abordando el problema desde diferentes perspectivas y bajo diferentes ambientes, algunos con un rigor teórico-práctico mayor que otros, en la teoría se encuentra documentación a partir de 1933, año en el que Aktuar Tidskr Skand publicó "Industrial Replacement" [10]. Los estudios de reemplazo pueden ser clasificados según sus características en tres grandes grupos: los que realizan comparaciones antiguo-nuevo, los modelos de optimización y por último los modelos de límite.

3.1.1 Los modelos que utilizan comparación antiguo-nuevo, determinan el momento de reemplazo a través de un balance entre el equipo en uso y el equipo nuevo que lo reemplazaría, basados en las ventajas económicas de operar uno u otro. La comparación se realiza generalmente sobre datos a priori estimados por el decisor.

El modelo MAPI propuesto por Terborgh en 1946, es el primero encontrado en éste grupo y es la base de muchos otros, su objetivo es la correcta valoración de sustituir o no maquinaria, comparando la suma de los costos totales de la inferioridad operativa y el capital para la máquina actual y aquellos correspondientes a una máquina nueva, con inferioridad operativa se hace referencia a la diferencia de prestación de servicio de una máquina respecto a otra [11].

Posteriormente Churchman *et al* [10] plantean en 1971 el cálculo del periodo que representa la vida útil óptima de un equipo nuevo, donde se minimiza el Valor Presente Neto (VPN) de sus costos de mantenimiento. Éste VPN sirve como parámetro para determinar el momento de reemplazo del equipo en uso, lo cual sucede cuando sus costos de operación y mantenimiento superan el VPN calculado, ésta propuesta es acogida por Prawda en 1980 [12] y por Sasieni *et al* en 1982 [13] quienes formulan un modelo de valor presente del gasto que usa el mismo principio de Churchman, diferenciándose básicamente en su formulación matemática y la información usada o dejada de usar.

También aparecen en la literatura propuestas de algunos autores quienes pretenden plantear diferentes metodologías que pueden incluirse en el grupo de los modelos de comparación antiguo-nuevo o en los de optimización, este es el caso de Baca [9] que plantea sobre bases similares, dos métodos formulados a través de ingeniería económica para determinar el momento óptimo de reemplazo: periodo óptimo de reemplazo (calcular el costo anual uniforme equivalente del equipo (CAUE) y seleccionar el número de años para el cual el costo es mínimo), y confrontación antiguo-nuevo (se calcula el CAUE para el equipo antiguo y para el equipo nuevo y se toma la decisión de reemplazo frente a la confrontación de los datos; escogiendo el de menor CAUE), estos modelos son acogidos y aplicados en 2002 por Gómez [3].

Los métodos de comparación antiguo-nuevo presentan ventajas cuando hay escasez de información y la decisión de reemplazo debe tomarse bajo análisis de costos supuestos y datos determinados según la experiencia del decisor, sin embargo la comparación de la máquina actual con una máquina nueva representa una falencia en este tipo de modelos, ya que, en primer lugar la selección del equipo nuevo debería estar sometida a un proceso de gestión tecnológica adecuado, lo cual implica disponer de los procesos de gestión para su identificación, evaluación y selección [14], lo que involucra inversión de recursos (tiempo y dinero) que no se tienen en cuenta. En segundo lugar, los costos de operación del nuevo equipo deben predecirse en el momento de hacer el análisis de reemplazo, basándose tal vez, en datos ofrecidos por el fabricante, el cual supone condiciones ideales para el funcionamiento del equipo, o bien, en comportamientos de equipos similares, ignorándose los posibles errores de dichas predicciones.

3.1.2 Los modelos de optimización, buscan encontrar un valor óptimo para una función predeterminada ya sea el mínimo para funciones de costos o gastos asociados con la utilización del equipo, o el máximo para funciones de rentabilidad o utilidad esperada por la operación del equipo.

En éste grupo, iniciando una secuencia cronológica, se encuentra el modelo para la determinación de los plazos de servicio de las máquinas presentado por Selivanov en 1971 [7], el cual propone una solución analítica general al

problema, encontrando un equivalente monetario a los indicios técnicos y tecnológicos, con los cuales se pretende agrupar toda inversión de dinero o pérdida de oportunidad que se genera al utilizar un equipo, con base en éstos se decide reemplazar en el momento en que se minimice el valor de los gastos y pérdidas específicos ligados con la utilización del equipo y referidos a la unidad de trabajo cumplido.

El siguiente modelo encontrado aparece en 1990 y es el propuesto por Espinoza [4] quien plantea que el reemplazo de un equipo debe surgir del cruce histórico de la mantención excesiva y del valor decreciente del equipo, considerando factores de ocurrencia propia de la situación específica del equipo, agrupados en: obsolescencia, inadecuación e ineficiencia.

El primer modelo colombiano consultado es el que presenta el profesor Mira en 1994 [15] en el que se propone un criterio de optimización para determinar *a priori* la vida de un equipo, basado en el cálculo del número de años de uso que conduce a un costo anual equivalente mínimo del equipo, buscando tomar decisiones en un horizonte de planeación amplio, para el que se requiere más de una renovación para obtener una política de reposición global si no óptima, pues se desconocen las opciones futuras, sí razonable, u óptima en relación con la información disponible. Cuatro años más tarde se publica también en Colombia el modelo de los costos promedios acumulados propuesto por Cantillo [6] y consiste en registrar anualmente los costos fijos, variables y los costos por maquinaria parada, y efectuar el reemplazo cuando el costo medio anual acumulado sea un mínimo, equivalente al óptimo en la toma de decisión de reemplazo. Estos dos modelos difieren ampliamente en su complejidad y robustez, el primero posee una gran riqueza matemática que puede en determinados casos dificultar su aplicación, contrastando con la sencillez del segundo, sencillez que incentiva su aplicación.

Posteriormente Abarca y Alvarado [5] proponen en 2000 un método de cálculo de vida útil técnica del equipo (VUT); entendida como el periodo de tiempo durante el cual un determinado bien o componente presta el servicio para el cual fue diseñado, manteniendo su integridad estructural, el procedimiento para calcular VUT consiste en efectuar una inspección del bien en estudio, determinar las cargas de servicio que actúan sobre éste, identificando el régimen de trabajo y posteriormente efectuando cálculos y determinaciones sobre el proceso de envejecimiento controlado por algún fenómeno cuya evolución temporal es conocida.

Finalizando el recorrido cronológico a través de los modelos de optimización aparece en Colombia, lo que a juicio de los autores es el modelo que permite tomar la mejor decisión de reemplazo por el gran acercamiento a la realidad que pretende lograr y por la gran cantidad de factores que tiene en cuenta, es así que Poveda [1,16]

formula un modelo matemático que establece aspectos de la operación del equipo, de tipo cuantitativo, en forma de funciones algebraicas de variables reales, en busca del periodo de tiempo en que se obtiene la mayor rentabilidad promedio anual y descontada del equipo.

Estos modelos presentan una ventaja fundamental frente a los anteriores ya que permiten tomar decisiones con base en las potencialidades, eficiencias y resultados económicos del equipo actual, es decir, tienden a la optimización del servicio del equipo en cuestión, adicionalmente se facilita la toma de una decisión que involucra solo el análisis del equipo en uso, lo que disminuye la incertidumbre que implica el cálculo de valores futuros para equipos nuevos y evita la gestión de tecnología necesaria que la selección de éstos implica.

3.1.3 Los modelos de límite, plantean encontrar el instante de tiempo en el cual se alcanza un parámetro previamente establecido, estos son: modelo de renovación de equipos en grupo [8] y modelo de los costos acumulados de mantenimiento [17], los cuales son resueltos a través de programación dinámica.

De éste recorrido bibliográfico se puede concluir que los modelos existentes plantean la decisión de reemplazo en términos de variables netamente económicas, ya sea por que no se reconoce la importancia de la inclusión de otro tipo de variables, por la imposibilidad de establecer escalas comparativas entre ellas ó por que se terminan expresando en términos económicos que aumentan la incertidumbre del modelo y por ende de la decisión final.

3.2. LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN EL REEMPLAZO DE EQUIPOS

La Investigación de Operaciones (I.O), disciplina que utiliza técnicas analíticas avanzadas para tomar decisiones sólidas y resolver problemas complejos, usa un enfoque similar a la manera en que se lleva a cabo la investigación en los campos científicos establecidos, este proceso posee una característica especial que coloca a la I.O. en un lugar privilegiado dentro del conjunto de herramientas disponibles para la toma de decisiones: su amplio punto de vista, generalmente de tipo organizacional, con lo cual intenta resolver los conflictos de intereses entre los componentes de la organización optimizando matemáticamente el beneficio de las decisiones de forma que el resultado sea el mejor posible para la organización completa. Teniendo en cuenta lo anterior es importante estudiar el impacto que puedan tener las herramientas de la I.O. en el cálculo del momento oportuno para reemplazo de equipo industrial.

Es importante resaltar aquellas herramientas que han sido utilizadas, en la literatura consultada, como metodologías de solución para el problema de reemplazo, la programación entera [18], la optimización de redes [12], la programación dinámica [19,8,17], los árboles de decisión [20] y los procesos de decisión markovianos [21], usan un

enfoque similar, en el cual se plantea la necesidad de tomar decisiones respecto a periodos de tiempo o nodos que representan las etapas constitutivas del horizonte de planeación, se plantean criterios típicamente económicos que pueden cambiar de enfoque según el decisor (costos/gastos o utilidad), incluyendo solo variables técnicas en los casos en que se tienen en cuenta la probabilidad de ocurrencia de fallo (árboles de decisión y procesos de decisión markovianos).

La aplicación de otras técnicas se ve condicionada a la información disponible, la cantidad de recursos que se esté dispuesto a invertir (tiempo y dinero) y la calidad de los resultados que se esperen, teniendo en cuenta lo anterior se realiza un acercamiento a otras técnicas de la I.O. Al estudiar la aplicabilidad de la programación lineal como herramienta fundamental se encuentra la imposibilidad de lograr un acercamiento adecuado a la realidad mediante la formulación del modelo ya que los supuestos que deben ser cumplidos [21] esencialmente el de linealidad impiden realizar una formulación con la que se describa la realidad en la que se desenvuelve el equipo estudiado.

Así mismo, en el problema de reemplazo, el análisis de decisiones puede ser utilizado para tomar decisiones inicialmente de corto plazo, logrando la inclusión de parámetros de comportamiento técnico; en ellas, el problema podría ser planteado teniendo en cuenta los estados de la naturaleza fallo y funcionamiento, las acciones posibles reemplazar y mantener y los pagos relacionados con la combinación de éstas, los cuales podrían definirse, de la siguiente manera, el reemplazo en condiciones de fallo como el costo de reemplazar, en condiciones de funcionamiento como el costo de reemplazar, mas la pérdida de oportunidad del dinero, el mantener en condiciones de funcionamiento como cero (debido a que solo se incurriría en los costos de operación típicos), y en condiciones de fallo como los costos de un reemplazo de emergencia; la formulación quedaría entonces así (Tabla 1):

Alternativas	Estados de la naturaleza	
	Fallo	Funcionamiento
Reemplazar	\$xxx	\$xxx
Reparar	\$xxx	\$xxx
Mantener igual	\$xxx	\$xxx
Probabilidad	p	$1-p$

Tabla 1. Formulación general del problema de reemplazo desde el punto de vista del análisis de decisiones. Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de ocurrencia de cada estado de la naturaleza puede ser obtenida de forma *a priori* (sin experimentación), o de forma *a posteriori*, es decir con experimentación a costa de un valor adicional, esta experimentación podría lograrse a través de alguna metodología de mantenimiento predictivo con la cual se pudiera conocer con cierto nivel de certeza el estado actual

del equipo y con base en éste pronosticar su estado futuro; sobre estas bases se podría establecer una política óptima de reemplazo según el criterio que escoja el decisor: criterio del pago máximo o criterio de la máxima posibilidad, o bien, el máximo valor esperado del pago (regla de decisión de Bayes). Esta metodología puede ser una buena respuesta ante las necesidades de toma de decisiones de corto plazo, y apoyada en la herramientas de mantenimiento predictivo pueden permitir acercarse a una decisión bastante acertada y se deja en manos del lector interesado la posibilidad de profundizar en el tema y lograr una formulación mas detallada, sin embargo, generalmente las decisiones de reemplazo deben tomarse en horizontes de planeación de mayor longitud.

Otra de las herramientas de la investigación de operaciones que vale la pena tener en cuenta es la simulación, con la que es posible suplir las deficiencias de todas las demás herramientas de la investigación de operaciones. La simulación es, según Marrero *et al* [22], una de las técnicas más potentes en el estudio de sistemas, y se puede definir básicamente como una técnica que trata de imitar el comportamiento de los diferentes fenómenos en una realidad artificial. Aunque la simulación podría convertirse en la metodología más poderosa en la solución del problema de reemplazo de equipos, ésta es difícilmente aplicable por lo costosa que resulta su aplicación, el tiempo que requiere y los exhaustivos análisis de campo requeridos, los cuales se ven dificultados por el poco interés que el reemplazo de equipos suscita en el entorno nacional y por la escasa o casi nula información histórica con la que es posible contar en la empresas colombianas, sobre la cual debería realizarse el estudio del comportamiento de las variables necesarias para describir el sistema.

Según el recorrido presentado de las técnicas de I.O. que han sido típicamente utilizadas en el reemplazo de equipos y aquellas que no han sido utilizadas (dentro de la literatura consultada), es importante notar la dificultad que se presenta para realizar análisis de reemplazo que permitan incluir de manera explícita diferentes parámetros de relevancia en la toma de la correcta decisión de cuando reemplazar, frente a esto nace la posibilidad de utilizar las técnicas multicriterio como única herramienta de la investigación de operaciones que permite solucionar el problema de incompatibilidad entre variables de decisión que manejan diferentes unidades de medida, facilitando el uso de diferentes criterios, los cuales pueden ser ponderados según las preferencias del decisor, así mismo estos criterios pueden ser representados con funciones no lineales, lo que facilita la descripción del comportamiento real de un equipo.

3.3. OTRAS CONSIDERACIONES

Para complementar el estudio referente al reemplazo de equipo industrial es importante analizar elementos complementarios que pueden afectar de forma positiva la validez y credibilidad del resultado obtenido tras aplicar alguno de los modelos revisados.

En 1994 Walker [23] publicó un artículo en el que se da a conocer un *software* creado en *Visual Basic* con plataforma *Windows* en el cual es posible graficar la vida económica de la maquinaria, base sobre la cual se hace una comparación con maquinaria nueva y se toma la decisión de reemplazo, la vida económica se grafica en función del tiempo, teniendo en cuenta los costos de mantener el equipo funcionando y el valor de reventa; sin embargo, la novedad del aporte, radica en la inclusión del análisis de sensibilidad en la toma de la decisión de reemplazo, con lo que Walker se convierte en el primer autor que hace explícito este análisis en el estudio de reemplazo; el artículo es insuficiente en la explicación de la metodología utilizada y sólo se hace referencia a la posibilidad que brinda el programa de apreciar comportamientos alternativos de la gráfica de vida económica y con base en éstos, observar la variabilidad de la curva y realizar análisis de sensibilidad. Años más tarde, Baca [9] incluye en el capítulo de reemplazo de su libro *Ingeniería Económica*, una sección compuesta de dos breves párrafos que hace referencia al análisis de sensibilidad y su importancia, residente en el elemento de incertidumbre asociado a cualquier análisis económico proyectado al futuro, Baca es claro al afirmar que en un proyecto individual el análisis de sensibilidad debe hacerse con respecto al parámetro más incierto.

En Octubre de 1999, en la Universidad Estatal de Louisiana, se presentó, por parte del Doctor Thomas G. Ray [24], un desarrollo tendiente a facilitar el reemplazo óptimo de equipos, cuyo único objetivo aparente es poner en evidencia ciertas consideraciones sin las cuales cualquier decisión tomada carece de validez práctica. Ray es claro, al poner en evidencia la irrealidad de un modelo planteado sobre un ambiente que no tiene en cuenta la inflación, en el cual probablemente las variables de decisión pueden estar ilustrando una falsa realidad y por tanto facilitando la toma de decisiones erradas. Ray también anota la inutilidad de una decisión de reemplazo tomada sobre la incertidumbre de los recursos disponibles para la adquisición del nuevo equipo, por lo que recomienda incluir en el análisis de reemplazo una presupuestación de recursos y una concienzuda priorización de los mismos.

4. CONCLUSIONES

–Los modelos de reemplazo consultados toman la decisión sobre una base netamente económica sin incluir de forma explícita variables de tipo técnico y tecnológico que describan el comportamiento real del equipo, ya sea por que no se reconoce la importancia de la inclusión de otro tipo de variables, por la imposibilidad de establecer escalas comparativas entre ellas, o porque se terminan expresando en términos económicos que aumentan la incertidumbre del modelo; negando la posibilidad de tener una visión holística de las condiciones en las que opera el mismo.

–Existen técnicas de investigación de operaciones que pueden ser aplicadas en la solución del problema de reemplazo de equipos y que hasta el momento no han sido

utilizadas, éstas son la programación no lineal, el análisis de decisiones y las técnicas multicriterio.

–Las técnicas multicriterio son la herramienta de la investigación de operaciones que permite solucionar el problema de incompatibilidad entre variables de decisión que manejan diferentes unidades de medida, facilitando el uso de diferentes criterios, los cuales pueden ser ponderados según las preferencias del decisor.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] POVEDA, Gabriel. Óptimo económico de máquinas y equipos. En: Revista facultad de ingeniería. N° 27; p. 151. Universidad de Antioquia. Medellín, 2002.
- [2] DANE. Encuesta anual manufacturera DANE. Año 1995/1996/1997/1999/2000.
- [3] GÓMEZ, Giovanni. Análisis de reemplazo de activos físicos. En: Revista de ingeniería de planta. N° 41. Chile, 2002. Disponible en: <www.gestiopolis.com/canales/financiera/articulos/17/caue.htm>.
- [4] ESPINOZA, Julio. Reemplazo de equipos: un enfoque de mantenimiento. En: Revista Mantenimiento, N° 1. CIUDAD, 1990. Disponible en: <http://www.servic.cl/art_rm/rev.html/rev01/rev1art3.html>.
- [5] ABARCA, Roberto y ALVARADO, Mauricio. Análisis de vida útil de equipos y bienes de capital. Universidad Central de Chile, 2000.
- [6] CANTILLO, Víctor. Reemplazo económico de los equipos. En: Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte. N° 3/4; p. 58. Barranquilla, 1998.
- [7] SELIVANOV, I.A. Fundamentos de la teoría del envejecimiento de los equipos. Moscú: Editorial Mir, 1972.
- [8] FIGUERA, Juan y FIGUERA, Juan Ramón. Renovación de equipos industriales. Barcelona: Editorial Hispanoeuropea, 1979.
- [9] BACA, Guillermo. Ingeniería económica. Sexta edición. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 2000.
- [10] CHURCHMAN, West; ACKOFF, Russell y ARNOFF, Leonard. Introducción a la investigación operativa. Madrid: Aguilar S.A. Ediciones, 1971.
- [11] GARCÍA, Mauricio. El método MAPI como criterio para la sustitución de maquinaria. En: IIT Tecnología. Instituto de investigaciones tecnológicas. Vol XI, año XI, N°6. Santafe de Bogotá, Sept – Oct, 1969.
- [12] PRAWDA, Juan. Métodos y modelos de investigación de operaciones. Vol. 1/2. México D.F.: Editorial Limusa, 1981.
- [13] SASIENI, Maurice; YASPAN, Arthur y FRIEDMAN, Lawrence. Investigación de operaciones: métodos y problemas. México D.F.: Editorial Limusa, 1982.
- [14] PAT. Plan de Actuación Tecnológica: Gestión de la tecnología. 2003. Disponible en: <<http://www.getec.etsit.upm.es/docencia/gtecnologia/gtecnologia.htm>>.
- [15] MIRA, Luis. Tiempo óptimo de reposición por obsolescencia del equipo. En: Memos de investigación. Universidad de los Andes. Santa fé de Bogotá: N° 147. Bogotá, 1994.
- [16] POVEDA, Gabriel. Óptimo económico de máquinas y equipos. En: Revista facultad de ingeniería N° 28; 115. Universidad de Antioquia. Medellín, 2003.
- [17] BEICHEL, Frank. A replacement policy based on limiting the cumulative maintenance cost. En: The International Journal of Quality & Reliability Management. Tomo 18, N° 1; p. 76. 2001. Disponible en: <<http://gateway.proquest.com>>.
- [18] CORTÉS, Manuel y CURBEIRA, Domingo. La programación lineal aplicada a la reposición y el mantenimiento. Cienfuegos (Cuba), 2002. Universidad de Cienfuegos. Disponible en: <www.ucf.edu.cu/publicaciones/anuario2002/tecnicas/articulo14.pdf>.
- [19] HARTMAN, Joseph. An economic replacement model with probabilistic asset utilization. En: IIE Transactions. Tomo 33, N° 9; p. 717. 2001. Disponible en: <<http://gateway.proquest.com>>.
- [20] BALDIN, Asturio; FURLANETTO, Luciano; ROVERSI, Antonio y TURCO, Francesco. Manual de mantenimiento de instalaciones industriales. Barcelona: Editorial Gustavo Gil, 1982.
- [21] HILLIER, Frederick y LIEBERMAN, Gerald. Investigación de operaciones. Séptima edición. México D.F.: Editorial Mc. Graw Hill, 2001.
- [22] MARRERO, Fernando y ABREU, René. Simulación de sistemas. Manizales, 2001. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- [23] WALKER, John. Graphical analysis for machine replacement: A case study. En: International Journal of Operations & Production Management. Tomo 14, N° 10; p. 54. 1994. Disponible en: <<http://gateway.proquest.com>>.
- [24] RAY, Thomas. Development of an Approach to Facilitate Optimal Equipment Replacement. En: Summary of Report 329, 1999. Louisiana State University. Disponible en: <www.ltrc.lsu.edu/pdf/techsumm329.pdf>.