

REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPO INDUSTRIAL: UNA APLICACIÓN MULTICRITERIO

RESUMEN

Uno de los problemas principales en la gestión de operaciones empresariales, se centra en la planificación adecuada del reemplazo de equipos, no solo por su impacto en los costos de operación, sino también, por sus efectos en el nivel de servicio al proceso productivo. Por tal razón, el presente artículo, expone la construcción de un modelo matemático no lineal basado en el uso de técnicas multicriterio y métodos de expertos. Se presentan los resultados de su aplicación en una empresa del sector azucarero.

PALABRAS CLAVES: Indicador Integral de Reemplazo, Modelación Matemática.

ABSTRACT

One of the main problems in the operations management, is the adequate planning of machine replacement, not only by its impact in the operation costs, but also, by its effects in the service level to the production process. For such reason, the present article shows the construction of a not lineal mathematical model based on the use of multicriteria techniques and experts methods. The results of its application in the economic sector of sugar factories are presented.

KEY WORDS: *Replacement Integral Indicator, Mathematical Modelation .*

GUILLERMO A. GONZÁLEZ
Ingeniero Industrial.

Miembro del Grupo de Investigación en Producción/Operaciones y Logística. Universidad Nacional de Colombia,
guillermo.gonzalez@bbva.com.co

AMANDA VIVEROS FOLLECO

Ingeniera Industrial.

Miembro del Grupo de Investigación en Producción/Operaciones y Logística. Universidad Nacional de Colombia.

lviveros@prosperarhoy.com

WILLIAM ARIEL SARACHE C.

Ingeniero Industrial, Dr. C.

Coordinador del Grupo de Investigación en Producción, Operaciones y Logística.

Universidad Nacional de Colombia.

(Sede Manizales).

wsarach@telesat.com.co

1. INTRODUCCIÓN

La problemática del reemplazo de equipo industrial, que permite establecer el momento adecuado en el cual un equipo que se encuentra en uso debe ser reemplazado, ha sido ampliamente estudiada desde la tercera década del siglo XX, encontrándose en la literatura una gran cantidad de aportes que intentan reducir el uso de prácticas empíricas que no han sido verificadas mediante análisis económicos, técnicos y/o tecnológicos.

La revisión bibliográfica permite observar, que el problema de reemplazo se aborda de diferentes maneras según la complejidad del objeto de estudio. Así, existen modelos que van desde el análisis de reemplazo de uno o varios equipos dispuestos en paralelo [1],[2],[3],[4],[5], hasta modelos más sofisticados que introducen en la decisión variables tales como el cambio tecnológico [6],[7],[8], el tamaño de las cuadrillas estudiadas [9] y las necesidades adicionales de capacidad [10]. Por otro lado, es importante mencionar los aportes alcanzados desde la investigación operativa con la aplicación de la programación entera [11], la optimización de redes [12], la programación dinámica [13],[14],[15],[16],[17],[18], los árboles de decisión [19], los procesos de decisión markovianos [20],[21] y la simulación.

No obstante los avances existentes, el recorrido bibliográfico demuestra que hasta el momento los

modelos encontrados apoyan la decisión de reemplazo fundamentalmente en variables económicas de carácter monocriterio, ya sea por que no se reconoce la importancia de la inclusión de otro tipo de variables, por la dificultad de establecer escalas comparativas entre términos económicos, técnicos y tecnológicos ó por que para facilitar la formulación y los cálculos se terminan expresando todas las variables necesarias en términos económicos. En este caso, la modelización basada en multiples criterios puede aportar una buena solución.

La modelización multicriterio pretende encontrar “lo mejor” entre “lo posible” en el momento en que la complejidad de las decisiones aumenta, debido al compromiso entre diversas aspiraciones imposibles de satisfacer en toda su plenitud; para llevar a buen término un análisis multicriterial es necesario seguir un procedimiento genérico en el que se debe definir el problema, establecer criterios (aspiraciones, deseos), formular el modelo, identificar y evaluar alternativas hasta llegar a elegir la mejor alternativa e instrumentar la decisión [22][23].

Por tal razón, y tomando en consideración que en un modelo de reemplazo la naturaleza múltiple de las metas y objetivos a alcanzar (minimizar costos, minimizar la obsolescencia, maximizar el servicio, entre otros) y la dificultad encontrada para incorporar más de una variable de decisión en cada modelo de los anteriormente

mencionados, en la presente contribución se expone la aplicación de un indicador multicriterio (Indicador Integral de Reemplazo, IIR), soportado en funciones algebraicas continuas no lineales, que permite un buen acercamiento a la realidad en las decisiones de reemplazo, el procedimiento expuesto se constituye en una herramienta válida para cualquier sector de la industria o región del mundo. A manera de demostración, se presentan los resultados resumidos en una empresa del sector azucarero.

2. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL INDICADOR

A partir de los diversos aportes encontrados en la revisión bibliográfica y, en específico, en los desarrollos de las técnicas multicriteriales, se construyó el denominado Indicador Integral de Reemplazo (IIR). Este indicador, tiene como fin el de establecer el momento adecuado para el reemplazo de equipamientos a partir de la conjugación de una serie de criterios relevantes. El procedimiento general empleado para la construcción del IIR es el que se expone en la Figura 1.

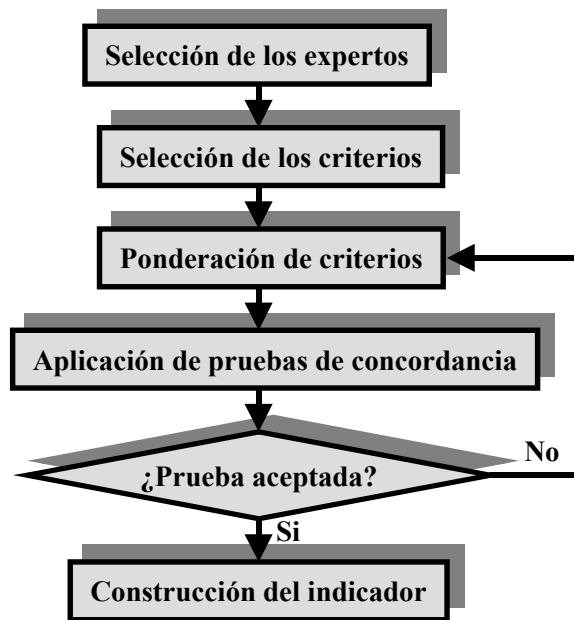


Figura 1. Procedimiento general para la construcción del IIR

Una descripción resumida de cada una de las etapas del procedimiento y los resultados obtenidos en la construcción del Indicador Integral de Reemplazo, para cierto sector industrial en Colombia, es la siguiente¹:

Selección de los expertos (E_j): Este primer paso, consiste en seleccionar a un grupo de personas expertas en el tema del reemplazamiento de equipos

¹ Aunque la aplicación del procedimiento se constituye en una herramienta válida para cualquier sector de la industria o región del mundo, los resultados particulares en cada etapa dependen de las características propias de cada sector, del tipo de tecnología dominante, del tipo de equipo que se estudia y del país o región al que pertenezca.

pertenecientes al sector industrial y académico. El número de expertos se calculó a partir de la ecuación 1. El resultado obtenido fue de 7 expertos.

$$m = \frac{p \times (1 - p) \times k}{i} \quad (1)$$

Donde:

p : Porcentaje de error tolerado (*p*= 1%).

k: Constante asociada al nivel de confianza.(*k*= 6.6564).

i: Nivel de precisión.(*i*= 10%)

m: número de expertos.

Selección de criterios: Para el caso en estudio, en principio se definieron un conjunto de 15 criterios; sin embargo, a partir de los principios de relevancia, redundancia, pertinencia y complementariedad, una segunda ronda de consulta redujo la lista a 4 criterios de máxima importancia. Dichos criterios fueron: *costos de manutención del equipo (C1)*, *eficacia del equipo(C2)*, *calidad del producto procesado por el equipo (C3)* y *obsolescencia del equipo (C4)*. Para el caso de la obsolescencia del equipo, es necesario aclarar, que mediante éste se establece la posición relativa del equipo frente al progreso tecnológico del sector industrial y que el nivel de obsolescencia obedece al comportamiento del ciclo de vida del equipo.

De acuerdo con la Figura 2 y en función del ciclo de vida esperado, en el eje Y se proponen, para el caso en estudio, cuatro niveles de modernidad, donde cada nivel aborda 25 puntos en una escala total de modernidad de 100 puntos. Por otro lado, la duración en tiempo de cada nivel de modernidad no es igual y depende de la dinámica innovadora de la industria a la que pertenece el equipo (Véase Eje X). Es decir, un equipo puede estar en el nivel de tecnología de punta por solo unos meses y en el nivel de tecnología moderna durante un par de años.

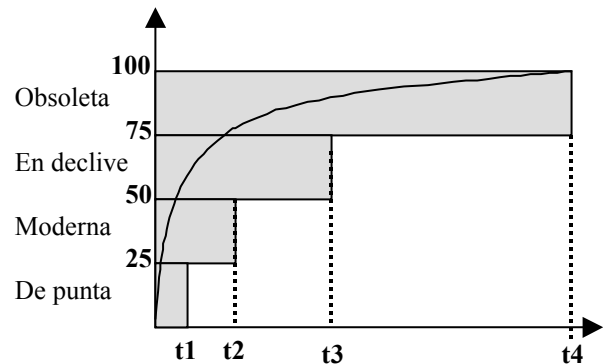


Figura 2. Comportamiento del nivel de obsolescencia del equipo.

Para establecer la calificación del equipo en la escala de obsolescencia, se toma su nivel de antigüedad en años

sobre el eje x, y con la ayuda de la curva, se establece el puntaje de obsolescencia sobre el eje y.

Ponderación de criterios (Wi): Se aplicó el método de ordenación simple con los resultados se exponen en la tabla 1.

E _j	CRITERIOS (i)			
	C1	C2	C3	C4
1	4	2	3	1
2	3,5	3,5	2	1
3	3	4	2	1
4	4	3	2	1
5	4	2,5	2,5	1
6	4	3	2	1
7	4	2	3	1
Σ	26,5	20,0	16,5	7,0
Δ ²	81,0	6,3	1,0	110,3
Peso	37.86%	28.57%	23.57%	10.00%

Tabla 1. Ordenación de los criterios. (j= número del experto).

Aplicación de la prueba de concordancia. Con el objetivo de establecer el nivel de acuerdo en la ordenación dada a los criterios por parte de los expertos, se calculó el índice de concordancia de Kendall empleando la ecuación 2.

$$W = \frac{12 \sum \Delta^2}{M^2 (C^3 - C)} \tag{2}$$

Donde,
 M= Número de expertos.
 C= Número de criterios.
 □= Desviación del valor medio de los juicios emitidos.

El resultado obtenido fue de 0.8102. El valor mínimo aceptado en este tipo de prueba es de 0.5; lo cual significa que existe un buen nivel de acuerdo entre los expertos y que las ponderaciones presentadas en la Tabla 1 son válidas.

Construcción del indicador. A partir de los criterios ponderados, es posible entonces construir un indicador que los integre en una sola función matemática, con el objetivo de establecer el periodo adecuado de reemplazo. Así mismo, para cada criterio, es necesario crear una función matemática que describa su comportamiento en el tiempo. Dicha función puede surgir de estimaciones *a priori* o pueden ser creadas a partir del análisis de regresión de datos históricos complementados con proyecciones realizadas por expertos, con el fin de obtener una visión completa del comportamiento del equipo durante todo el horizonte de planeación (vida útil programada por el proveedor del equipo).

Para el caso en estudio, las funciones genéricas propuestas en cada uno de los criterios son las siguientes:

- Costos de manutención del equipo C = F₁(t)
- Eficacia del equipo E = F₂(t)
- Calidad del producto procesado por el equipo Q = F₃(t)
- Obsolescencia del equipo O = F₄(t)

Donde F_i (t) es una función matemática que describe el comportamiento del criterio i en el tiempo t. El objetivo entonces es encontrar el punto (momento de reemplazo) que optimice la ecuación 3.

$$IIR = W_1 \frac{F_1(t) - Z_{1MIN}}{R_1} + W_2 \frac{F_2(t) - Z_{2MIN}}{R_2} + W_3 \frac{F_3(t) - Z_{3MIN}}{R_3} + W_4 \frac{F_4(t) - Z_{4MIN}}{R_4} \tag{3}$$

Donde:
 W_i : Ponderación del criterio i. (i= 1, 2,3,4).
 R_i : Diferencia entre el punto anti-ideal y el punto ideal² para función matemática asociada al criterio i.
 Z_{i min}: Valor mínimo que puede tomar la función matemática asociada al criterio i.

Por tanto para este caso, la función objetivo (IIR) se define en términos de funciones dependientes del tiempo y de esta manera, el modelo matemático completo es el siguiente:

Minimizar:

$$IIR = 0.3786 \frac{F_1(t) - Z_{1MIN}}{Z_{1*} - Z_1^*} + 0.2857 \frac{F_2(t) - Z_{2MIN}}{Z_{2*} - Z_2^*} + 0.2357 \frac{F_3(t) - Z_{3MIN}}{Z_{3*} - Z_3^*} + 0.1 \frac{F_4(t) - Z_{4MIN}}{Z_{4*} - Z_4^*}$$

Sujeto a:

$$t \leq P$$

$$t \geq 0$$

(P: vida útil prevista por el fabricante del equipo).

3. CASO DE APLICACIÓN

A manera de ejemplo se presenta a continuación un caso de aplicación en una empresa colombiana del sector en estudio.

El problema consiste en determinar el momento óptimo de reemplazo de la máquina “*centrifuga automática para procesar azúcar por ciclos número 4*”. Teniendo en cuenta que la vida útil prevista (P) por el fabricante del equipo estudiado es de 20 años, se crearon las funciones matemáticas necesarias para asociar a cada criterio durante este periodo de tiempo, usando el análisis de regresión de datos históricos entre 1994 (momento de adquisición del equipo) y 2003 (fecha de recolección de la información) y proyecciones desde 2004 hasta 2013, como se ilustra a continuación:

² De acuerdo con [22] el “punto ideal” de un objetivo es el valor con el cual éste alcanza su óptimo y se representa con Z*, por el contrario, el “punto anti-ideal” de un objetivo es el valor mas alejado de su óptimo y representa una solución poco atractiva para el centro decisor, su representación es Z*.

Costos de manutención del equipo: en el análisis de este criterio se tuvo en cuenta el costo de la inversión diferido a lo largo de la vida útil del equipo y el costo de mantenimiento. Obteniendo la función que se ilustra en la ecuación 4.

$$C = F_1(t) = 2.33996 \times 10^6 + \frac{1.0073479 \times 10^7 \times 1.075^t}{-1 + 1.075^t} + 124614 \times t + 41548.1 \times t^2 \quad (4)$$

Eficacia del equipo: de acuerdo con la definición de este criterio como la capacidad que tiene el equipo para contribuir al cumplimiento de los objetivos de fabricación en el sistema productivo en el cual la centrífuga #4 no se desempeña como recurso restrictivo o vital, se plantea, que la mejor manera de describir este criterio es mediante la disponibilidad, dando lugar a la formulación de la ecuación 5.

$$E = F_2(t) = 0.997517 - 0.00113293 \times t - 0.000514675 \times t^2 \quad (5)$$

Calidad del producto procesado por el equipo: Se mide como el porcentaje promedio mensual de reprocesos por día, y se describe como lo ilustra la ecuación 6.

$$Q = F_3(t) = 0.0858737 - 0.00382884 \times t + 0.000168148 \times t^2 \quad (6)$$

Obsolescencia del equipo, de acuerdo a la escala de medida establecida para este criterio, se estableció que la función matemática que mejor describe el ciclo de vida de la centrífuga estudiada es la que se expone en la ecuación 7.

$$O = F_4(t) = 0.188403 + 0.0606116 \times t - 0.000993684 \times t^2 \quad (7)$$

Para cada una de las cuatro ecuaciones anteriores, se obtuvo el “punto anti-ideal” y el “punto ideal” (Vease tabla 3), información necesaria para construir el Indicador Integral de Reemplazo (IIR) del equipo en estudio.

CRITERIO	F _i (t)	PUNTO ANTI-IDEAL	PUNTO IDEAL
		Z _i *	Z _i *
C1 (\$)	Ecuación 4	146768045	27093300
C2 (%)	Ecuación 5	0.7689884	0.9958
C3 (%)	Ecuación 6	0.082213	0.0640
C4 (%)	Ecuación 7	1	0.2480

Tabla 3. “Punto anti-ideal” y “punto ideal” para las funciones asociadas al criterio i.

Al introducir en la ecuación 3 la información de las tablas 2 y y las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 se obtiene la función que describe el Indicador Integral de Reemplazo para el equipo, que se comporta como se ilustra en la figura 3.

$$IIR =$$

$$\frac{1}{-1 + 1.075^t} * (-0.2979 + 0.28875 * 1.075^t) + (0.042 - 0.042 * 1.075^t) * t \quad (8)$$

$$+ (0.002 + 0.002 * 1.075^t) * t^2 + (-4.43 * 10^{-7} + 4.43 * 10^{-7} * 1.075^t) * t^3$$

$$+ (-8.52 * 10^{-8} + 8.52 * 10^{-8} * 1.075^t) * t^4$$

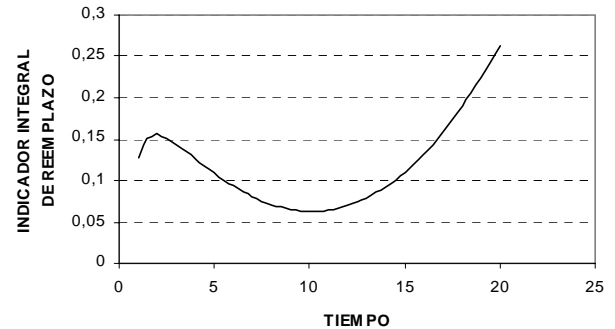


Figura 3. IIR Vs. Tiempo.

Al aplicar el modelo matemático:

Minimizar: IIR

Sujeto a:

$$t \leq 20$$

$$t \geq 0$$

Se obtiene que el IIR mínimo es 0,0632417344120808 en t = 10.104, lo que indica que la vida útil óptima de la centrífuga #4 se alcanza 10 años, 1 mes y 8 días después del año de puesta en marcha, por lo que el reemplazo debió efectuarse en el primer trimestre de 2004.

4. CONCLUSIONES

A pesar de que no se desconocen los aportes de diversos autores en el estado del arte, se detecta que los modelos de reemplazo existentes generalmente toman la decisión sobre análisis de tipo monocriterial, sin incluir de forma explícita diversas variables de tipo técnico y tecnológico que describan el comportamiento real del equipo, negando la posibilidad de tener una visión holística de las condiciones en las que opera el mismo. No obstante, se demuestra que con la aplicación de técnicas de tipo multicriterial es posible establecer el momento adecuado de reemplazo de un equipo involucrando en la decisión un conjunto relevante de variables que influyen en ella.

Para el caso en estudio, Indicador Integral de Reemplazo (IIR) propuesto, permite agrupar las funciones ponderadas, normalizadas y homogenizadas que representan el comportamiento de los criterios a lo largo del tiempo, logrando establecer el momento de la vida del equipo, en el cual éste consigue su mejor funcionamiento en términos económicos, técnicos y tecnológicos, convirtiéndose así en una buena herramienta de decisión. Específicamente en el equipo analizado, se estableció un periodo aproximado de 10 años para su reemplazamiento.

Sin embargo, la confiabilidad de los resultados obtenidos al aplicar el modelo depende, por un lado, de la calidad del juicio de los expertos involucrados y por otro, de la confiabilidad de los datos utilizados para establecer las funciones matemáticas con las cuales se describe el comportamiento del equipo y la capacidad de éstas para describir los datos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] VanderVeen, D. Parallel Replacement under Nonstationary Demand, Ph.D. dissertation, Department of Industrial and Operations Engineering, The University of Michigan, 1985.
- [2] Fraser, J.M. & Posey, J.W. A framework for replacement decisions. *European Journal of Operation Research*, No. 40, pp. 43 -57, 1989.
- [3] Jones, P., Zydiak, J. & Hopp, W. Parallel machine replacement, *Naval Research Logistics* No. 38, pp. 351-365, 1991.
- [4] Hartman, J. & Lohmann, J. An efficient model for large parallel replacement problems, *IERC Proceedings*, No. 39, pp. 1-6, 1996.
- [5] Hartman, J.C. & Ban, J. The series Parallel replacement problem. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, No. 18, pp.215 –221, 2002.
- [6] Elton, E. & Gruber, m. On the optimality of an equal life policy for equipment subject to technological improvement. *Operation Research Quartely*, No.27, pp. 93 –99, 1976.
- [7] Niar, S. & Hopp, A. Model for equipment replacement due to technological obsolescence. *European Journal of Operation Research*, No.63, pp. 207 –221, 1992.
- [8] Bean, J.C., Lohmann, J.R. & Smith, R.L. A dynamic infinite horizon replacement economy decision model. *Engineering Economist* No. 30, pp.99-120, 1985.
- [9] Scarf, P.A. & Bouamra, O. A capital equipment replacement model for a fleet with variable size. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Vol 5, No. 1, pp.40-49, 1999.
- [10] Chand, S., McClurg, T. & Ward, J. A model for parallel machine replacement with capacity expansion *European Journal of Operational Research*, No. 121, pp. 519-531, 2000.
- [11] Hartman, J., Lohmann, J. Replace and rebuild options in parallel replacement analysis. *IERC Proceedings*, No. 38, pp. 591- 596, 1995.
- [12] Prawda, J. Métodos y modelos de investigación de operaciones, Vol. 2, Editorial Limusa, México D.F., 1981.
- [13] Hartman, J. An economic replacement model with probabilistic asset utilization, *IIE Transactions*, Vol. 33, No. 9, 2001. En: <http://gateway.proquest.com>
- [14] Figuera, J. & Figuera, J. R. Renovación de equipos industriales. Editorial Hispanoeuropea, Barcelona, 1975.
- [15] Beichelt, F. A replacement policy based on limiting the cumulative maintenance cost, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18, N° 1, p. 76, 2001.
- [16] Oakford, R.V., Lohmann, J.R. & Salazar, A. A dynamic equipment replacement model, *IIE Spring Annual Conference Proceedings*, pp. 103-108, 1981.
- [17] Bean J.C, Lohmann J.R, & Smith RL. Equipment replacement under technological change. *Naval Research Logistics*, No. 41, pp.117 -128, 1994.
- [18] Jin, D, Hauke, L. & Powell, K. Optimal fleet utilization and replacement, *Transportation Research*, No. 36, pp.3-20, 2000.
- [19] Baldin, A., Furlanetto, L., Roversi, A. y Turco, F. Manual de mantenimiento de instalaciones industriales, Editorial Gustavo Gil, Barcelona, 1982.
- [20] Hopp, W & Niar, S. Markovian deterioration and technological change. *IIE Transactions*, No.26, pp. 74–82, 1994.
- [21] Hillier, F. & Lieberman, G. Investigación de Operaciones. Séptima Edición. Editorial Mc Graw Hill, México D.F., 2001.
- [22] Romero, C. Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial, Madrid, 1993.
- [23] Marrero Delgado, F. Procedimientos para la toma de decisiones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y transporte de la caña de azúcar. Aplicaciones en el CAI de la provincia de Villa Clara. Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2001.