

Análisis causal de reemplazo de equipos médicos radiológicos a causa de obsolescencia tecnológica

Causal analysis of radiological medical equipment replacement due to technological obsolescence

Anabella PABON [1](#); Lizeth Alejandra GAVIRIA [2](#); Ángela María WILCHES [3](#); Juan José BRAVO [4](#)

Recibido: 06/02/2018 • Aprobado: 05/03/2018

Contenido

- [1. Introducción](#)
 - [2. Marco conceptual de la decisión de reemplazo de equipos médicos](#)
 - [3. Caso de aplicación](#)
 - [4. Resultados](#)
 - [5. Análisis de sensibilidad](#)
 - [6. Conclusiones](#)
- [Referencias bibliográficas](#)

RESUMEN:

En este artículo se plantea un nuevo marco conceptual asociado al problema de reemplazo por obsolescencia tecnológica, donde el tomador de decisiones tiene la posibilidad de comprar mejores equipos en el mercado, existiendo también la probabilidad de aparición de nuevos avances tecnológicos en el futuro cercano. Además, se estudia un caso real que enfrenta una entidad de salud ante potencial obsolescencia de equipos radiológicos, problema que por sus características es abordado con un modelo de decisión Markov de horizonte finito.

Palabras-Clave: Reemplazo, obsolescencia tecnológica, Markov

ABSTRACT:

This article proposes a new conceptual framework associated with the equipment replacement problem due to technological obsolescence, where the decision maker has the possibility of buying new equipment in the market, and there is also the probability of the appearance of new technological advances in the near future. In addition, we study a real case with healthcare organizations facing potential obsolescence of radiological equipment, problem that is approached with a finite horizon Markov decision model.

Keywords: Replacement, technological obsolescence, Markov

1. Introducción

El tema de reemplazo de equipos por consideraciones de obsolescencia tecnológica ha sido ampliamente estudiado por décadas y puede hablarse de los trabajos realizados por Nair y Hopp (1992), Hartman (2004), Schochetman y Smith (2007), Sloan (2011), Yatsenko y Hritonenko (2011), solo por mencionar algunos. El concepto específico de obsolescencia tecnológica ha sido abordado por Amankwah-Amoah (2017), el cual menciona que las empresas muchas veces son persistentes al seguir usando tecnologías obsoletas, quedando

bajo el riesgo de que algún problema tecnológico ocurra y sea necesario el reemplazo. Las compañías requieren del análisis de reemplazo para determinar si el equipo actual está operando de manera económica, si los costos de operación pueden disminuirse o si los ingresos incrementarían con la adquisición de un equipo más moderno (Clavareau & Labeau, 2009). Esa persistencia de que habla Amankwah-Amoah (2017) puede darse en distintos tipos de empresa, pero no debería ser la regla en empresas que prestan servicios de diagnóstico médico, tal como es razonable que ocurra (Blanco, 2014; Polisena, Jutai y Chreyh, 2014). En la literatura científica, considerando específicamente el problema de reemplazo de equipos de diagnóstico médico, no se encuentran muchos artículos científicos, aunque si se encuentran manuales internos en los hospitales y a nivel estatal para el cuidado y reemplazo de los distintos equipos médicos. Un ejemplo de esto son las guías del Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud de México, donde una de esas guías está dedicada a los equipos de tomografía computarizada que es la tecnología que será objeto de análisis posterior en este artículo. Mahfoud, El Barkany, El Biyaali (2016) estudian la importancia del mantenimiento preventivo en los equipos médicos mientras que Rawashdeh, Alnajdawi y Ababneh (2014) determinan un índice de prioridad de reemplazo para los equipos médicos, el cual usan para establecer políticas de mantenimiento preventivo con prioridades. Ante la escasez de artículos que se concentren en el reemplazo de equipos de diagnóstico médico, el presente artículo muestra en la primera parte un marco conceptual para la consideración del reemplazo tecnológico en el contexto de entidades de salud, marco que es nuevo en la literatura y permite determinar los elementos básicos que influyen la decisión de reemplazo en el sector de diagnóstico médico. Posteriormente se presenta el análisis de reemplazo de equipos de tomografía computarizada existentes en una entidad de salud de la ciudad de Cali, Colombia. El problema presenta la posibilidad de reemplazar o de conservar el equipo actual de tomografía, dado que en el mercado ya existe un tomógrafo de una tecnología mejorada y también hay una probabilidad de que un nuevo tomógrafo con una tecnología aún más avanzada entre al mercado, aunque no se conoce el momento en el cual puede entrar esta nueva tecnología.

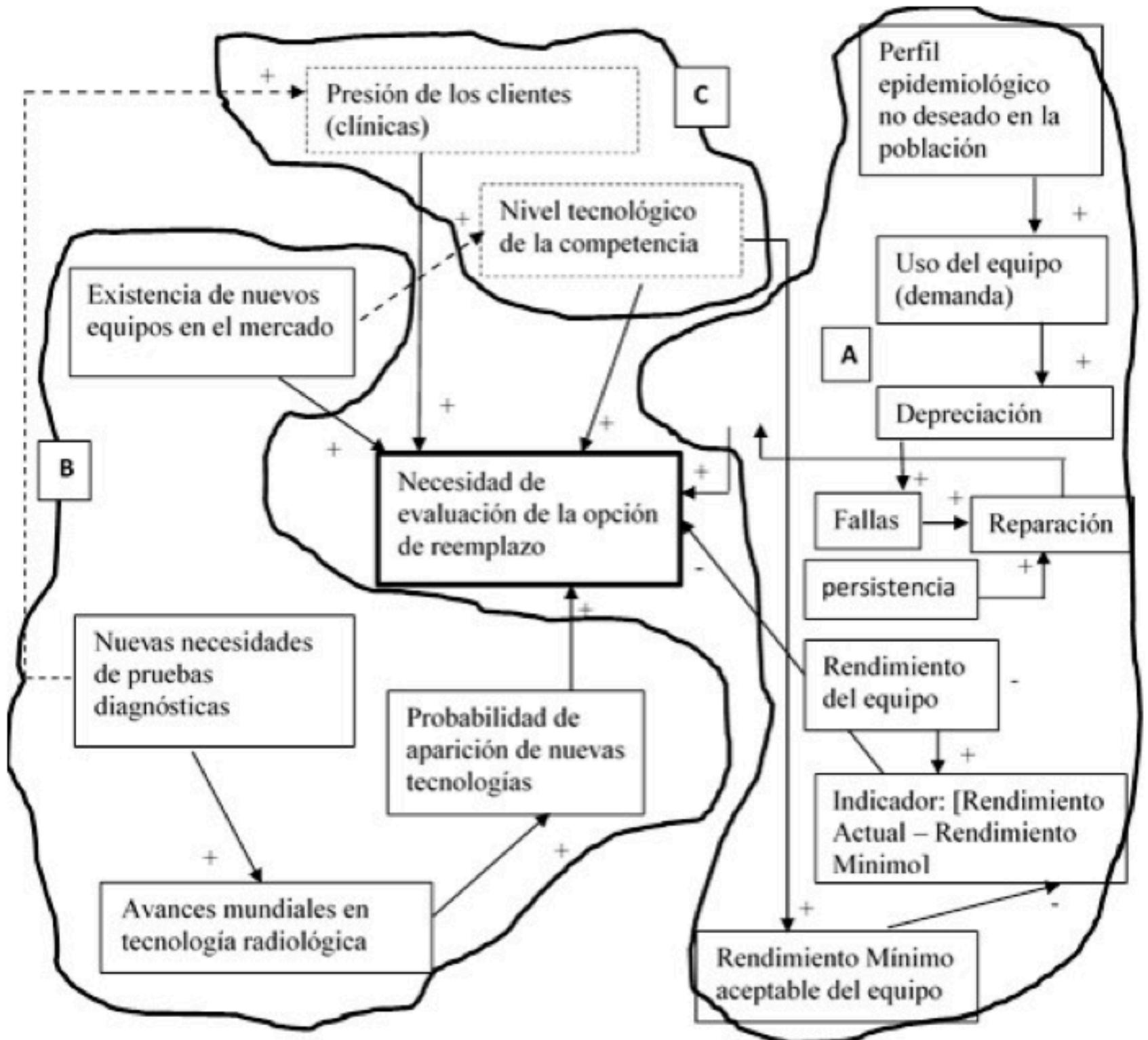
2. Marco conceptual de la decisión de reemplazo de equipos médicos

En la figura 1 se presentan las relaciones causales básicas relacionadas con la decisión de reemplazo de equipos asociados con pruebas diagnósticas. A diferencia del marco conceptual definido por Amankwah-Amoah (2017), la figura 1 muestra tres grandes inductores del reemplazo: el bloque A relacionado con el uso del equipo, el bloque B relacionado con obsolescencia tecnológica y el bloque C asociado a la presión competitiva de clientes y de la competencia. El uso del equipo depende de la demanda que a su vez se asocia con el perfil epidemiológico de la población durante la vida útil del equipo. A mayor uso del equipo, mayor depreciación de este, lo que induce a mayores fallos y eventos de reparación, llevando esto finalmente a una condición de rendimiento del equipo cada vez menor. El ciclo falla-reparación está asociado al concepto de persistencia, o de querer mantener el equipo y no reemplazarlo. Sin embargo, esa persistencia en el sector salud tiene un límite, o por lo menos debe tenerlo, y eso se hace rastreando el Rendimiento Actual del Equipo y comparándolo con el Rendimiento Mínimo Aceptable (RMA), según el nivel de servicio que se debe prestar. Ese nivel de servicio estará relacionado con la exigencia de la prueba diagnóstica misma, y con la presión de los clientes y de la competencia por tener mejores reportes. Es por ello por lo que debe existir un Indicador como se muestra en la figura, que es el gap ó la distancia entre el rendimiento actual y el RMA, el cual entre más positivo sea será mucho mejor. Entre más exigente sea el RMA entonces será más estricta la comparación y el Indicador decrece. Finalmente, entre más alto sea el Indicador, menor será la necesidad de reemplazo a causa del uso. Hartman (2004) estudia el impacto del uso variable de los equipos considerando un rendimiento mínimo, sin embargo, él no relaciona el uso con los elementos considerados aquí, incluyendo la persistencia y el límite a la misma. Es importante considerar que la persistencia se relaciona con el costo de persistir, lo cual no está claramente establecido en el artículo de Amankwah-Amoah (2017). Esto implica que entre más persisto, es decir, más reparo el equipo para no reemplazarlo, más costosa es la

persistencia, o las reparaciones subsiguientes. A pesar de que un indicador de costos podría agregarse, es razonable que en el sector salud sea igual de importante de rastrear el rendimiento del equipo al mismo tiempo que el costo, siendo válido decir que éste último es y seguirá siendo un criterio inseparable de la decisión de reemplazo, tal y como se refleja en los múltiples artículos científicos sobre el tema. Es por tanto claro que a mayor sea el costo de operar-reparar un equipo, mayor será la necesidad de evaluar su reemplazo. El bloque B está relacionado directamente con la obsolescencia tecnológica que se compone de dos tipos de información: existencia de equipos nuevos en el mercado y posibilidad de lanzamiento de nuevas tecnologías. La existencia de equipos en el mercado que compitan con el equipo actual incrementa en algún grado la necesidad de reemplazo, pero dicha necesidad se acrecienta en caso de que esos equipos sean adquiridos por la competencia, y generen una presión adicional por hacer el cambio tecnológico. Por su parte, la necesidad de nuevas y más eficientes pruebas diagnósticas, aumentan los avances científicos en tecnologías diagnósticas y aumenta la probabilidad de aparición de nuevas tecnologías en el futuro.

Figura 1

Marco causal – conceptual de la decisión de reemplazo de tecnología médica diagnóstica



Pero al mismo tiempo, esa necesidad de nuevas pruebas diagnósticas incrementa la presión de los clientes por adquirir nuevas tecnologías y esto a su vez aumenta la necesidad de hacer el reemplazo tecnológico lo más pronto posible. Esto fue estudiado por Nair y Hopp (1992) cuya estrategia metodológica para considerar obsolescencia ha sido estudiada por muchos autores hasta la fecha y entre ellos se encuentran los trabajos desarrollados por

Hartman y Tan (2014), Adkins y Paxson (2017), Cheevaprawatdomrong y Smith (2003), Richardson, Kefford y Hodkiewicz (2013), Bloch, Courvisanos y Mangano (2011), Li, Loulou y Rahman (2003), Rahman y Loulou (2001), entre otros. Cuando hay nuevas opciones tecnológicas es indudable que en el proceso de evaluación del reemplazo se deban estudiar los costos de operación y mantenimiento, y comparar el equipo nuevo con el actual en este aspecto.

Por último, está el bloque C asociado a presiones competitivas. Entre más presión genere el desarrollo tecnológico de la competencia, mayor será la presión por hacer el reemplazo, y entre mayor sea la presión de los clientes, que son principalmente Clínicas y Hospitales, mayor será la necesidad de reemplazo.

Ahora bien, pensando en los criterios de decisión de reemplazo, a pesar de que el costo es un criterio importante, tal como se mencionó, es evidente que la persistencia, la presión competitiva y la obsolescencia tecnológica en sí misma, son factores que también influyen en la definición del momento de reemplazo. Todo dependerá del peso que el tomador de decisiones le dé a estos factores. Por ejemplo, si la persistencia es muy alta, entonces el porcentaje de importancia de la presión competitiva y de la obsolescencia tecnológica es baja. Así mismo, si el obtener ventajas competitivas tiene el peso más alto, entonces la persistencia tendría un peso menor, y se tendría claro la fuerza que induce en este caso el reemplazo. Si los costos de mantenimiento y operación del equipo tienen un porcentaje de importancia mayor, esto hace que la persistencia tenga un peso menor, y que se busquen opciones tecnológicas que apoyen la reducción de este factor costo. Otro ejemplo podría estar asociado con la nueva tecnología. Si la probabilidad de aparición de una nueva tecnología es muy baja, entonces quizás los inductores del reemplazo deberían concentrarse en las presiones competitivas y en los costos, éste último dependiendo del nivel de persistencia. Sin tener definido el peso o la importancia de estos factores, no quedarían claros para el tomador de decisiones los inductores que el debería considerar para la decisión de reemplazo. De hecho, es conveniente considerar varios factores y no uno sólo, y en la Tabla 1 se muestran las implicaciones en caso de que la importancia se concentrara en un solo factor.

Tabla 1
Impacto de concentrarse en un solo factor para la decisión de reemplazo

Criterio	¿Qué ocurre si este criterio es el único en consideración?
Costo	Al ser el costo el criterio de mayor importancia, el tomador de decisiones elige no influenciarse por las presiones competitivas, pero si estaría atento a nuevos equipos en el mercado. Lo inadecuado de concentrarse solo en el costo, tal como lo hace la mayoría de los artículos antes citados, es que se puede llegar a reemplazar el equipo actual por uno más económico, que no represente necesariamente una actualización tecnológica, quedando la empresa con posible pérdida de ventaja competitiva desde lo tecnológico, riesgo que puede tener consecuencias comerciales en el mediano y largo plazo.
Persistencia	La persistencia puede ser, implícitamente, el criterio dominante para el tomador de decisiones de reemplazo. Este no es un criterio que abiertamente se suela manifestar, sino que se percibe en la conducta de algunos funcionarios de persistir en mantener el equipo actual. Cuando la persistencia es alta puede acarrear un incremento en costos, un decremento en la calidad del servicio y acercamiento pronunciado hacia la obsolescencia tecnológica.
Presión Competitiva	Es posible que factores externos a la compañía como la existencia de competidores tecnológicamente agresivos y proactivos, induzcan a un mejoramiento tecnológico inaplazable, esto para no perder la preferencia de algunos clientes exigentes y a la vez rentables. Pero si son esas fuerzas externas las únicas que movilizan las decisiones de reemplazo tecnológico, entonces es posible que sean los costos de adquisición de tecnología aquellos que en algún momento puedan superar los umbrales

	financieramente permitidos. No se puede reemplazar tecnología cada vez que algún competidor lo haga, o cada vez que un cliente lo exija.
Obsolescencia Tecnológica	En caso de que la mayor preocupación sea no caer en obsolescencia tecnológica, es posible que, guiados por esa preocupación, el nivel tecnológico llegue a niveles muy altos. Si el nivel tecnológico es más alto que aquel requerido para obtener una ventaja comparativa importante con la competencia, entonces las inversiones realizadas empezarán a verse como innecesarias.

En la siguiente sección se presentará un caso de aplicación real de decisiones de reemplazo de equipos de tomografía computarizada (ver Ortega y Socolsky, 2012).

3. Caso de aplicación

Con el propósito de evidenciar los factores que tienen mayor incidencia a la hora de tomar decisiones con relación al reemplazo, se presenta a continuación el análisis real realizado a equipos de tomografía computarizada, llevada a cabo con el apoyo de cinco entidades que ofrecen el servicio de diagnóstico con esta tecnología. Estos tomógrafos son equipos cuya obsolescencia habitualmente es preocupante y ha sido objeto de estudios tal como por ejemplo el realizado por Reyes, Vivas y Guadalajara (2011), quienes se enfocaron en medir la vida útil de equipos de tomografía computarizada con el fin de prever el momento de obsolescencia tecnológica, y para ello se apoyaron en mediciones y métodos estadísticos multivariados.

Radiólogos y técnicos en radiología de cada una de las cinco instituciones fueron entrevistados. Dichas instituciones son clínicas y hospitales de segundo y tercer nivel en las ciudades colombianas de Cali y Pasto, que ofrecen el servicio de apoyo diagnóstico por tomografía computarizada, y cuyos nombres se omiten por razones de confidencialidad.

Como resultado se pudo determinar que los factores de mayor relevancia a la hora de determinar una decisión de reemplazo son para ellos: la obsolescencia tecnológica, la ventaja competitiva por presión de la competencia y de los clientes, y el monto de la inversión. Esto permitió validar con expertos el marco causal-conceptual de la figura 1. Los tres primeros están directamente relacionados con los ingresos incrementales resultantes de un mayor abanico de servicios, mayor eficiencia y mejor aceptación por parte de los usuarios (clientes). En este caso los costos operacionales y de mantenimiento no son tan prioritarios, o no son el único factor como ha sido habitualmente considerado.

Con un ejemplo del uso de una metodología multi-factorial para el análisis de reemplazo se analiza el caso particular de una entidad que se enfrenta a la decisión de reemplazar un tomógrafo Hispeed Dual Multicorte de 2 Detectores, que en adelante se llamará tecnología "Tmo", que presenta algunas limitaciones para realizar exámenes sofisticados que requieren mayor velocidad y capacidad de reconstrucción. Se pudo constatar que en el mercado hay equipos disponibles de mejor tecnología y que existen otros equipos que aún no han llegado al mercado colombiano y que tienen aún mayor capacidad en términos de calidad de imagen y menor dosis de radiación requerida. Toshiba es una de las marcas más reconocidas en el mercado de los tomógrafos (IQ4I, 2014). En el momento de la evaluación el equipo de tomografía más avanzado, disponible en Colombia, era el Toshiba Aquilion ONE, que en nuestro caso es llamado "Tm1". Por otra parte, tal como lo mencionamos, Toshiba ha desarrollado un tomógrafo de mayor capacidad en términos de mayor calidad de imagen con menor dosis de radiación que aún no entra al mercado colombiano y que denominaremos en este artículo tecnología "Tm2".

Con base en las características del problema y más específicamente los factores relevantes para la decisión de la entidad caso estudio, se trabajó con un modelo Markov basado en la propuesta de Nair y Hopp (1992), para determinar cómo podría influir la probabilidad de entrada al mercado de un tomógrafo de mejor tecnología en la decisión de reemplazar el actual.

En la tabla 2 se relacionan los modelos de los tomógrafos, su costo de adquisición, su valor

de salvamento e ingresos anuales, asociados a los tomógrafos 0, 1 y 2 para el momento $t=0$. Los ingresos para los tomógrafos 0 y 1 se calcularon considerando la demanda promedio mensual de exámenes de tomografía (tanto los que se realizan actualmente por el "Tm0", como los que éste no puede atender y que pueden ser ejecutados por el "Tm1" y otros novedosos que se podrían realizar con el "Tm2"). Las tarifas también fueron proporcionadas por la entidad caso estudiode acuerdo con el código CUPS (Clasificación Única de Procedimientos en Salud) asociado a cada examen posible de hacer con el tomógrafo respectivo. Los valores correspondientes a las inversiones y valor de salvamento se obtuvieron con la ayuda de un proveedor de equipos médicos de la firma Toshiba.

Para el análisis markoviano de este problema de reemplazo tecnológico, definiremos el estado tecnológico en un tiempo t como (i,l) , donde i representa el índice de la tecnología en uso por la clínica, y l es el índice de la más reciente tecnología disponible en el mercado. Por ejemplo, si en un momento de tiempo t el estado es $(0,2)$, esto significa que la empresa está usando Tm0 pero que la última tecnología disponible en el mercado es Tm2. En $t = 0$ el tomógrafo Tm2 aún no ha llegado, el estado inicial del sistema es $(0,1)$. Se definirá a K_i como la acción de mantener la tecnología i , y a R_j como la acción de reemplazar la tecnología actual por la tecnología j , estando en el estado (i,l) con $j \leq l$. Se asume que la empresa puede tomar la decisión de mantener-reemplazar el equipo al inicio de cada periodo.

Tabla 2

Valores de los modelos de tomógrafos a pesos del año base.

Tecnología	Equipo - Modelo	Costo adquisición (MM COP)	Valor de salvamento (MM COP)	Ingresos anuales (MM COP)
0	Hispeed dual multicorte de 2 detectores		\$ 1.030	\$ 1.257
1	Toshiba Aquilion 16 cortes	\$ 2.688	\$ 1.237	\$ 1.879
2	Toshiba Aquilion ONE Vision	\$ 3.120	\$ 2.107	\$ 2.440

Fuente: entidad caso estudio

Se asume que I_{it} representa el valor de la inversión en el tomógrafo i (Tm_1 o el Tm_2) en un período t mayor que cero, s_{it} el valor de mercado del equipo reemplazado en el período t y r_{it} representa el ingreso obtenido en el período t por los servicios prestados con el Tm_i .

Para resolver el problema se debe construir la función de valor $f_t^T(0,1)$, la cual se muestra en la figura 2 para un horizonte T , y es una ecuación dinámica recursiva que emplea el factor de descuento μ , que se aplica de manera distinta a lo realizado por Nair y Hopp (1992) para los ingresos los cuales se consideran que ocurren a final de período y no a comienzo.

Figura 2. Función de valor para el estado (0,1)

$$f_t^T(0,1) = \max \begin{cases} R_1: -I_{1t} + s_{0t} + \mu r_{1t} + \mu\{(1 - p_{t+1})f_{t+1}^T(1,1) + p_{t+1}f_{t+1}^T(1,2)\}, \\ K_0: r_{0t} + \mu\{(1 - p_{t+1})f_{t+1}^T(0,1) + p_{t+1}f_{t+1}^T(0,2)\}. \end{cases}$$

Si estando en (0,1) al inicio de un tiempo t se toma la decisión R_1 , entonces se compra Tm_1 haciendo una inversión I_{1t} , se vende el tomógrafo Tm_0 por valor de s_{0t} , y se obtendrán unos ingresos al final del periodo t igual a r_{1t} (que deben ser afectados por el factor de descuento). Además, en este caso en $t+1$ podría llegarse al estado (1,2) con probabilidad p_{t+1} , con una función de valor $f_{t+1}^T(1,2)$ ó al estado (1,1) con probabilidad $(1 - p_{t+1})$, con función de valor $f_{t+1}^T(1,1)$. Esas funciones de valor probables futuras son producto de la decisión de reemplazar en t . De otro lado, si estando en (0,1) al inicio de un tiempo t se toma la decisión K_0 , entonces se obtendría al final de ese periodo t unos ingresos r_{0t} , y de igual manera en $t+1$ podría llegarse a los estados (0,1) ó (0,2), y a las respectivas funciones de valor, tal y como se observa en la ecuación de la figura 2. Allí se observan los costos, los ingresos y el factor de obsolescencia tecnológica representada por la existencia de nuevas tecnologías y su probabilidad de aparición.

En la figura 3 se muestran las funciones de valor recursivas para los estados restantes. Esas funciones son metodológicamente necesarias de definir para encontrar la decisión óptima (K_0 ó R_1) en el estado actual (0,1) en que se encuentra el proceso decisorio.

Figura 3

Funciones de valor para los estados distintos al (0,1)

$$f_t^T(1,1) = \mu r_{1t} + \mu\{(1 - p_{t+1})f_{t+1}^T(1,1) + p_{t+1}f_{t+1}^T(1,2)\}$$

$$f_t^T(0,2) = \max \begin{cases} R_2: -I_{2t} + s_{0t} + \mu r_{2t} + \mu f_{t+1}^T(2,2), \\ R_1: -I_{1t} + s_{0t} + \mu r_{1t} + \mu f_{t+1}^T(1,2), \\ K_0: \mu r_{0t} + \mu f_{t+1}^T(0,2), \end{cases}$$

$$f_t^T(1,2) = \max \begin{cases} R_2: -I_{2t} + s_{1t} + \mu r_{2t} + \mu f_{t+1}^T(2,2), \\ K_1: \mu r_{1t} + \mu f_{t+1}^T(1,2), \end{cases}$$

$$f_t^T(2,2) = \mu r_{2t} + \mu f_{t+1}^T(2,2)$$

La herramienta de decisión para definir si es mejor R_1 ó K_0 , podría establecerse como Δ_t^T la cual se calcula tomando el valor de la decisión R_1 en la ecuación (1) y restándole el valor de la decisión K_0 en la misma ecuación. Por lo tanto:

Figura 4. Indicador para determinar la conveniencia de reemplazar o mantener.

$$\Delta_t^T = -I_{1t} + s_{0t} + \mu(r_{1t} - r_{0t}) + \mu(1 - p_{t+1})[f_{t+1}^T(1,1) - f_{t+1}^T(0,1)] + \mu p_{t+1}[f_{t+1}^T(1,2) - f_{t+1}^T(0,2)]$$

El criterio de decisión de la figura 4 establece entonces que si $\Delta_t^T > 0$, entonces se decide R_1 , de lo contrario, se decide K_0 . Puede decirse que $\pi_t^T(i, l)$ es la acción óptima a tomar en el estado (i, l) en el periodo t en un problema de T periodos.

Con la entidad de salud que cooperó con el estudio, se establecieron $T=4$ periodos de análisis, y se definió la rentabilidad mínima esperada con la cual se calculó el factor de descuento que fue de $\mu=0.93$. Para el caso base, se determinaron cuatro valores de probabilidad para cada año en consideración relacionadas con la incursión del "Tm₂", con el fin de evaluar su impacto en la decisión de reemplazo. Estos valores se asignaron arbitrariamente de la siguiente manera: 20%, 30%, 40% y 50%.

Para obtener la decisión óptima estando en el estado $(0,1)$, y resolver la ecuación recursiva (6), se trabajará con el método de horizonte infinito de Nair y Hopp (1992) para determinar el momento óptimo de reemplazo. Este método ha sido referenciado y extendido por varios artículos subsecuentes, incluido el de Nair (1995) y el de Schochetman y Smith (2007). Para las demostraciones respectivas consultar Nair y Hopp (1992).

La ecuación recursiva (6) tiene una progresión hacia atrás, y debe partir del conocimiento de condiciones límites para el periodo $t = T$. Si bajo ciertas condiciones se asegura que Δ_t^T es no decreciente en T para todo t , entonces la decisión óptima $\pi_t^T(0,1) = R_1$ e implica que $\pi_t^T(0,1) = R_1$ incluso para todo $t \geq T$ (hasta infinito). De igual manera, si bajo ciertas condiciones se muestra que Δ_t^T es no creciente en T para todo t , entonces esto significaría que la decisión óptima $\pi_t^T(0,1) = K_0$ e implica que $\pi_t^T(0,1) = K_0$ incluso para todo $t \geq T$. Sea $L(i,l)$ el valor límite de la función de valor para el estado (i,l) cuando $t = T$

Se ha definido que las condiciones límites que hacen que Δ_t^T sea una función no-decreciente en T son:

$$L(1, 1) - L(0, 1) = \min [c_{1T} - s_{0T}, r_{1T} - r_{0T}]$$

$$L(1, 2) - L(0, 2) = s_{1T} - s_{0T}$$

$$L(2, 2) - L(1, 2) = c_{2T} - s_{1T}$$

En este caso se puede decir que $\Delta_t^T = \Delta_t^T(a)$.

Así mismo se ha definido que las condiciones límites que hacen que Δ_t^T sea una función no-creciente en T son:

$$L(1, 1) - L(0, 1) = c_{1T} - s_{0T}$$

$$L(1, 2) - L(0, 2) = c_{1T} - s_{0T}$$

$$L(2, 2) - L(1, 2) = \min [c_{2T} - s_{1T}, r_{2T} - r_{1T}]$$

4. Resultados

En la Tabla 3 se resumen los valores correspondientes a los tres tomógrafos con los cuales la entidad debe definir su decisión de reemplazar o no y el momento óptimo de hacerlo; costo de adquisición (i_i), valor de salvamento (s_i) e ingresos (r_i) de los tres tomógrafos, probabilidad de entrada al mercado de T_{m2} y (p) y factor de descuento (μ).

Tabla 3
Valores de entrada para r_{it} , c_{it} , y s_{it} (cifras en millones)

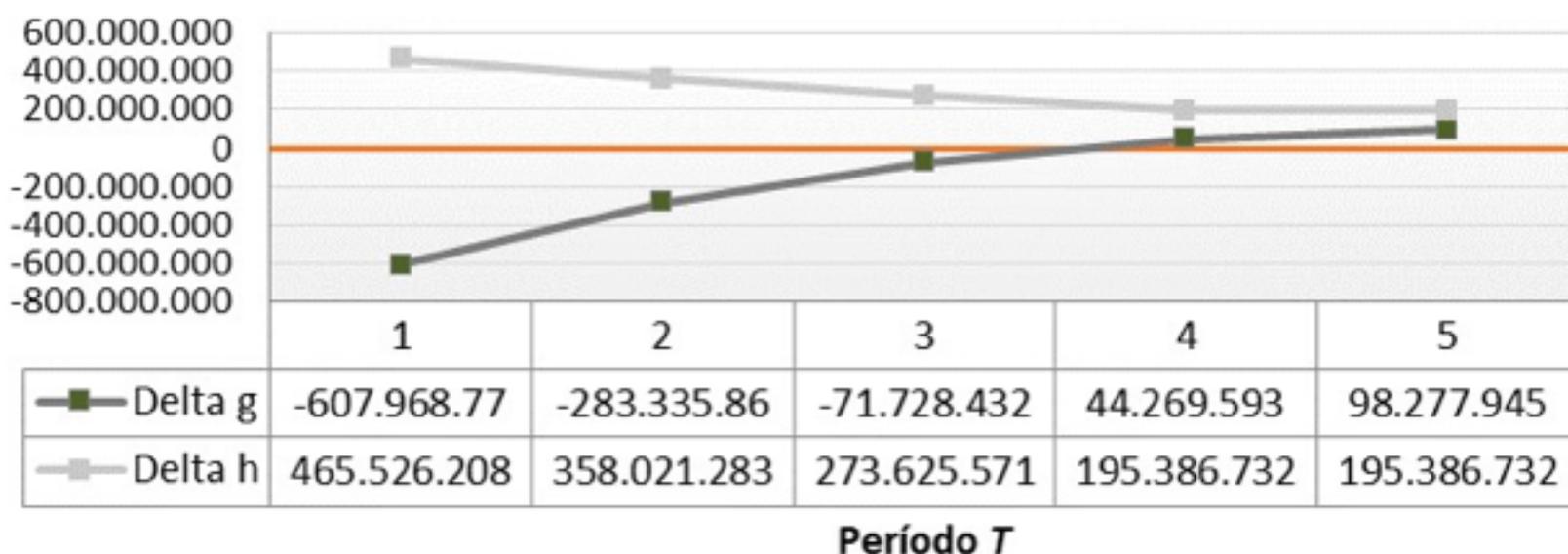
PERÍODO	0	1	2	3	4
r_0	\$ 1.257	\$ 1.320	\$ 1.386	\$ 1.455	\$ 1.528
r_1	1.879	1.973	2.072	2.176	2.284
r_2	2.441	2.563	2.691	2.825	2.967
c_1	2.688	2.957	2.809	2.669	2.535
c_2	3.120	3.432	3.775	3.775	3.775
s_0	1.030	927	834	751	676
s_1	1.238	1.114	1.002	902	812
s_2	-	-	2.107	1.896	1.707
p		0,20	0,30	0,30	0,50
μ	0,93				

Los valores correspondientes a las inversiones y valor de salvamento se obtuvieron con la ayuda de un proveedor de equipos médicos de la firma Toshiba y corresponden a los valores que tendrían en $t=0$. Como se desconoce el comportamiento de éstos precios en el futuro, se estimó que el valor de la inversión en el caso de T_{m1} se incrementa un 10% el primer año, pero con la probabilidad de aparición del T_{m2} a partir del segundo año su valor se disminuye en los años siguientes también un 5%. Para el caso del T_{m2} se asume que su valor incrementa también un 10% por los dos primeros años, pero de allí en adelante no incrementa de valor. Con relación a los valores de salvamento, se asume una pérdida de valor anual del 10% con relación a su valor inicial para los tres tomógrafos. Todos los ingresos se asumen que crecen arbitrariamente un 5% por año.

En la figura 5 se presenta el resultado obtenido tras la ejecución del modelo, evidenciando que el momento óptimo de reemplazo corresponde al período 4, donde $\Delta(a)$ y $\Delta(b)$ se encuentran en un mismo cuadrante con los valores de \$44.269.593 y \$195.386.732 respectivamente. Como $\Delta(a) \geq 0$, entonces el reemplazo del "tomógrafo 0" por el "tomógrafo 1" genera más valor a la empresa. Dado que, como se observa en la figura 2, $\Delta(b)$ es no creciente y $\Delta(a)$ es no decrecientes, respectivamente, y además tienden a converger a un mismo valor durante el horizonte infinito, se infiere que el resultado encontrado se preservará a lo largo de $T=\infty$.

Figura 5
Momento óptimo de reemplazo (período 4).

$\Delta(a)$ vs $\Delta(b)$



5. Análisis de sensibilidad

Con el propósito de determinar cuáles de las variables podría tener mayor influencia en el cambio de decisión frente al reemplazo se procedió a realizar un análisis de sensibilidad.

5.1. Variación en la probabilidad p

En el modelo anterior, la obsolescencia tecnológica se evidencia por la presencia de una nueva tecnología en el mercado y se acrecienta con la probabilidad de aparición de aún mejores tecnologías en el futuro cercano. Con el fin de validar la estabilidad de la decisión brindada por el modelo ante un cambio en las probabilidades de aparición del "Tomógrafo 2", se procedió a realizar un análisis de sensibilidad variando dichos parámetros. Para ello se plantearon cuatro escenarios a los cuales se les asignaron diferentes probabilidades para cada período, como se presenta en la tabla 4, Se puede evidenciar que $p(t+1) \geq p_t$.

Tabla 4
Variación de las probabilidades de aparición del tomógrafo 2

Caso	Probabilidades			
	P1	P2	P3	P4
1	0,05	0,10	0,15	0,20
2	0,30	0,40	0,50	0,60
3	0,70	0,80	0,90	0,90

Posteriormente se ejecutó el modelo para cada uno de los escenarios, dejando los costos de adquisición, valores de salvamento, ingresos y factor de descuento iguales al caso anterior. En las figuras 6 a 8 se aprecian las variaciones sufridas por $\Delta(a)$ y $\Delta(b)$ ante un cambio en las probabilidades de aparición del "Tm 2", de acuerdo con los casos planteados en la tabla 4.

Figura 6
Momento óptimo de reemplazo – variación en probabilidades caso 1.

$\Delta(a)$ vs $\Delta(b)$

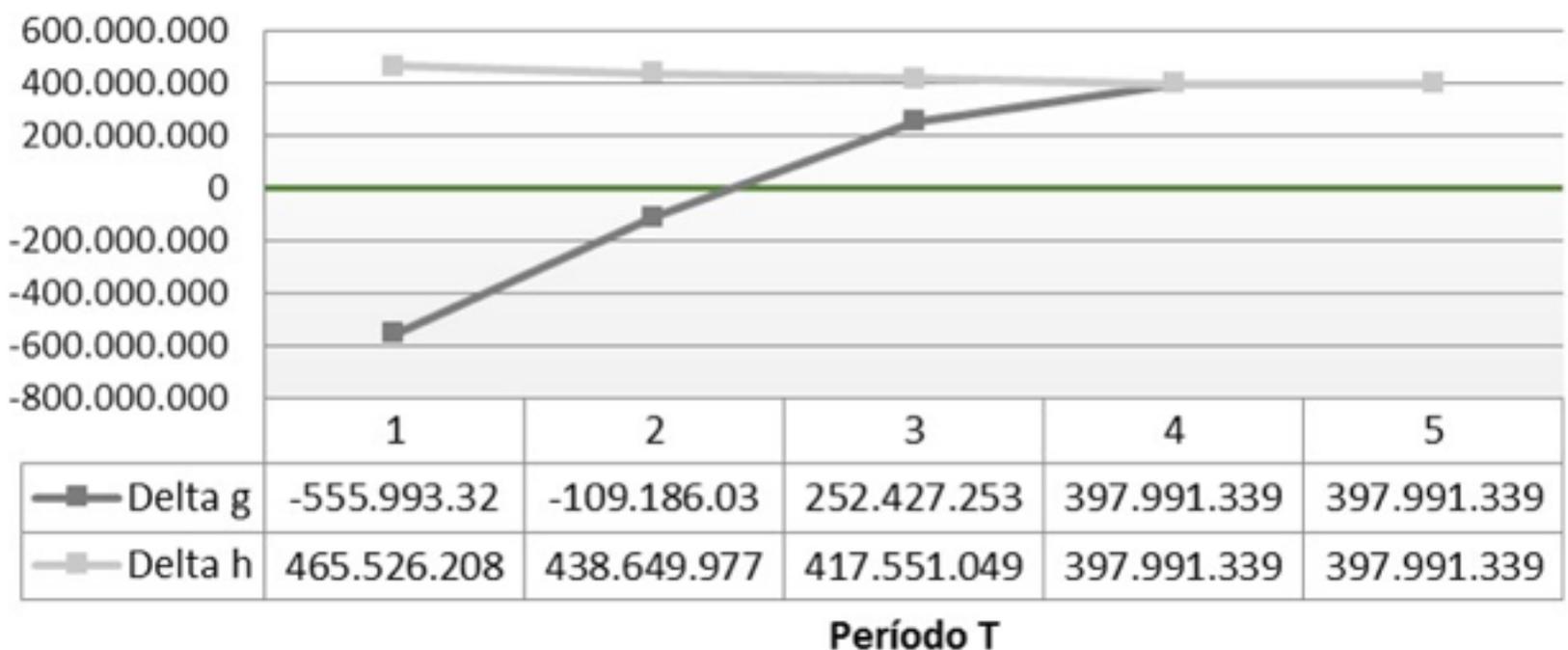


Figura 7
Momento óptimo de reemplazo – variación en probabilidades caso 2.

$\Delta(a)$ vs $\Delta(b)$

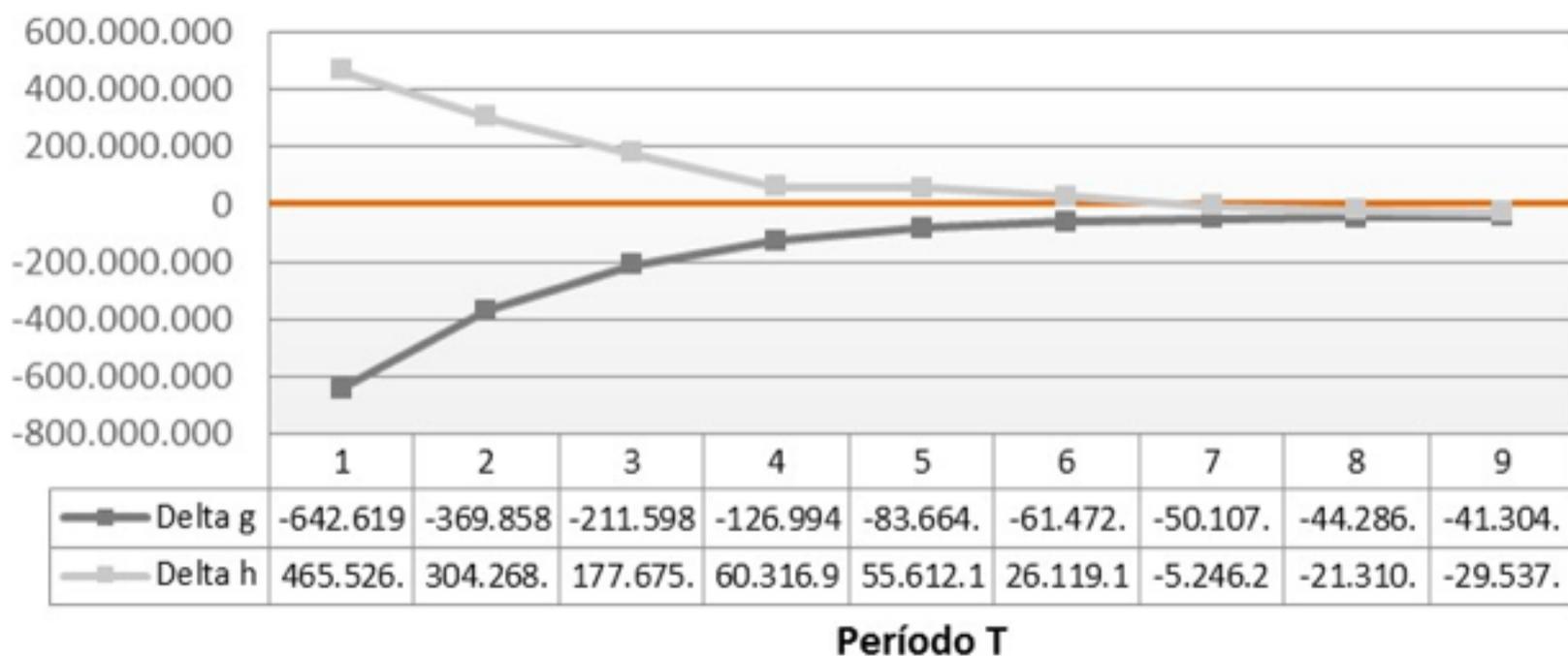
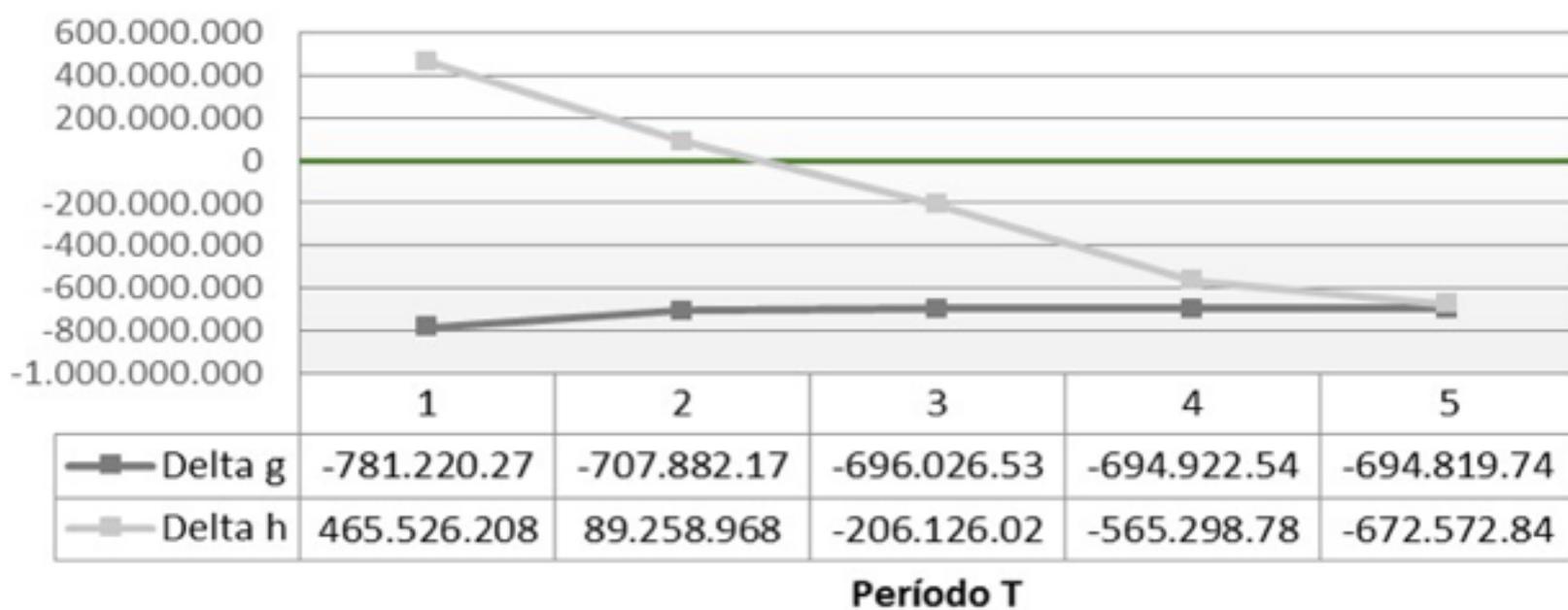


Figura 8

Momento óptimo de reemplazo – variación en probabilidades caso 3

$\Delta(a)$ vs $\Delta(b)$



Como se observa en las figuras 6 a 8, el modelo reacciona ante cambios en la probabilidad de aparición del "Tm2". En el caso 1, se inicia en el período 1 con una probabilidad del 5%, con un aumento gradual período a período de 5%. Se puede evidenciar en la figura 3, que la pendiente de $\Delta(b)$ es casi cero. Los resultados de este caso pueden interpretarse como una disminución en el atractivo de conservar el equipo en uso ante la expectativa de la incursión del "Tm2" (que ofrece beneficios superiores a la organización), dado que la probabilidad de acceder a éste es baja, conllevando a la adquisición del "Tm1" en el período $t=3$.

Para los casos 2 y 3, $\Delta(a)$ no alcanza un valor mayor a cero, lo que puede interpretarse como una disminución en el atractivo de reemplazar el equipo en uso por el "Tm1" dado que la probabilidad de acceder al "Tm2", el cual ofrece beneficios superiores a la organización, es alta. A medida que la probabilidad p aumenta, el valor absoluto de la pendiente de $\Delta(b)$ se incrementa, mostrándose cada vez más vertical, mientras que la pendiente de $\Delta(a)$ disminuye, volviéndose más horizontal. Así, se evidencia que el incremento de la probabilidad de aparición del "Tm2" período a período, tiende a favorecer la decisión de esperar algunos períodos más con el tomógrafo en uso hasta que el "Tm2" esté disponible y se pueda proceder a adquirirlo.

6. Conclusiones

Las problemáticas de reemplazo de equipos están gobernadas por muchos factores, siendo cada caso muy particular en cuanto a la necesidad de migrar a una mejor tecnología. En el caso de equipos radiológicos puede decirse que la exigencia de tener los equipos en el nivel más óptimo es una necesidad, la cual se acrecienta por el incremento en la demanda, por presiones externas como clientes y competencia.

Desde hace más de seis décadas, varios autores han desarrollado diferentes propuestas para abordar el problema de reemplazo de activos sujetos a cambio tecnológico. Uno de los métodos más empleados para encararlo es la programación dinámica, brindando resultados con base en una serie de decisiones acertadas a lo largo de un horizonte determinado, donde la solución óptima en cada etapa es utilizada como variable de entrada de la etapa siguiente. Pero existen diferentes enfoques y métodos para atender un análisis de reemplazo, y es fundamental identificar primero los factores inductores de obsolescencia y de la necesidad de reemplazo, y posteriormente establecer que metodología cuantitativa o cualitativa es la más apropiada para el caso bajo estudio. Si la metodología elegida no considera los principales factores asociados a la decisión del reemplazo en el contexto analizado, se pueden implementar estrategias equivocadas.

La característica tecnológica más influyente en la obsolescencia tecnológica de los tomógrafos computarizados, es el mejoramiento de la capacidad para obtener imágenes de alta calidad con la utilización de la mínima dosis de radiación. Además de dichas entrevistas se conoció que en general, la principal barrera que encaran las entidades de este tipo para efectuar un reemplazo de equipos sofisticados como éste, es la disponibilidad de recursos, la cual está determinada tanto por el tamaño de la entidad como por sus objetivos.

La ejecución del modelo arrojó que la decisión óptima para este caso estudio es reemplazar en el año 4. Adicionalmente se apreció que la forma de la gráfica generada con los resultados de cada iteración, sigue los patrones descritos por los autores, es decir, se evidencia que los límites de la función tienen ambos un comportamiento monótono, uno no creciente y el otro no decreciente, y que además, a medida que se incrementan las iteraciones, ambos límites tienden a converger, lo cual garantiza que la decisión adoptada se mantenga en el infinito. Se observó que un aumento en la probabilidad de incursión de equipos mejorados conllevó a una prolongación de los períodos de reemplazo, debido a que el decisor tiende a preferir esperar a que el nuevo equipo aparezca para adquirirlo. Se puede apreciar que este resultado presenta similitudes con los hallazgos encontrados por Cheevaprawatdomrong y Smith en el cual se concluye que la aceleración en la introducción de tecnología conduce a períodos de reemplazo prolongados.

Mientras las probabilidades de incursión del "Tm2" permanezcan iguales al caso inicial, la decisión de reemplazar sólo se verá afectada si el reemplazo del "Tm0" por el "Tm1" deja de ser viable. Además, de acuerdo con el valor que genere el reemplazo, éste puede presentarse en un período de tiempo diferente al del caso original.

Si bien los resultados obtenidos a través de la ejecución de este modelo brindan una guía para la toma de decisiones, no se constituyen como imperativos para el curso a seguir. Este tipo de decisiones debe obedecer a los objetivos estratégicos y las necesidades de la compañía. Además, la vida útil de las tecnologías juega un papel importante a la hora de tomar decisiones alrededor del tópico de reemplazo; para el caso desarrollado en este proyecto, no se evidencian restricciones de este tipo dado que el período óptimo de reemplazo obtenido en el caso estudio (4 años) es menor al ciclo de vida de los tomógrafos, mínimo 8 años máximo 12 según el grado de utilización (Canadian Association for Radiologists, 2013).

Referencias bibliográficas

Adkins, R., y Paxson, D. (2017). Replacement decisions with multiple stochastic values and depreciation. *European Journal of Operational Research*, 257, 174–184.

Amankwah-Amoah, J. (2017). Integrated vs. add-on: A multidimensional conceptualisation

- of technology obsolescence. *Technological Forecasting & Social Change*, 116, 299–307.
- Blanco, G. (2014). *Obsolescencia tecnológica en equipos de imagen médica de la Comunidad Valenciana*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Bloch, H, Courvisanos, J., y Mangano, M. (2011). The Impact of Technical Change and Profit on Investment in Australian Manufacturing. *Review of Political Economy*, 23(3), 389 - 408.
- Clavareau J., y Labeau P. (2009). Maintenance and replacement policies under technological obsolescence. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 370 – 381.
- Cheevaprawatdomrong, T., y Smith, R. (2003). A Paradox in Equipment Replacement Under Technological Improvement. *Operations Research Letters*, 31(1), 77-82
- IQ4I Research & Consultancy (2014). Diagnostic Imaging Technologies Global Market: Forecast to 2020.
- Hartman, J.C. (2004). Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand. *European Journal of Operational Research*, 159, 145 – 165.
- Hartman J.C., y Tan C. H. (2014). Equipment replacement analysis: a literature review and directions for future research. *The Engineering Economist*, 59(2), 136-153.
- Li, S., Loulou, R., y Rahman, A. (2003). Technological progress and technology acquisition: strategic decision under uncertainty. *Production and Operations Management*, 12(1), 102 – 119.
- Mahfoud, H., El Barkany, A., y El Biyaali, A. (2016). Preventive Maintenance Optimization in Healthcare Domain: Status of Research and Perspective. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, Doi:10.1155/2016/5314312.
- Nair, S. (1995). Modeling Strategic Investment Decisions under Sequential Technological Change. *Management Science*, 41(2), 282 - 297.
- Nair, S., y Hopp, J. (1992). A Model for Equipment Replacement Due to Technological Obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 63(1), 207-221.
- Ortega, M. C., y Socolsky G. A. (2012). Godfrey Newbold Hounsfield: historia e impacto de la tomografía computada. *Revista Argentina de Radiología*, 76(4), 331- 341
- Polisena, J., Jutai, J., y Chreyh, R. (2014). A proposed framework to improve the safety of medical devices in a Canadian hospital context. *Medical Devices: Evidence and Research*, 7, 139 – 147.
- Rawashdeh, M., Alnajdawi, S., y Ababneh, M. (2014). Applying Fuzzy Approach in Medical Devices, Maintenance System: a Case study in Jordan. *International Journal of Advance Computer Technology*, 2(3), 100-104.
- Rahman, A., y Loulou, R. (2001). Technology acquisition with technological progress: effects of expectations, rivalry and uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 129, 159 – 185.
- Reyes, F., Vivas, D., y Guadalajara, N. (mayo, 2011). Cálculo de la Previsión de Obsolescencia Tecnológica de los Equipos de Tomografía computarizada. *XXXI Jornadas de Economía de la Salud*, Palma de Mallorca, España
- Richardson, S., Kefford, A., y Hodkiewicz, M. (2013). Optimised asset replacement strategy in the presence of lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 141 (2), 659 - 667.
- Schochetman, I., y Smith, R. (2007). Infinite horizon optimality criteria for equipment replacement under technological change. *Operations Research Letters*, 35(1), 485-492.
- Sloan, T. (2011). Green renewal: incorporating environmental factors in equipment replacement decisions under technological change. *Journal of Cleaner Production*, 19, 173 – 186.
- Yatsenko, Y., y Hritonenko, N. (2011). Economic life replacement under improving technology. *International Journal of Production Economics*, 133, 596 – 602.

anabella.pabon@correounivalle.edu.co

2. Ingeniera Industrial. Universidad del Valle. lizeth-gaviria@hotmail.com

3. Ingeniera Industrial. Universidad del Valle. ange-wd@hotmail.com

4. Doctor en Ingeniería Industrial. Profesor Asociado. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad del Valle.
juan.bravo@correounivalle.edu.co

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 39 (Nº 26) Año 2018

[Índice]

[En caso de encontrar un error en esta página notificar a [webmaster](#)]

©2018. revistaESPACIOS.com • ®Derechos Reservados