

Determinación de una política de reemplazamiento preventivo óptima para los “Bladders” usados en prensas vulcanizadoras de cauchos

A preventive replacement policy determination for the “bladders” used in curing presses tires

Jorge Piña

Palabras Clave: Reemplazamiento preventivo, tiempo de falla, costos por fallas, costos planificados.

KeyWords: Preventive replacement, failure time, failure costs, planned costs.

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre la determinación de una política de reemplazamiento preventivo, para los “bladders” (bolsa o vejiga de goma en cuyo interior circula vapor de agua durante el proceso de vulcanización de los cauchos) utilizados en las prensas vulcanizadoras Krupp de cauchos radiales en una empresa cauchera venezolana y tiene como objetivo principal establecer una política de reemplazamiento preventivo asociada con el menor costo de operación. Para ello, se analizaron tres políticas de reemplazamiento, las cuales fueron: 1) Reemplazamientos Preventivos por Edad, basada en un tiempo de reemplazamiento de 70.0 horas (Política Actual); 2) Reemplazamientos Preventivos por Edad, basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, tp^* (Propuesta 1); 3) Reemplazamientos Preventivos en Bloque, basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, tp^* (Propuesta 2). Los resultados obtenidos indican que la política de reemplazamiento actualmente utilizada por la empresa (Política Actual), no es la de menor costo (659.13 Bs/hr), por lo tanto se recomendó a la empresa sustituirla por la política de la Propuesta 1, que ocasiona el menor costo esperado (656.10 Bs/hr) y la cual establece reemplazar cada “bladder” después de 65

horas efectivas de uso o lo que es equivalente a cambiarlo cuando se hayan completado 279 cargas.

ABSTRACT

The present research deals with the determination of a preventive replacement policy for “bladder” (bag or rubber bladder inside which circulates steam during vulcanization of tires) used in curing presses Krupp radial tires in a Venezuelan tire factory and its main goal is to establish a policy of preventive replacement associated with the lowest operating cost. Three replacement policies were analyzed: 1) Age Preventive Replacements, after 70.0 hours, (Current Policy); 2) Age Preventive Replacements, based on an optimal replacement time, tp^* , (Proposal 1); 3) Block Preventive Replacements, based on an optimal replacement time, tp^* , (Proposal 2). The results indicate that policy of replacement currently used by the company (Current Policy), is not the least cost (659.13 Bs per hour), therefore it was recommended to the company to use Proposal 1, which brings the lowest expected cost (656.10 Bs per hour) and which states to replace each “bladder” after 65 hours of actual use or its equivalent to change after completion 279 loads.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la necesidad de reducir los costos de producción en cualquier tipo de empresa de manufactura, ha hecho que la toma de decisiones sea cada vez más cuidadosamente analizada y fundamentada en informaciones lógicas y verificables. Es por ello que analizando la Política de Reemplazamiento Preventivo actualmente aplicada para el reemplazo de los “bladders”

(Bolsa o vejiga de goma en cuyo interior circula vapor de agua durante el proceso de vulcanización de los cauchos) utilizados en las prensas vulcanizadoras Krupp de cauchos radiales en una empresa cauchera venezolana, se observó que el tiempo de reemplazamiento (70.0 horas), no es el adecuado ya que en la realidad los “bladders” se están rompiendo mucho antes de que transcurra éste tiempo y por lo tanto el costo de operación se ha ido incrementando debido a que el costo de

cambiar un "bladders" mediante un reemplazamiento por falla es mayor que el de un reemplazamiento planificado. Por tal razón, el presente trabajo trata sobre la "Determinación de una Política de Reemplazamiento Preventivo Óptima para los "bladders" usados en las prensas Krupp vulcanizadoras de cauchos" y tiene como

objetivo primordial comprobar que si se cambia la política actual de reemplazamiento preventivo por una que esté basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, t_p^* , se minimizarán los costos esperados por reemplazamiento de "bladders" y obviamente se reducirán los costos totales de producción.

BASES TEÓRICAS

Modelos de reemplazamientos preventivos

Una política de reemplazamiento preventivo establece el reemplazo de partes, componentes o equipos que experimentan desgaste sin importar su estado al cabo de un tiempo, t_p , con la finalidad de minimizar el Costo Esperado de Reemplazamiento por Unidad de Tiempo de Uso. Esto se logra desarrollando algunos modelos matemáticos que balanceen los costos incurridos cuando hay un reemplazamiento de un componente bajo condiciones no programadas (por falla) contra aquellos costos en que se incurren cuando se efectúa un reemplazamiento preventivo. Los problemas de reemplazamientos preventivos pueden clasificarse en dos grandes grupos (Graterol, 1979, p.1; Piña, 1994, p.17):

1. **Determinísticos;** en donde el tiempo de la acción de reemplazamiento se conoce con certeza
2. **Probabilísticos;** en donde el tiempo de la acción de reemplazamiento depende del azar, pudiendo describirse el equipo como bueno o malo. Desde el punto de vista probabilístico (en nuestro caso), existen dos modelos básicos de reemplazamiento preventivo, conocidos, como: Modelo de Reemplazamiento por Edad y Modelo de Reemplazamiento en Bloque.

Modelo de Reemplazamiento por Edad

Según éste modelo, si un equipo o componente alcanza un tiempo de funcionamiento especificado, t_p , éste es reemplazado. Si el equipo falla antes de alcanzar el tiempo especificado, se reemplaza

inmediatamente y el nuevo equipo es programado para un reemplazamiento de acuerdo con las reglas antes descritas. Cuando se utiliza ésta política es necesario llevar registros del tiempo de funcionamiento de cada equipo que está en operación y también se debe mantener una supervisión continua para detectar cualquier falla que pueda ocurrir antes del reemplazamiento planificado. Es importante señalar que se asumirá que la razón de falla, $h(t)$, es estrictamente creciente con tiempo y que el costo de reemplazamiento después de una falla, C_f , es mayor que el costo de un reemplazamiento antes de fallar, C_p . Este modelo a su vez puede desarrollarse de dos posibles maneras, una considerando despreciables los tiempos de reemplazamientos (por falla y planificado), es decir, reemplazamientos instantáneos y otra tomando en cuenta dichos tiempos, llamada reemplazamientos no instantáneos; debido a que en éste trabajo se utilizará el modelo con Reemplazamientos Instantáneos, a continuación se desarrolla detalladamente éste modelo.

Reemplazamientos Instantáneos

El objetivo consiste en determinar la edad óptima de reemplazamiento preventivo del equipo, t_p^* , tal que el Costo Total Esperado de Reemplazamiento por Unidad de Tiempo sea mínimo, $L(t_p^*)$ (Wallace et al, 2000). En la construcción del modelo se usará la siguiente notación:

C_p = Costo unitario de reemplazamiento preventivo.

C_f = Costo unitario de reemplazamiento por falla.

T = Variable aleatoria que representa el tiempo de falla del equipo.

$f(t)$ = Función de densidad de la variable aleatoria T .

$F(t) = P(T \leq t)$ = Función de distribución acumulada de la Variable aleatoria T

$$h(t) = \text{Razón de falla} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

En éste modelo se presentan dos posibles ciclos de operación, uno determinado por el equipo que alcanza su edad de reemplazamiento planificado, t_p , y el otro determinado por el equipo que deja de funcionar debido a la ocurrencia de una falla antes del tiempo de cambio programado.

Una medida de la efectividad de una política de reemplazamiento sobre un período ilimitado de tiempo, es la relación entre el Costo Esperado de Reemplazamiento por Unidad, $E(Q)$, y el Tiempo Esperado de Uso por Unidad, $E(S)$, ya que ésta relación representa el Costo Promedio por Unidad de Tiempo de Uso, $L(t_p)$, y según Tobías y Trindade (2012); O'Connor (2010); Dhillon (1999) y Graterol (1979) se expresa de la siguiente forma:

$$L(t_p) = \frac{E(Q)}{E(S)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$$E(Q) = C_p [1 - F(t_p)] + C_f F(t_p) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$E(S) = t_p [1 - F(t_p)] + \int_0^{t_p} t f(t) dt \quad (\text{Ecuación 3})$$

Sustituyendo la ecuación 2 y la ecuación 3 en la ecuación 1, se tiene:

$$L(t_p) = \frac{C_p [1 - F(t_p)] + C_f F(t_p)}{t_p [1 - F(t_p)] + \int_0^{t_p} t f(t) dt} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Se ha demostrado que para distribuciones con razones de falla, $h(t)$, estrictamente creciente, existe una solución única para la ecuación 4; entonces, habrá un valor de $t_p = t_p^*$ para el cual ésta ecuación alcanza su mínimo, $L(t_p^*)$. Una representación gráfica de t vs $L(t)$ se comporta como se ilustra en la figura 1, donde se puede observar que cuando $t \rightarrow \infty$, la curva se hace asintótica con respecto a C_f / μ , es decir, que de la ecuación 4 se tendría que

$$L(\infty) = C_f / \mu$$

Lo cual viene a ser el Costo por Unidad de Tiempo cuando los reemplazamientos se hacen sólo si hay fallas. El valor de μ vendría a ser el Valor Esperado del Tiempo de Funcionamiento del equipo.

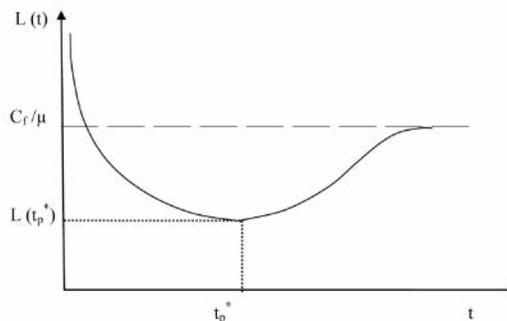


Figura 1: Representación gráfica de t vs $L(t)$.

Modelo de Reemplazamiento en Bloque

Según éste modelo, todos los componentes de un mismo tipo que cumplan funciones similares son reemplazados simultáneamente en los tiempos $K t_p$ ($K=1, 2, 3, \dots$), independientemente de la historia de falla del componente; se asume que los componentes que fallan son reemplazados en el momento en que se presentan las fallas. Esta política es más práctica que la de Reemplazamiento por Edad, ya que no requiere mantener registros del uso de los componentes. El desarrollo del modelo consiste en determinar un intervalo óptimo entre reemplazamientos preventivos de manera que sea mínimo el Costo Total Esperado de Operación por Unidad de Tiempo, el cual será denotado por $L(t_p)$ y se determinará mediante la siguiente expresión matemática (Graterol, 1979, p.69; Piña, 1994, p.21):

$$L(t_p) = \frac{\text{Costo Total Esperado en el Intervalo } (0; t_p)}{\text{Longitud del Intervalo}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

Costo Total Esperado en el Intervalo $(0; t_p)$ = Costo de un Reemplazamiento Preventivo + Costo Esperado de Reemplazamientos por Falla = $C_p + C_f H(t_p)$

Siendo $H(t_p)$, el Número Esperado de Fallas en el Intervalo $(0; t_p)$ y t_p igual a la Longitud del Intervalo. Por lo tanto la Ecuación 5 puede denotarse como:

$$L(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (\text{Ecuación 6})$$

El período óptimo de reemplazamiento será aquel valor tp^* para el cual la ecuación 6 alcanza su mínimo.

El Número Esperado de Fallas en el Intervalo $(0; tp)$, $H(tp)$, también llamada Función de Renovación puede ser determinado utilizando la siguiente expresión matemática (Cox, 1962; Smith y Leadbetter, 1963):

$$H(T) = \sum_{i=0}^{T-1} [1 + H(T-i-1)] \int_i^{i+1} f(t) dt$$

(Ecuación 7)

Donde:

T = Variable aleatoria continua que representa el tiempo de falla del equipo.

$f(t)$ = Función de densidad de la variable aleatoria T .

La ecuación 7 es una relación recurrente, ya que si se conoce que $H(0)$, se pueden ir obteniendo los valores de $H(1)$, luego $H(2)$, luego $H(3)$, y así sucesivamente.

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El procedimiento empleado para la solución de este problema, se llevó a cabo de la siguiente manera:

Para la recolección de los datos de tiempos de fallas, se seleccionó una muestra de tres prensas que tuvieran cada una un ciclo diferente, esto se hizo basado, en que las medidas de cauchos que generalmente se procesan en éste tipo de prensas Krupp tienen tres diferentes ciclos de vulcanización (distintas cargas por hora).

Con los datos de los tiempos de fallas, se realizó una prueba de Hipótesis de Homogeneidad para ver si las tres poblaciones, correspondientes a las tres prensas seleccionadas, eran idénticas.

Una vez comprobada la homogeneidad de las poblaciones, es decir que están idénticamente distribuidas, se ordenaron las observaciones del tiempo de falla, t_i , en forma ascendente (de menor a mayor) y luego se realizó una prueba de Bondad de Ajuste, para identificar la Distribución de Probabilidades apropiada que representa el tiempo de falla de los "bladders".

Conocida ésta Distribución se determinó el Costo Mínimo asociado a cada una de las políticas de Reemplazamientos Preventivos que serán analizadas en la presente investigación.

Por último, se compararon los costos asociados a cada política y con base a ellos se tomó la decisión de recomendar a la empresa la que ocasiona el menor costo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recolección de datos de los tiempos de fallas

A continuación en las tablas 1, 2 y 3, se muestran en la primera columna el orden en que ocurrieron las fallas; en la segunda columna el número de cargas vulcanizadas antes de fallar el "bladder"; en

la tercera columna la capacidad de producción de la prensa en cargas por hora, según la medida producida; en la cuarta columna el tiempo de falla del "bladder", resultante de dividir el número de cargas entre la capacidad de producción; y en la quinta y última columna se describe la cavidad o molde donde ocurrió la falla.

Tabla 1: Tiempos de fallas.

Prensa No. 5 Medida: 235/70R-15 BB Ciclo de vulcanización: 15 min/carga

Falla No.	Número de Cargas	Capacidad (cargas/hora)	Tiempo de falla (horas)	Cavidad
1	200	4.00	50.0	L9
2	258	4.00	64.5	L10
3	279	4.00	69.8	L9
4	284	4.00	71.0	L10
5	198	4.00	49.5	L9
6	256	4.00	64.0	L10

Tabla 2: Tiempos de fallas.

Prensa No. 7 Medida: 165/70R-13 Ciclo de vulcanización: 13 min/carga

Falla No.	Número de Cargas	Capacidad (cargas/hora)	Tiempo de falla (horas)	Cavidad
1	274	4.61	59.4	L14
2	276	4.61	59.8	L13
3	237	4.61	51.4	L14
4	288	4.61	62.4	L13
5	287	4.61	62.2	L14
6	286	4.61	62.0	L13

Tabla 3: Tiempos de fallas

Prensa No. 10 Medida: 225/75R-15 BN Ciclo de vulcanización: 14 min/carga

Falla No.	Número de Cargas	Capacidad (cargas/hora)	Tiempo de falla (horas)	Cavidad
1	183	4.29	42.7	L20
2	296	4.29	69.0	L19
3	181	4.29	42.2	L20
4	307	4.29	71.6	L19
5	284	4.29	66.2	L20
6	274	4.29	63.9	L19

Prueba de Hipótesis de Homogeneidad

En la tabla 4, se muestra la información referida a los tiempos de falla, en horas, presentados en el mismo orden en que ocurrió cada falla (ver tablas 1, 2 y 3).

Tabla 4: Tiempos de fallas en el orden en que ocurrieron, en horas.

Falla No.	Prensa		
	No. 5	No. 7	No. 10
1	50.0	59.4	42.7
2	64.5	59.8	69.0
3	69.8	51.4	42.2
4	71.0	62.4	71.6
5	49.5	62.2	66.2
6	64.0	62.0	63.9

En éste caso las hipótesis serán:

$H_0: F_1(X) = F_2(X) = F_3(X)$ para todo X

$H_1: \text{No todas son iguales.}$

Donde $F_1(X)$, $F_2(X)$ y $F_3(X)$ denotan las distribuciones acumuladas de las tres poblaciones.

Para conducir la prueba se hizo uso de la Prueba de Kruskal – Wallis en la cual cada una de las

observaciones es reemplazada por un “número de orden”.

El estadístico que se usa para ésta prueba es:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

(Ecuación 8)

Donde:

k = Número de muestras.

n_j = Número de observaciones de la j-ésima muestra.

N = $\sum_j n_j$ = Número de observaciones en todas las muestras combinadas.

R_j = Suma de los números de orden en la j-ésima muestra.

La regla de decisión para un nivel de significación α es:

Si $H < X_{k-1, 1-\alpha}^2$ → Aceptar H₀

Si $H \geq X_{k-1, 1-\alpha}^2$ → Rechazar H₀

En nuestro caso:

$$k = 3$$

$$n_1 = 6; n_2 = 6; n_3 = 6$$

$$N = 18$$

$$R_1 = 65; R_2 = 45; R_3 = 61$$

De la ecuación 8, se obtiene:

$$H = \left[\frac{12}{18 \cdot 19} (704.17 + 337.50 + 620.17) \right] - 57 = 1.31$$

Para un $\alpha = 0.05$, se tiene que según la tabla Chi-cuadrado; $X_{2, 0.95}^2 = 5.99$. En consecuencia,

$$H = 1.31 < X_{2, 0.95}^2 = 5.99$$

por lo que se acepta H₀, es decir, que las variables que representan los tiempos de fallas de las prensas No. 5, No. 7 y No. 10, están idénticamente distribuidas (existe homogeneidad).

Determinación de la Función de Distribución del tiempo de falla de los "bladders"

Como ya se probó que las tres poblaciones (prensas No. 5, No. 7 y No. 10) son homogéneas, se procedió a realizar la Prueba de Bondad de Ajuste, para ello se utilizó el programa de computación STATGRAPHICS Plus Versión 5.1, donde se obtuvo que para un nivel de significación $\alpha = 0.05$, se puede afirmar que los tiempos de fallas de los "bladders" siguen una Distribución Weibull con parámetros:

$$\alpha = \text{Parámetro de Escala} = 63,76$$

$$\beta = \text{Parámetro de Forma} = 8,73$$

$$\mu = \text{Media} = 60,08$$

$$\delta = \text{Desviación Típica} = 9,19$$

Determinación del costo de las políticas planteadas

Antes de determinar el costo de las políticas de Reemplazamientos Preventivos planteadas, primeramente es necesario calcular:

a.- Costo de Reemplazamiento por Falla (C_f)

b.- Costo de Reemplazamiento Planificado (C_p)

A.- Cálculo del Costo de Reemplazamiento por Falla (C_f):

La fórmula que se utiliza para determinar este costo es:

$$C_f = C_a + C_b + C_c \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

C_a = Costo de mano de obra por tiempo perdido.

C_b = Costo de caucho scrap.

C_c = Costo de reposición del "bladder".

En nuestro caso:

$$C_a = \text{Costo de mano de obra} \times \text{Tiempo perdido} \times \text{Proporción de prensas atendidas} = 175 \text{ Bs/hr} \times 1.41 \text{ hr} \times 1/10 = 24.68 \text{ Bs.}$$

$$C_b = \text{Cantidad de cauchos scrap} \times \text{Costo del caucho verde} \times \text{Número de componentes} = 1 \text{ caucho} \times 2051.04 \text{ Bs/caucho} \times 2 = 4102.08 \text{ Bs.}$$

$$C_c = (\text{Costo del bladder} + \text{Costo de m.o usada en cambio}) \times \text{Número de componentes} = (17875.47 \text{ Bs} + 170.62 \text{ Bs/hr-hb} \times 0.312 \text{ hr-hb}) \times 2 = 35857.40 \text{ Bs.}$$

En consecuencia,

$$C_f = 24.68 + 4102.08 + 35857.40 = 39984.16 \text{ Bs.}$$

B.- Cálculo del Costo de Reemplazamiento Planificado (C_p):

La fórmula que se usa para determinar este costo es la misma que se utilizó en el cálculo del Costo de Reemplazamiento por Falla (Ecuación 9), pero en este caso se tiene que:

$$C_a = 175 \text{ Bs/hr} \times 0.62 \text{ hr} \times 1/10 = 10.85 \text{ Bs.}$$

$$C_b = 0$$

$$C_c = (17875.47 \text{ Bs} + 170.62 \text{ Bs/hr-hb} \times 0.312 \text{ hr-hb}) \times 2 = 35857.40 \text{ Bs.}$$

Por tanto,

$$C_p = 10.85 + 0 + 35857.40 = 35868.25 \text{ Bs.}$$

Conocidos estos costos, ahora si se procede a evaluar cada una de las Políticas de Reemplazamientos Preventivos que serán objeto de estudio, las cuales son:

Reemplazamientos Preventivos por Edad, basada en un tiempo de reemplazamiento de 70.0 horas (Política Actual).

Reemplazamientos Preventivos por Edad, basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, t_p^* , (Propuesta 1).

Reemplazamientos Preventivos en Bloque, basada en un tiempo óptimo, t_p^* , (Propuesta 2).

Determinación del costo de la Política Actual:

Actualmente se está aplicando una Política de Reemplazamiento Preventivo por Edad, basada en un tiempo de reemplazamiento de 70.0 horas (300 cargas); el costo asociado a ésta política de acuerdo a la ecuación 4 es:

$$L(70) = \frac{35988.25 \left[e^{-\frac{70}{60.08}} \right] + 39984.16 \left[e^{-\frac{70}{60.08}} \right]}{70 \left[e^{-\frac{70}{60.08}} \right] + \int_0^{70} c \left(\frac{t}{60.08} \right) \left(\frac{t}{60.08} \right)^{2.73} e^{-\frac{t}{60.08}} dt}$$

$$= \frac{345.00 + 35809.41}{7.31 + \left[\frac{3.73}{60.08} \right] \int_0^{70} t^{2.73} e^{-\frac{t}{60.08}} dt}$$

El valor de la integral fue calculado mediante una calculadora científica Casio fx-570 ES; introduciendo este valor en la ecuación anterior se tiene:

$L(70)$ = Costo asociado a la Política Actual = 659.13 Bs/hr.

Una medida de la eficiencia de una política de reemplazamiento preventivo es la relación (Bloom, 2006; Kececioglu, 1991; Meeker y Escobar, 2000):

$$\epsilon(t^*) = \frac{L(t^*)}{C_f/\mu} \times 100 \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

$\epsilon(t^*)$ = Eficiencia de la política.

t^* = Tiempo óptimo de reemplazamiento = 70.0 hrs.

$L(t^*)$ = Costo asociado a la política = 659.13 Bs/hr.

C_f = Costo de reemplazamiento por Falla = 39984.16 Bs.

μ = Valor esperado del tiempo de funcionamiento del bladder = 60.08 hrs.

Luego, para ésta política se tendría:

$\epsilon(t^*) = 99.04 \%$.

Este valor significa que los costos de operación en que se incurre al seguir ésta política son el 99.04 % de aquellos costos en los cuales se incurriría si se hiciera el reemplazamiento sólo cuando ocurriera una falla, es decir, que cuanto menor sea ésta eficiencia mejor es la política con respecto a reemplazar sólo cuando hay falla.

Determinación del costo de la Política de la Propuesta 1:

La Política de la Propuesta 1, al igual que la Política Actual, consiste en una Política de Reemplazamiento por Edad, pero basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, t_p^* , el cual está asociado con el costo mínimo. Este costo y así como también el tiempo de reemplazamiento, t_p^* , son calculados utilizando un Método de Tanteo (Abernethy, 2006; Martinez y Figueroa, 1991) el cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5:

Determinación del costo óptimo de la política de la Propuesta 1.

t_p	$\int_0^{t_p} t f(t) dt$	$L(t)$
50	5,05	735.33
55	11.78	688.30
60	23,5	662.89
65	39,11	656.10 **
66	42,23	656.20
70	52,70	659.13
75	59,07	662.43

Como se observa en ésta tabla 5, el menor valor de $L(t)$, es de 656.10 y se obtiene para un valor de t_p de 65, esto significa que:

$L(t_p^*)$ = Costo de la Política de la Propuesta 1 = 656.10 Bs/hr.

t_p^* = Tiempo de Reemplazamiento Óptimo = 65 hrs. (279 cargas)

Procediendo de igual manera que la política anterior se tiene que:

Eficiencia = $\epsilon(65) = 98.58 \%$, es decir, que los costos son el 98.58 % de aquellos costos en que se incurrirían si se hiciera el reemplazamiento sólo cuando ocurriera una falla.

Determinación del costo de la Política de la Propuesta 2:

La Política Propuesta 2, consiste en una Política de Reemplazamiento en Bloque, basada en un tiempo de reemplazamiento óptimo, t_p^* , el cual está asociado al costo mínimo. Tanto el costo mínimo, $L(t_p^*)$, como el tiempo de reemplazamiento óptimo, t_p^* , son calculados utilizando un programa de computación desarrollado en la propia empresa. Mediante éste programa se determinó que:

$L(t_p^*) =$ Costo de la Política de la Propuesta 2 = 708.91 Bs/hr.

$t_p^* =$ Tiempo de Reemplazamiento Óptimo = 53.41 hrs (229 cargas).

En éste caso se tiene que:

Eficiencia = $\epsilon(53.41) = 106.52\%$, lo cual significa que ésta política resulta ser un 6.52 % más costosa que la de reemplazar el bladder sólo cuando falla.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Antes de determinar los costos esperados de las Políticas de Reemplazamientos Preventivos analizadas en éste estudio, fue necesario calcular el Costo de Cambio de bladder debido a falla (C_f) y los Costos de Cambio de bladder debido a un reemplazamiento planificado (C_p). Según los resultados obtenidos se puede afirmar que el Costo por Cambio de bladder debido a falla ($C_f = 39984.16$ Bs) siempre será mayor que el Cambio de bladder planificado ($C_p = 35868.25$ Bs).

Analizando los resultados obtenidos se puede concluir que la política de reemplazamiento actualmente utilizada por la empresa no es la más económica (659.13 Bs/hr), por lo tanto se recomienda sustituirla por la política que ocasiona el menor costo esperado (656.10 Bs/hr), la cual consiste en reemplazar cada bladder después de 65 horas efectivas de uso o lo que es lo mismo cuando haya completado 279 cargas (Propuesta 1). Esto representaría un ahorro de 19343.52 Bs/año.

Una medida de la eficiencia de una política de reemplazamiento preventivo es la relación:

$$\epsilon(t_p^*) = \frac{L(t_p^*)}{C_f/\mu} \times 100$$

En nuestro caso según la política recomendada se tiene $\epsilon(65) = 98.58\%$, éste valor significa que los costos de operación en que se incurre al seguir ésta política son el 98.58 % de aquellos costos en los cuales se incurriría si se hiciera el reemplazamiento sólo cuando ocurriera una falla (665.55 Bs/hr), es

decir, que se tendría un ahorro de 1.42 %, lo cual si la empresa trabaja 266 días/año representaría 60333.97 Bs/año.

Se le recomienda a la empresa ejercer un estricto control en la aplicación de ésta política, de tal manera que si el bladder falla antes de alcanzar el tiempo especificado se reemplace inmediatamente y el nuevo bladder sea programado para un reemplazamiento de acuerdo al tiempo estipulado en la política seleccionada.

Debido a que el ahorro obtenido es relativamente pequeño (60333.97 Bs/año) y considerando dos factores tales como el alza continua del precio de los bladders y la mayor atención y control de los registros por parte de la supervisión (lo cual le quita tiempo para dedicarlo a otras actividades), se recomienda a la empresa analizar a corto plazo (mediante un análisis de sensibilidad), la alternativa de reemplazar los bladders únicamente cuando fallen para ver si con el tiempo ésta alternativa resulta la más económica y por ende la más conveniente para la empresa.

Debido a su forma más sencilla y razonable de manejar, se recomienda utilizar el método de Aproximación Discreta en lugar de la Teoría de Renovación, cuando se trabaje con una Política de Reemplazamiento Preventivo en Bloque.

Cuando se aplica una Política de Reemplazamiento en Bloque, generalmente el costo esperado, $L(t_p)$, oscila, por lo que puede haber más de un mínimo local para $L(t_p)$; cuando esto sucede se debe tomar como mínimo, $L(t_p^*)$, aquel valor que esté dentro de los límites posibles de operación (tiempo de vida) del ítem o equipo en estudio.

REFERENCIAS

- Abernethy, R. (2006). *The New Weibull Handbook. Reliability and Statistical for Predicting Life, Safety, Risk, Cost and Warranty Claims. Fifth Edition.* Published and Edited by Robert Abernethy, 536 Oyster Road; North Palm Beach, Florida. USA.
- Bloom, N. (2006). *Reliability Centered Maintenance (RCM). Implementation Made Simple.* USA: McGraw-Hill Companies.
- Cox, D.R. (1962). *Renewal Theory.* USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Dhillon, B.S. (1999). *Design Reliability Fundamentals and Applications.* USA: CRC Press.
- Díaz, A. y Perdomo, R. (1984). *Manual de Confiabilidad en Mantenimiento.* C.A Metro de Caracas. Venezuela.
- Graterol, R. (1979). *Políticas de Reemplazamientos Preventivos.* Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Graterol, R. y Rivas, A. (1984). *Análisis Estadístico de Tiempos de Fallas.* Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Kececioglu, D. (1991). *Reliability Engineering Handbook.* USA: Prentice Hall, Inc.
- Martinez, C. y Figueroa, R. (1991). *Diseño de un Sistema de Mantenimiento Preventivo para la Empresa Madosa.* Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Meeker, W. y Escobar, L. (2000). *Statistical Methods for Reliability Data.* John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nash, F.R. (1999). *Estimating Device Reliability: Assessment of Credibility.* Published and Edited by Kluwer Academic Publishers. USA.
- O'Connor, P. D.T. (2010). *Practical Reliability Engineering. Fourth Edition.* USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Piña, J. (1994). *Determinación de una Política de Reemplazamiento Preventivo Óptima para los "Bladders" Usados en Prensas Vulcanizadoras de Cauchos.* Tesis de Maestría en Ingeniería Industrial no publicada. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Smith, W.L y Leadbetter, M.R. (1963). *On the Renewal Function for the Weibull Distribution.* USA: Technometrics, Vol. 5, No 3.
- Tobías, P.A. y Trindade, D. (2012). *Applied Reliability . Third Edition.* USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Ushakov, L.A y Harrison, R.A. (1994). *Handbook of Reliability Engineering.* USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Wallace, R; Blischke, D.N. y Prabhakar, M. (2000). *Reliability Modeling Prediction and Optimization.* USA: John Wiley & Sons, Inc.

Autor

Jorge Piña. Ingeniero Industrial. Escuela de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Estado Carabobo. Venezuela.
E-mail: jgpinag@hotmail.es

Recibido: 13/05/2014

Aceptado: 30/06/2014