

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO.**

**FACULTAD DE INGENIERÍA.**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.**

**“SISTEMA PARA LA SELECCIÓN OPTIMIZADA DE LA POLÍTICA  
DE INVENTARIO DE REPUESTOS CRÍTICOS MINIMIZANDO EL  
COSTO DEL CICLO DE VIDA USANDO UNA METAHEURÍSTICA”**

**Memoria para optar al Título de:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**ALUMNO : ARTURO ESTEBAN CARRASCO ESPINOZA.**

**PROFESOR GUIA : ORLANDO MAURICIO DURÁN ACEVEDO.**

**PROFESOR CO-GUIA: RIGOBERTO JOSÉ GUARDIA DÍAZ.**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Al encontrarme en esta etapa de mi vida que ya se termina, quiero agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible que mi paso por la Universidad sea satisfactorio y provechoso para el futuro.

También agradecer a todas las personas que constituyen la hermosa Escuela de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, en especial al docente Ing. Don Orlando Mauricio Durán Acevedo por darme la posibilidad de realizar en conjunto mi trabajo de título, por su simpatía, paciencia, consejos y profesionalismo, muchas gracias.

Por último, y más importante reconocer que sin mis padres, mi familia y Valeria, nada de esto habría sido posible, gracias por su apoyo en todo momento, consejos y su motivación para emprender y terminar ésta, y otras etapas de mí vida.

Para todos ustedes, dedico este trabajo.

## ÍNDICE.

<b>INTRODUCCIÓN.</b> .....	7
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.</b> .....	9
1.1    Objetivos. ....	10
1.1.1    Objetivos generales. ....	10
1.1.2    Objetivos específicos. ....	10
1.2    Justificativa. ....	11
1.3    Contexto. ....	11
<b>2. MARCO TEÓRICO.</b> .....	12
2.1    Ciclo de vida de la gestión de activos físicos. ....	12
2.2    La distribución de Weibull. ....	14
2.3    Tipos de mantenimiento. ....	18
2.3.1    Mantenimiento de conservación. ....	18
2.4    Políticas de inventario. ....	18
2.4.1    Política de revisión continua. ....	19
2.4.2    Política de revisión periódica. ....	19
2.5    Costeo basado en actividades. ....	20
2.5.1    Terminología del sistema de costeo basado en actividades. ....	22
2.6    Costeo del ciclo de vida de un activo físico. ....	23
2.7    Costeo del ciclo de vida de un activo físico basado en actividades. ....	24
2.8    Metaheurísticas en la optimización. ....	25
2.8.1    Algoritmos genéticos. ....	27
<b>3. ELABORACIÓN DEL MODELO.</b> .....	37
3.1    Costo logístico. ....	37

3.1.1	Actividades, recursos y repuestos.....	37
3.1.2	Influencia de la tasa de falla en la destinación de los recursos.....	41
3.1.3	Influencias sobre la política de revisión continua.....	42
3.1.4	Influencias sobre la revisión periódica. ....	43
3.1.5	Tamaño de lote en las ejecuciones.....	43
3.2	Costo directo. ....	44
3.3	Costo de almacenamiento. ....	45
3.4	Costo global de la gestión. ....	46
3.5	Optimización del modelo. ....	46
4.	<b>ALGORITMOS GENÉTICOS EN MATLAB.....</b>	<b>48</b>
4.1	implementación del modelo en matlab. ....	49
4.2	Resultados generales de Weibull. ....	53
4.2.1	Resultados del método exhaustivo en revisión continua. ....	54
4.2.2	Resultados del método exhaustivo en revisión periódica. ....	60
4.2.3	Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.....	64
4.2.5	Conclusiones de la implementación de los modelos. ....	71
5.	<b>EXPERIMENTOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
5.1	Experimento 1: Método de los divisores.....	73
5.1.1	Conclusiones del método divisor.....	77
5.2	Experimento 2: Influencias económicas sobre el costo global de la gestión. ....	77
5.2.1	Caso original.....	77
5.2.2	Variación de la tasa de interés ( $t_i$ ).....	81
5.2.3	Variación del costo de ejecutar un pedido ( $CQ$ ).....	83
5.2.4	Variación del costo de los recursos anuales ( $Cr$ ).....	85
5.3	Experimento 3: Varios tipos de repuestos.....	86

5.3.2	Resultados generales de Weibull. ....	91
5.3.3	Resultados del método de búsqueda exhaustivo en revisión continua. ....	92
5.3.4	Resultados del método exhaustivo en revisión periódica. ....	95
5.3.5	Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.....	98
5.3.6	Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión periódica. ....	102
5.3.7	Conclusiones.....	105
5.4	Experimento 4: Gran cantidad de repuestos.....	106
5.4.1	Resultados generales de Weibull. ....	109
5.4.2	Resultados del método de búsqueda exhaustiva en revisión continua.....	111
5.4.3	Resultados del método exhaustivo en revisión periódica. ....	112
5.4.4	Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.....	113
5.4.5	Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión periódica. ....	115
5.4.6	Conclusiones.....	116
5.5	Experimento 5: Cinco configuraciones de operadores genéticos. ....	116
5.5.1	Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 1.....	118
5.5.2	Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 2.....	119
5.5.3	Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 3.....	121
5.5.4	Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 4.....	122
5.5.5	Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 5.....	124
5.6	Experimento 6: Restricción del stock medio valorizado.....	129
5.6.1	Resultados.....	129
5.6.2	Conclusiones.....	131
6.	<b>CONCLUSIONES.</b> ....	132
7.	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	134
	<b>ANEXOS.</b> .....	135

Anexo 1: Terminología.....	135
Anexo 2: Resultado generales de Weibull.....	136
Anexo 3: Código de búsqueda exhaustiva, política de revisión continua. ....	140
Anexo 3: Código de búsqueda exhaustiva, política de revisión periódica. ....	143
Anexo 4: Código de los algoritmos genéticos, política de revisión continua.....	147
Anexo 5: Código de los algoritmos genéticos, política de revisión periódica.....	151
Anexo 6: Código de la función de fitness, revisión continua. ....	156
Anexo 7: Código de la función de fitness, revisión periódica. ....	156
Anexo 8: Código de la función de restricción, revisión continua.....	156
Anexo 9: Código de la función de restricción, revisión periódica.....	157

## **INTRODUCCIÓN.**

Es común escuchar en la actualidad sobre temas que relatan la escasez actual de los recursos en el planeta, y ciertamente, aunque cueste asimilar dicho fenómeno, es una realidad a la cual no se puede hacer oídos sordos. Es por esto, que en la sociedad actualmente se utiliza una herramienta capaz de minimizar el consumo acelerado de los recursos y que día a día se torna más importante su implementación, dicha herramienta es lo que se conoce comúnmente como optimización de procesos.

Las organizaciones se enfrentan constantemente al reto de producir más gastando menos. Para crecer, las empresas están buscando maneras de mejorar sus procesos de modo que resulte en la reducción de costos y en una conciencia de lo que realmente representa cada proceso dentro de la empresa.

Un proceso ineficiente y no optimizado nunca va a generar los resultados más eficientes. Si se hace correctamente, la optimización de procesos traerá consecuentemente la reducción de tiempo, dinero y errores en un proceso, lo que lleva a mejores resultados de negocio. El propósito de la optimización de procesos es reducir o eliminar la pérdida de tiempo y recursos, gastos innecesarios, obstáculos y errores, llegando a la meta del proceso.

Para aplicar la optimización es necesario, en primer lugar, identificar un proceso de la empresa en el cual el costo sea más de lo debido, o que esté causando el descontento de los clientes, o incluso provocando estrés a los empleados. Después de conocer el proceso en detalle e identificar las posibilidades de cambio y la necesidad de mejoras, es el momento de poner en práctica el proceso de una manera nueva. Esta es una parte delicada de la optimización de procesos. Es crucial tanto para los objetivos del proceso como para la optimización de los mismos, que se adopte el nuevo proceso desde el principio y se apliquen todos los cambios.

Así con esto, se pueden comprobar los resultados, obtener información y evaluar si las mejoras fueron positivas o no. Puede suceder que el proceso no termine como estaba previsto, que la aplicación no se haya hecho correctamente. En tales casos, es necesario iniciar el proceso de nuevo.

Actualmente y gracias a la evolución continua de la tecnología, es común que la mayoría de los procesos industriales sean realizados por equipos, como lo son, por ejemplo, brazos robóticos, cintas transportadoras, computadoras, etc. Económicamente adquirir un equipo tecnológico puede resultar costoso, como también lo es su mantención, pero dichos costos se justifican ya que los equipos implican mejoras notables en los procesos, como lo son aumentos de la productividad, trabajos más exactos, menos mano de obra, etc. Todos estos factores resultan ser económicamente ventajosos con relación a los costos si se evalúan a largo plazo.

La mayoría de los equipos tienden a presentar fallas tarde o temprano, fallas que se vinculan generalmente a componentes de los mismos, es por esta razón, que resulta ser primordial tener a disposición repuestos de los componentes que fallan de manera mortal para ser reemplazados de manera rápida y evitar así tener pérdidas de producción. Bajo esta última temática, se desprende un proceso que debe encargarse del abastecimiento de los repuestos, proceso que se conoce como gestión de inventarios.

El proceso de gestionar repuestos implica a su vez la presencia de costos, ya sea costos de adquisición de los activos, de almacenamiento y los costos asociados a las actividades que se desencadenan en la gestión de los mismos durante el ciclo de vida del equipo. Es por esta razón que éste trabajo de título se enfoca en la necesidad de optimizar el proceso de gestión de repuestos no reparables, optimización que se fundamenta en la reducción de los costos asociados a la gestión de los activos físicos durante los ciclos de vida correspondientes, es decir, a largo plazo, donde se utilizarán métodos modernos de costeo y optimización mediante el uso de una técnica metaheurística.



## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.**

En las industrias es necesario desarrollar diversos procesos para poder satisfacer los objetivos de las mismas, muchos de estos procesos se ejecutan y se cumplen dentro de los objetivos, pero ¿Los procesos se desarrollan de manera óptima? Basándose en la incógnita anteriormente mencionada, este trabajo se enfoca netamente en el estudio de un proceso común dentro de las industrias, el proceso de gestión de repuestos no reparables.

El proceso de gestión de repuestos no reparables comienza cuando en un equipo se presenta la falla de uno de sus componentes y este no puede ser reparado, por lo tanto, es necesario reemplazar dicho componente para evitar así pérdidas económicas de producción, tiempos muertos en los operarios, etc.

Al presentarse la falla anteriormente mencionada, se desata una serie de actividades que involucra necesariamente la gestión del repuesto, como, por ejemplo, el despacho desde la bodega del repuesto hacia el equipo que presenta la demanda, entre otros.

Estas actividades tienen como fin suplir la demanda generada por el equipo. Son ejecutadas con diferentes intensidades, ya que las características de confiabilidad aplicadas al repuesto varían de acuerdo con la confiabilidad y, en definitiva, con la fase del ciclo de vida en que se encuentra el equipo que presenta la demanda.

Para poder ejecutar las actividades de gestión se requieren recursos, los cuales constituyen costos, por lo que se hace necesario conocer un indicador global de costo que permita la selección de las estrategias óptimas para la gestión del repuesto no reparable. La estrategia de asociar costos de los recursos a las actividades de la logística de repuesto se basa en el método de “Costeo basado en actividades ABC (activity-based-costing)” la cual se considera en el desarrollo del modelo propuesto en este trabajo.

Para mejorar el proceso de gestión de repuestos no reparables, se tratará de optimizar desde el punto de vista económico, es decir, hacer más eficiente el proceso de gestión de repuestos no reparables.

La optimización del indicador global puede resultar ser muy compleja dependiendo del tamaño de la problemática abarcada y del gran número de variables consideradas, es por esta razón que se acude a una metaheurística, específicamente los algoritmos genéticos, uno de los métodos más avanzados en la solución de problemáticas de esta naturaleza. Estos algoritmos genéticos, a través de su potencial, conducirán el proceso de optimización del indicador global del costo asociado a la gestión de repuestos no reparables y podrán apoyar el proceso de toma de decisiones a largo plazo.

## 1.1 Objetivos.

### 1.1.1 Objetivos generales.

Elaborar un modelo de optimización del costo global del ciclo de vida de la gestión de uno o más repuestos no reparables. Luego, utilizar la herramienta de algoritmos genéticos e implementar esta técnica para solucionar el modelo. El modelo debe permitir discriminar sobre la política de inventario óptima a utilizar en cada repuesto crítico.

### 1.1.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar un modelo de optimización de procesos, utilizando los datos resultantes de la distribución de Weibull para determinar la cantidad de fallas anuales de los repuestos durante el ciclo de vida del equipo.
- Incluir en el modelo el método de costeo basado en actividades.
- Aplicar el modelo desarrollado a las distintas políticas de inventario.
- Ejecutar el algoritmo utilizando Matlab.
- Sensibilizar el modelo propuesto.
- Solucionar el modelo de optimización mediante la metaheurística de algoritmos genéticos.
- Aplicar el modelo propuesto a un caso de estudio y desarrollar experimentos concluyentes.
- Analizar resultados con el objetivo de poder discriminar entre la política de inventario más adecuada a utilizar.
- Elaborar conclusiones.

## 1.2 Justificativa.

En la logística la selección de políticas de inventario es fundamental desde el punto de vista económico. Es por esta razón que resulta ser indispensable tener una herramienta que sea capaz de discernir entre la política de inventario más adecuada a implementar a lo largo del ciclo de vida de uno o más activos. La principal variable de decisión debe ser el indicador del costo global de la gestión de un repuesto no reparable. El desempeño de la gestión, como también la optimización de los recursos que participan dentro de este proceso de gestión se debe dar en torno a la minimización de los costos globales de la gestión de repuestos atendiendo los niveles proyectados de consumo.

## 1.3 Contexto.

Es fundamental en las industrias aplicar las mantenciones necesarias que exigen los equipos que desenvuelven labores dentro de los procesos. Por más que se programen y sean adecuadas estas mantenciones, siempre van a existir componentes de equipos que durante su explotación presenten fallas condenatorias, sean por defectos del material, errores de los operarios, o cualquier otro motivo, inclusive fallas de desgaste propias y vinculadas a la conclusión de la vida útil de las mismas. Considerar además que dependiendo del sector industrial y de los trabajos intensivos de los mismos, como los son, por ejemplo, la minería, la generación y transmisión de energía, la industria petroquímica, forestal y de infraestructura, el costo de adquisición de un repuesto no reparable resulta ser muy elevado.

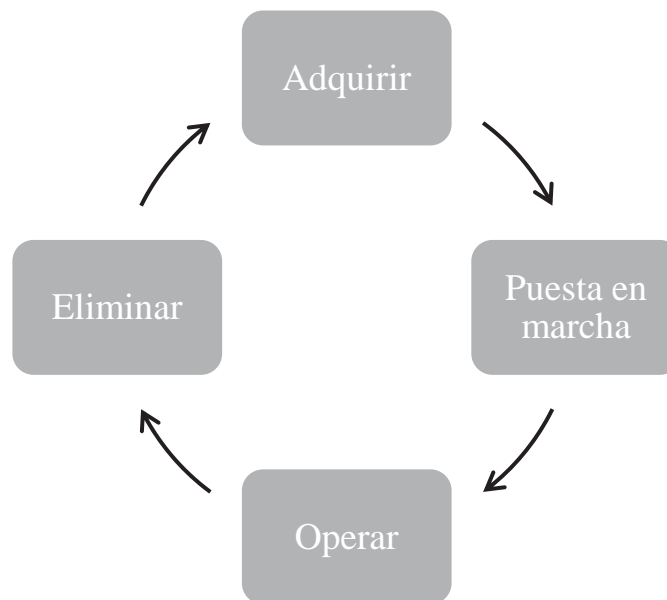
Es por estas razones que es indispensable trabajar de manera óptima en la gestión de los nuevos componentes a suplir. Esto con el objetivo de minimizar los recursos que se asocian tanto en las actividades propiamente gestiónales, como en las utilidades desperdiciadas, teniendo un equipo fuera de trabajo por un tiempo determinado.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Ciclo de vida de la gestión de activos físicos.

Activo físico se define como algo que tiene valor, o potencial para generar valor para una organización. En sí misma la gestión de activos es la actividad coordinada con la que una organización debe contar para generar valor a través de sus activos. La gestión de activos se orienta explícitamente a ayudar a las organizaciones a cumplir los objetivos definidos y a determinar la combinación óptima de actividades de acuerdo con estos objetivos.

La gestión de activos, en simples palabras, es una disposición mental a ver los activos físicos no como pedazos de metal, plástico o cemento inanimados e invariables, sino como objetos y sistemas que responden a su medio, que cambian, que por lo general se deterioran con el uso y que progresivamente envejecen, luego fallan, dejan de funcionar y finalmente mueren. Los activos tienen un ciclo de vida, para examinar y comprender este concepto clave de la gestión de activos, existen docenas de modos distintos de representar un ciclo de vida de un activo físico, pero la “*FIGURA 1*” lo representa con sencillez.



*FIGURA 1.- “Ciclo de vida de la gestión de activos físicos”.*

*Elaboración propia, basado en la fuente: R. Davis, “Introducción a la gestión de activos”.*

Las fases de este modelo son las siguientes:

- Adquirir: Esto incluye todo lo que implica planificar, diseñar y comprar un activo. Algunos diagramas de ciclo de vida muestran la planificación como una función separada. La aplicación correcta de estas actividades asegura que el activo sea correcto para su propósito.
- Puesta en marcha: Esto incluye todas las actividades de instalar o construir el activo y asegurarse de que sea totalmente operativo. Es un hecho comprobado que una mayor incidencia de fallas es después de la primera instalación. Esto se refleja en la necesidad de que en la etapa de puesta en marcha del ciclo de vida se supervise la operación inicial de los activos.
- Operar: Esto es por lo general la mayor parte del ciclo de vida de un activo, durante la cual cumple la función para la que se lo diseñó. Durante este período el activo debe someterse al monitoreo, mantenimiento, renovación y actualizaciones potenciales apropiados para cumplir con cualquier tipo de cambio en los requisitos operativos o de estado. Para muchos activos, esta fase dura décadas. Esta es la fase con la que los ingenieros están más familiarizados.
- Eliminar: A menudo esta es la fase que más se pasa por alto. Los activos pueden durar más que la vida de un ser humano, por lo tanto, puede ser difícil considerar la eliminación del activo cuando esto va a suceder en un futuro tan lejano. Las actividades claves durante este período incluyen sacar de operación el activo, eliminar o reciclar el activo y sus componentes, y el suministro de información para la planificación del reemplazo del activo.

Según la fase del ciclo de vida en que se encuentre el activo físico, factores tales como la confiabilidad y mantenimiento se consideran reflejando el efecto de estos parámetros en el desempeño económico y operativo del activo.

La confiabilidad representa la probabilidad de no fallar del activo. Por lo que es el complemento de la probabilidad de falla, la cual varía durante el ciclo de vida.

La distribución estadística de Weibull es uno de los modelos más utilizados para representar el comportamiento de estos parámetros y obtener así la distribución de la tasa de falla.

## 2.2 La distribución de Weibull.

Este tipo de distribución es el más utilizado para realizar estudios del tiempo de vida útil o tiempo para la falla de los componentes, esto debido a las buenas aproximaciones que se obtienen. Una de las características fundamentales que sigue este tipo de distribución, es que el número de ocurrencias de eventos de fallas por unidad de tiempo no permanece necesariamente constante; es decir, la tasa de ocurrencia de eventos de fallas puede aumentar o disminuir con el tiempo.

La función de densidad de la distribución de Weibull  $f(t)$  para la variable aleatoria de tiempo  $t$ , representa la probabilidad que tiene un componente de fallar en un determinado tiempo  $t$ , siendo expresado de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right).$$

Dónde,

- $t$ : Es el tiempo.
- $\beta$ : Es el parámetro de forma.
- $\alpha$ : Es el parámetro de escala o vida característica.
- $\gamma$ : Es el parámetro umbral o inicial de localización.

El parámetro de forma ( $\beta$ ) representa el grado de variación de la tasa de fallas. El parámetro de escala o vida característica ( $\alpha$ ) representa el tiempo para el cual la probabilidad de falla acumulada es de 63,2%. Por tanto, cuanto mayor sea  $\alpha$ , menor será el intervalo de tiempo en que se producirán las fallas del componente.

Por último, el parámetro de localización ( $\gamma$ ) representa el momento a partir del cual se genera la distribución de Weibull en el tiempo. Es decir, durante el tiempo que representa el parámetro de localización no se producirán fallas en los componentes.

En la “*FIGURA 2*” se muestra como varía la función de densidad  $f(t)$  para distintos parámetros de forma ( $\beta$ ) y escala ( $\alpha$ ), considerando el parámetro de umbral igual a cero ( $\gamma$ ).

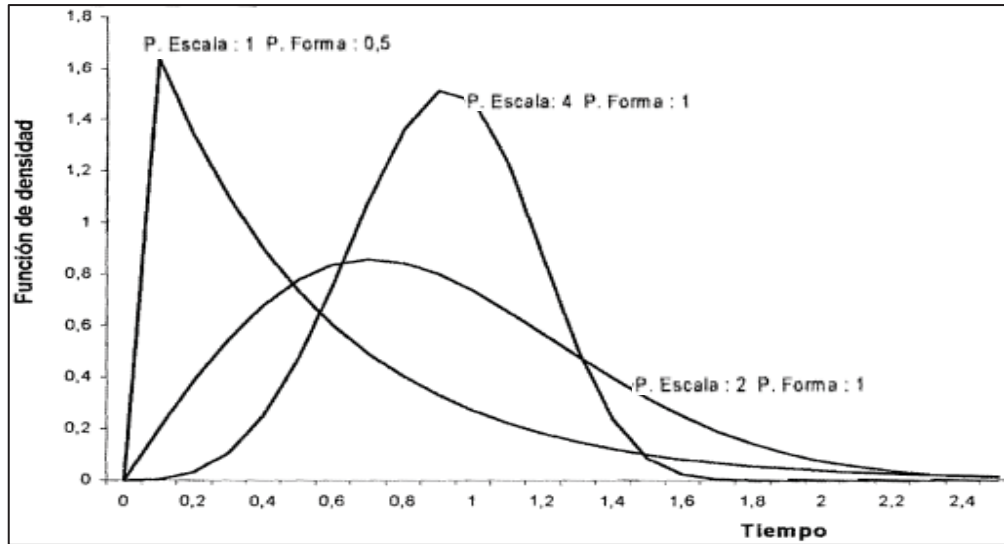


FIGURA 2.- “Distribución de densidad de Weibull, para diferentes valores de los parámetros de forma y de escala”.

Fuente: G. García, “Introducción a la teoría de la confiabilidad y su aplicación en el diseño y mantenimiento de equipos industriales de un proceso de renovación”.

La confiabilidad ( $R(t)$ ) es una función decreciente denominada también función de supervivencia y es la probabilidad de un componente a sobrevivir hasta el tiempo ( $t$ ). Por tanto, la función de confiabilidad se expresa como la siguiente ecuación:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right).$$

La función de distribución acumulada se define como la integral de la función de densidad desde cero hasta el tiempo ( $t$ ), y representa la probabilidad de fallar de un componente antes del tiempo ( $t$ ). Se define como:

$$F(t) = 1 - R(t).$$

En la “FIGURA 3” se puede visualizar como varía la función de distribución acumulada  $F(t)$  para un rango de tiempo ( $t$ ), cuando se tratan distintos valores del parámetro de forma ( $\beta$ ).

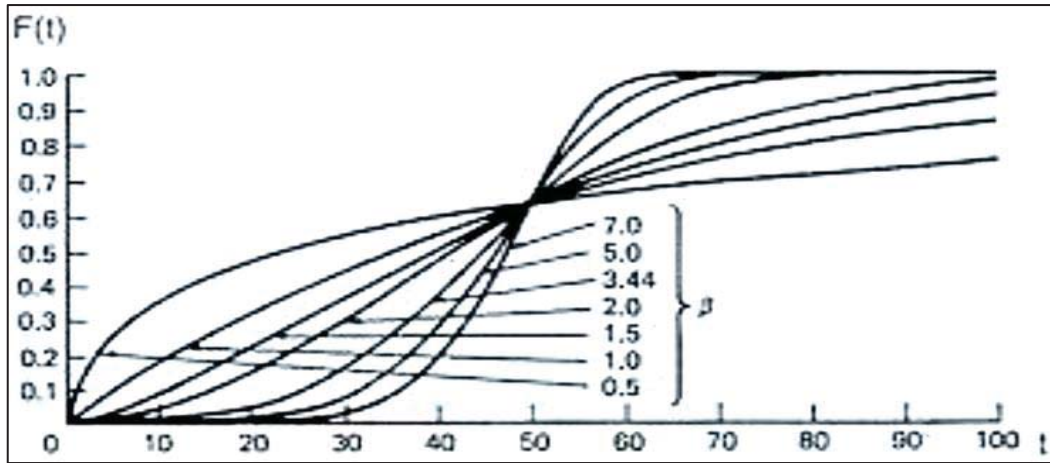


FIGURA 3.- “Función distribución acumulada, para diferentes valores del parámetro de forma”.

Fuente: J. M. Tamborero del Pino, “Fiabilidad: La distribución de Weibull”.

Siendo la función de confiabilidad  $R(t)$  la probabilidad de que un componente no falle. La tasa de falla  $\lambda(t)$  de un componente, que representa el número de fallas por unidad de tiempo de tiempo  $t$  se define de la siguiente forma:

$$\lambda(t) = - \frac{\frac{\partial R(t)}{\partial t}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

La “FIGURA 4.” revela el comportamiento de la tasa de fallas, para distintos parámetros de forma.

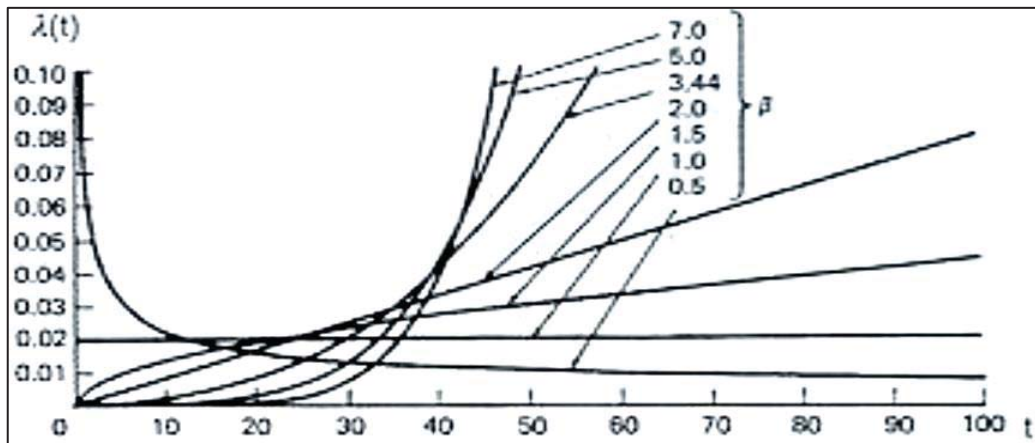


FIGURA 4.- “Función de tasa de fallas, para diferentes valores del parámetro de forma”.

Fuente: J. M. Tamborero del Pino, “Fiabilidad: La distribución de Weibull”.



Anteriormente se comentó que la tasa de fallas de un activo suele variar durante su ciclo de vida, dependiendo de la fase en la cual se encuentre de la misma.

Es común reconocer en la vida de un activo físico tres fases características, donde la tasa de falla varía con un comportamiento clásico, tanto este comportamiento como las fases del activo se representan gráficamente a través de la curva de la bañera “FIGURA 5”.

Resulta importante aclarar que la curva de la bañera representa el comportamiento clásico y más común de un activo físico, pero se debe tener en cuenta que no representa la totalidad de los casos, de hecho, se conocen hasta seis gráficos diferentes del comportamiento de la tasa de falla en función del tiempo de un activo.

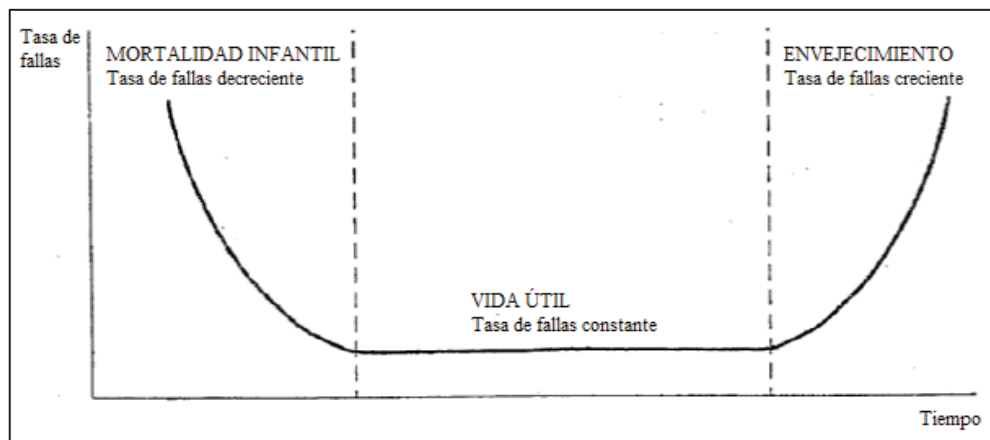


FIGURA 5.- “Curva de la bañera”.

Fuente: Elaboración propia.

- **Zona de mortandad infantil:** El fallo se produce inmediatamente o al cabo de muy poco tiempo de la puesta en funcionamiento, como consecuencia de errores de diseño, defectos de fabricación o montaje, etc. Es preciso revisar en las condiciones reales de funcionamiento hasta dar con la puesta a punto deseada. Para evitar esta zona, cuando es posible se somete a los componentes a un “quemado” inicial desechando los componentes defectuosos. Este “quemado” o rodaje inicial se realiza sometiendo a los componentes a determinadas condiciones extremas, que aceleran los mecanismos de fallo. Los componentes que pasan este período son los que se venden, ya en la zona de vida útil.

- Zona de vida útil: Período de vida útil con tasa de fallos aproximadamente constante. Es el período de mayor duración, en el que se suelen estudiar los sistemas, ya que se supone que se reemplazan antes de que alcancen el período de envejecimiento.
- Zona de envejecimiento: Corresponde al agotamiento. La tasa de fallas vuelve a crecer, debido a que los componentes fallan por degradación de sus características por el transcurso de tiempo, desgaste. Aún con reparaciones y mantenimiento, la tasa de fallo aumenta, hasta que resulta demasiado costoso el mantenimiento. Es común que los activos en esta zona alcancen la condición de activos no reparables y sean desechados.

### 2.3 Tipos de mantenimiento.

En la industria y la ingeniería, el concepto de mantenimiento tiene el siguiente significado: Cualquier actividad como comprobaciones, mediciones, reemplazos, ajustes y reparaciones necesarias para mantener o reparar una unidad funcional de forma que esta pueda cumplir sus funciones. Es común distinguir dos tipos generales de mantenimientos, el mantenimiento de actualización, y el de conservación. Este último base fundamental para el desarrollo de los objetivos de esta propuesta.

#### 2.3.1 Mantenimiento de conservación.

Está destinado a compensar el deterioro de equipos sufrido por el uso, de acuerdo con las condiciones físicas y químicas a las que fue sometido. En el mantenimiento de conservación pueden diferenciarse dos subtipos, el mantenimiento correctivo y el mantenimiento preventivo.

##### 2.3.1.1 Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo es el encargado de corregir fallas o averías observadas en los activos físicos. Es decir, este mantenimiento actúa después de haberse reconocido en un equipo algún tipo de falla entre sus componentes.

##### 2.3.1.2 Mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo está destinado a garantizar la fiabilidad de equipos en funcionamiento antes de que pueda producirse un accidente o avería por algún deterioro.

### 2.4 Políticas de inventario.

Para comenzar este apartado es necesario previamente comprender que para el enfoque de este estudio el activo físico no reparable será el elemento por sustituir dentro del equipo en

mantención, por lo tanto, se define el nivel de inventario (stock) como la cantidad de repuestos existentes en el almacén o bodega de la organización listos para ser utilizados cuando la demanda del equipo exija la sustitución del activo. Así pues, antes de que se acaben las existencias de los activos físicos en bodega hay que hacer una reposición o reaprovisionamiento del almacén y adquirir nuevas unidades para no quedar desabastecidos. Existen dos sistemas principales de aprovisionamiento, como veremos a continuación.

#### 2.4.1 Política de revisión continua.

En esta política, el estado del stock se actualiza de forma inmediata cada vez que se produce una sustitución (consumo de una unidad del componente en bodega). Hay un conocimiento perfecto del nivel de existencias en cada momento.

La frecuencia del pedido estará determinada por el ritmo de la tasa de fallas del activo, y el pedido se generará automáticamente cada vez que el nivel de stock llegue al punto de pedido.

La cantidad que se pida será siempre la misma, es decir, la del tamaño del pedido ( $Q$ ).

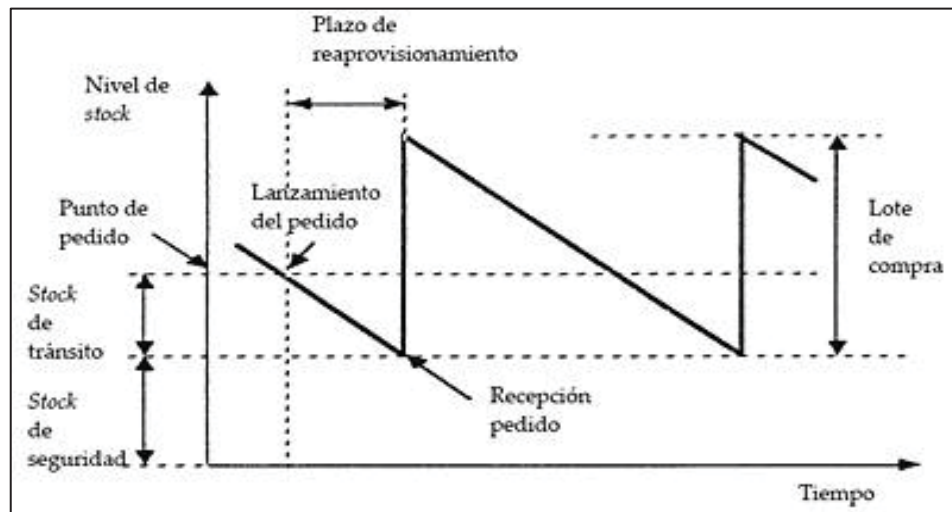


FIGURA 6.- “Curva de reabastecimiento del sistema de revisión continua”.

Fuente: A. Ferrín “Gestión de stocks”.

#### 2.4.2 Política de revisión periódica.

En esta política se revisa el stock a intervalos de tiempo constantes. No se tiene en cuenta el punto de pedido, es decir, una variable que indique cuándo debe hacerse el siguiente pedido. Hay que esperar a que llegue el momento de hacer la revisión del stock y, en ese momento, se

hará un pedido tal que eleve el nivel de stock hasta un valor prefijado de antemano, llamado nivel de pedido. Así pues, lo que hay que calcular es la periodicidad con la que hay que hacer la revisión o, lo que es lo mismo, el número de veces que hay que hacer un pedido ( $N$ ).

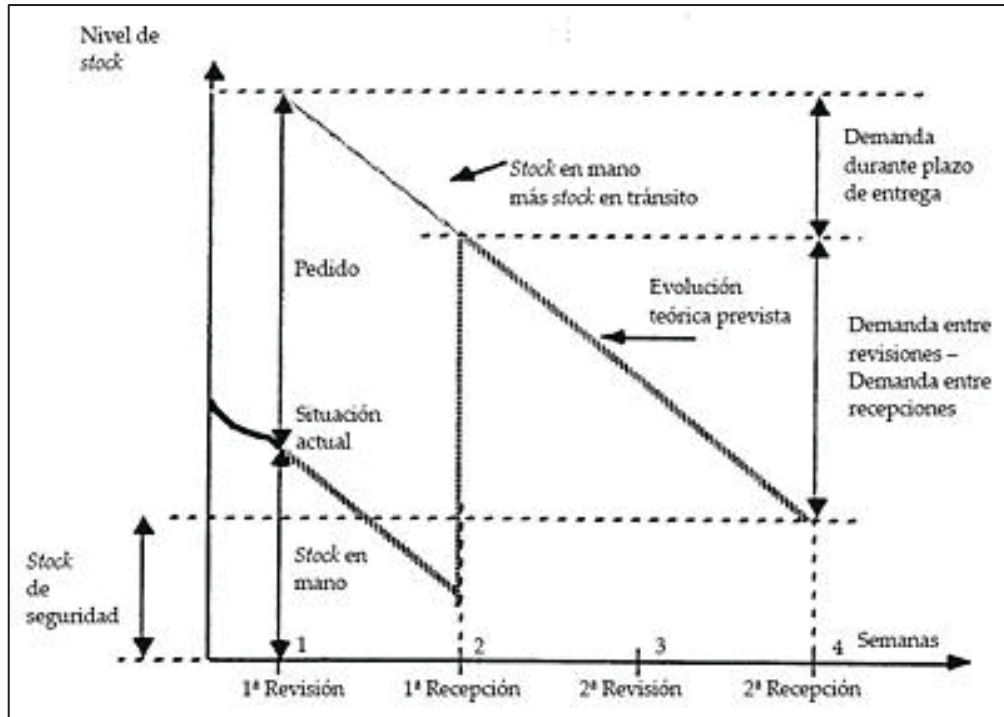


FIGURA 7.- “Curva de reabastecimiento de sistema de revisión periódica”.

Fuente: A. Ferrín “Gestión de stocks”.

Es evidente que cualquiera de las políticas mencionadas genera diferentes impactos en los niveles de inventario y en la frecuencia con que se pide el repuesto al proveedor, por lo tanto, en los flujos de caja de la organización y, consecuentemente, en sus costos de ciclo de vida (considerando el valor del dinero en el tiempo).

## 2.5 Costeo basado en actividades.

El sistema de costeo por actividades divide a la organización en actividades. Una actividad representa lo que la empresa hace, el tiempo que gasta en hacerlo, y el producto obtenido. La principal función de una actividad es convertir recursos (materiales, mano de obra y tecnología) en productos. El costeo por actividades identifica las actividades realizadas en una empresa, y determina sus costos y rendimientos.

El enfoque del modelo tradicional se basa en los recursos consumidos para la producción del activo, mientras que el ABC se enfoca en las actividades a realizar para la producción del activo. Por ejemplo, el costo de revisar una pieza de cada lote producido estará en relación con el número de lotes y no con la cantidad de piezas, el costo de procesar órdenes de compra estará relacionado con el número de órdenes y no con la cantidad de productos ordenados.

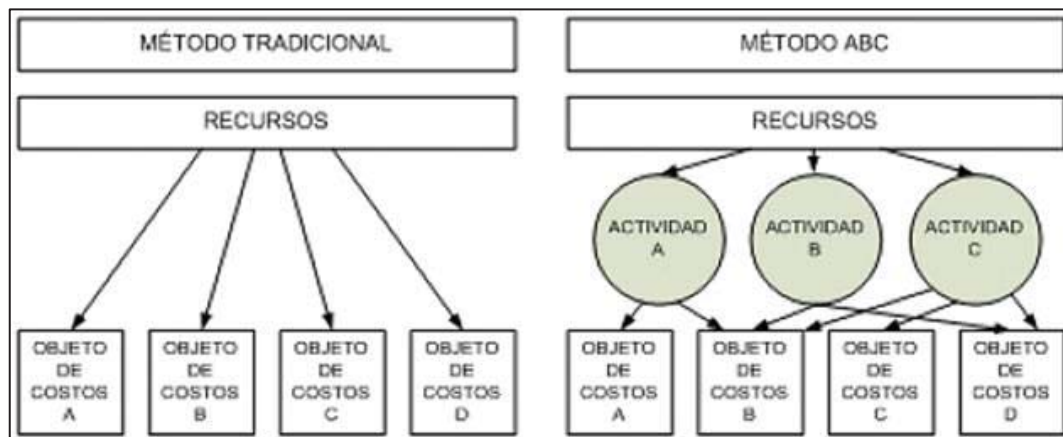


FIGURA 8.- “Enfoques del método tradicional versus el método ABC”.

Fuente: J. Vidal “Propuesta de un modelo de costeo de ciclo de vida como apoyo a la gestión de repuestos no reparables”.

Un sistema de costeo por actividades se enfoca en los siguientes aspectos:

- Identificación de las actividades: Identificar las actividades significativas de la empresa como base para describir las operaciones del negocio y determinar su costo y rendimiento. El análisis de actividades descompone a una empresa en sus actividades elementales. La descomposición es llevada a cabo examinando cada unidad organizacional para determinar sus objetivos y los recursos asignados para alcanzarlos.
- Determinar el costo y rendimiento de las actividades: El costo de una actividad incluye todos los factores de producción utilizados para realizarla. Los recursos constan de personas, materiales, suministros, maquinaria, sistemas computacionales, y otros recursos que se acostumbra considerar como elementos del costo en el catálogo de cuentas. Cualquier factor significativo de producción, se incluirá como costo de la actividad.

- Determinar el output de la actividad: El costo de una actividad es expresado en términos de una medida de volumen de actividad por el cual el costo de un proceso dado varía más directamente, por ejemplo, número de órdenes de compra o número de proveedores. Esto se conoce como la medida de la actividad.
- Calcular el costo de la actividad a los productos, clientes u otros objetos de costo: El costeo por actividades está basado en el principio de que las actividades consumen recursos, y que los productos, clientes, u otros objetos de costo, consumen actividades. El costeo es mejorado por un cálculo más objetivo de los costos de elaborar un producto, servir a un cliente, u otros objetos de costo. Esto se hace identificando todas las actividades y determinando que tanto del output de cada actividad es dedicado al objeto del costo. Esta estructura del costo, a la que se le llama lista de actividades, describe la conducta del producto en el consumo de actividades.
- Evaluar la Efectividad y Eficiencia de las Actividades: Los administradores son responsables de mejorar continuamente el desempeño de las actividades. Una empresa puede elegir entre diferentes métodos y recursos para llevar a cabo las actividades. Los métodos alternativos traen consigo implicaciones en términos de respuesta de mercados, capacidad de manufactura, nivel de inversión, costo unitario y tipo de estructura administrativa y de control. La razón por la cual se seleccione un método para realizar una actividad será que este sea el que mejor contribuye a los objetivos del negocio, ya sea indicadores como los de minimización de costos, de mejoras en la eficiencia de un equipo, etc.

#### 2.5.1 Terminología del sistema de costeo basado en actividades.

- Actividad: Es una combinación de personas, tecnología, recursos, métodos y medio ambiente que produce un bien o servicio. La actividad describe lo que la organización
- Proceso: Es un conjunto de actividades relacionadas e interdependientes enlazadas por los productos que intercambian. Las actividades están relacionadas porque un evento específico genera la primera actividad, la cual, a su vez, genera actividades subsecuentes.
- Costo: Se denomina costo al valor monetario de los recursos utilizados en realizar una actividad.

- Conducta del costo: La conducta del costo de una actividad es la manera en que los recursos varían cuando cambia el volumen de dicha actividad.
- Recursos: Son los factores de producción como mano de obra, tecnología, suministros, y otros, empleados para realizar una actividad.
- Objeto de costo: Es la razón por la cual se realiza una actividad. Los objetos de costo incluyen productos, servicios, clientes, proyectos, y contratos.
- Inductores de actividades (drivers): Son los métodos para asignar el costo de las actividades a los objetos del costo. Miden la frecuencia e intensidad de la demanda de actividades por los objetos de costo.
- Inductores (drivers) de recursos: Son los enlaces entre las actividades y los recursos. Miden la intensidad y frecuencia de las demandas de recursos hechas por las actividades. Toman los costos del mayor y los asignan a las actividades.
- Lista de actividades: Es la enumeración de las actividades asociadas a un objeto de costo.
- Inductores (drivers) de costos: Es el factor que crea o influencia el costo. Por ejemplo, la disposición de la maquinaria en una fábrica es el factor determinante en el costo del movimiento de la materia prima y de la producción en proceso.

## 2.6 Costeo del ciclo de vida de un activo físico.

El objetivo principal de un análisis de costeo del ciclo de vida de un activo es, como su nombre lo indica, cuantificar la totalidad de los gastos pagados por este a lo largo de su vida, esto incluye los costos generados en las diferentes etapas de su vida como: investigación y desarrollo, adquisición, construcción, operación y desincorporación. Esta información es muy útil para soportar técnicamente decisiones de compra de equipos, optimización y rediseños, programación de mantenimientos y sustitución de un activo.

El costo del ciclo de vida de un activo físico suele estar soportado por una serie de análisis complementarios como: Análisis de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, análisis económicos y análisis de riesgos entre otros. El análisis de costeo del ciclo de vida de un activo normalmente es aplicado para:

- Evaluación y comparación de diseños alternativos.
- Estudios de viabilidad económica.
- Proyectos de optimización de costos operacionales.

- Evaluación y comparación de estrategias de uso, operación y mantenimiento.
- Evaluación y comparación de reemplazos, rehabilitación o desincorporación de equipos.
- Optimización en la asignación de recursos para actividades de mejoras de equipos.
- Planificación financiera de largo plazo.

Cuando se habla de confiabilidad, disponibilidad o mantenibilidad, se está hablando también del costo operacional, la ingeniería de confiabilidad busca predecir y evitar las fallas, mientras que la ingeniería de mantenimiento busca restaurar las fallas, en el menor tiempo posible, con el menor impacto. No obstante, prevenir y reparar las fallas cuesta dinero, por lo que es el factor económico donde ambas actividades concurren. La calidad y frecuencia de las actividades de mantenimiento repercuten positiva o negativamente en el costo del ciclo de vida de un activo, es por eso por lo que existen tantas estrategias de mantenimientos enfocadas a mejorar y optimizar estas actividades a través de la predicción y eliminación de las indisponibilidades provocadas por: Fallas de equipos, actividades de mantenimiento y paradas de emergencias, con el objetivo primario de extender la vida útil de un activo a través de la optimización de su uso.

### 2.7 Costeo del ciclo de vida de un activo físico basado en actividades.

En el costeo por actividades, la ejecución de las actividades consume recursos. Los activos físicos consumen actividades. El costo del activo es determinado a través de la lista de actividades y la cantidad de cada actividad consumida en la manufactura o cualquier otro proceso de un producto específico. El costo del producto es derivado de la suma de los costos de todas las actividades enumeradas en la lista de actividades. El costeo del producto es mejorado por un rastreo más directo de los costos de apoyo, los cuales tradicionalmente se acumulan en costos indirectos y después son prorrateados a los productos. Lo anterior se representa de manera más simple mediante la “*FIGURA 9*”.



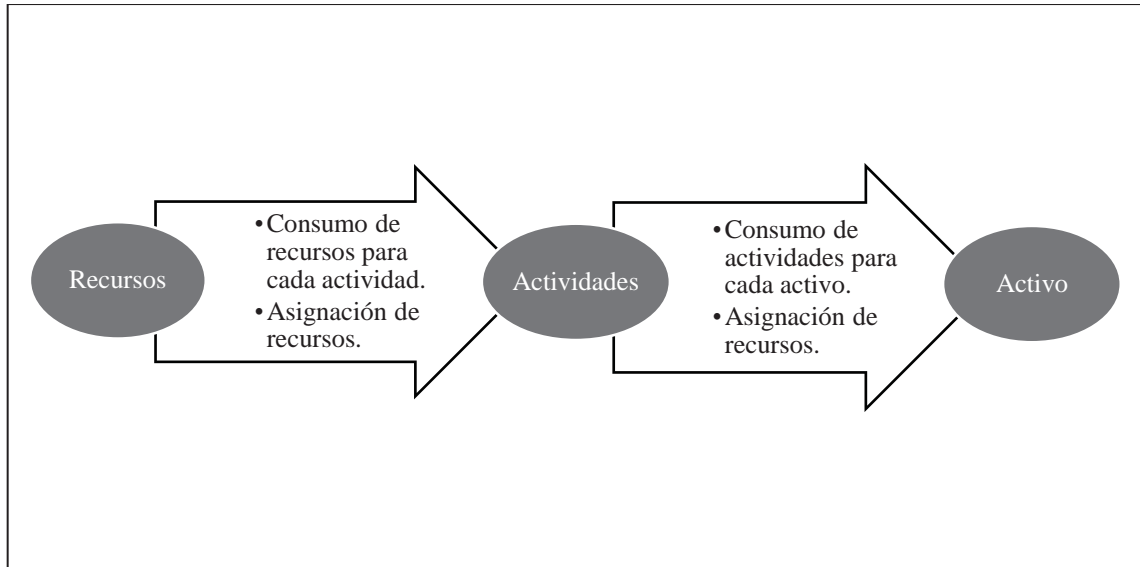


FIGURA 9.- “Diagrama de flujo básico de costeo del ciclo de vida de un activo físico basado en actividades”.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.8 Metaheurísticas en la optimización.

Desde los años sesenta han ido apareciendo diferentes métodos de resolución de problemas conocidos por el nombre de técnicas metaheurísticas. Estas técnicas son de especial interés en el caso de variables enteras, aunque también se aplican a problemas con variables reales. Un heurístico es un “procedimiento simple, a menudo basado en el sentido común, que se supone que ofrecerá una buena solución a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido”. Los heurísticos se utilizan, por ejemplo, cuando no existe un método exacto de resolución, cuando existe un método exacto que consume mucho tiempo para ofrecer la solución óptima, cuando existen limitaciones de tiempo o como paso intermedio para obtener una solución inicial para la aplicación de otra técnica. Algunos autores proponen la siguiente clasificación de métodos de resolución mediante heurísticos:

- Métodos constructivos: Se caracterizan por construir una solución definiendo diferentes partes de ella en sucesivos pasos.
- Métodos de descomposición: Dividen el problema en varios más pequeños y la solución se obtiene a partir de la solución de cada uno de estos.

- Métodos de reducción: Tratan de identificar alguna característica de la solución que permita simplificar el tratamiento del problema.
- Métodos de manipulación del modelo: Obtienen una solución del problema original a partir de otra de otro problema simplificado, con menos restricciones, linealizando el problema, etc.
- Métodos de búsqueda por entornos: En las que se parte de una solución inicial a la que se realizan modificaciones en sucesivas iteraciones para obtener una solución final. En cada iteración existe un conjunto de soluciones vecinas candidatas a ser nueva solución en el proceso. En este grupo se encuadran las técnicas metaheurísticas.

Las técnicas metaheurísticas son procedimientos de búsqueda que tampoco garantizan la obtención del óptimo del problema considerado, y que también se basan en la aplicación de reglas relativamente sencillas. A diferencia de los heurísticos, las técnicas metaheurísticas tratan de huir de óptimos locales orientando la búsqueda en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda. La aplicación de las técnicas metaheurísticas es especialmente interesante en caso de problemas de optimización combinatoria, es decir, problemas en las que las variables de decisión son enteras en las que, generalmente, el espacio de soluciones está formado por ordenaciones de valores de dichas variables.

La lógica de las técnicas metaheurísticas es asumir un punto de partida como una solución (o conjunto de soluciones) que típicamente no es óptima. A partir de ella se obtienen otras parecidas, de entre las cuales se elige una que satisface algún criterio, a partir de la cual comienza de nuevo el proceso. Este proceso se detiene cuando se cumple alguna condición establecida previamente.

Las técnicas metaheurísticas más extendidas son la siguientes: Los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, el recocido simulado y las colonias de hormigas. Todas las técnicas metaheurísticas tienen las siguientes características:

- Son ciegas, no saben si llegan a la solución óptima. Por lo tanto, se les debe indicar cuándo deben detenerse.
- Son algoritmos aproximativos y, por lo tanto, no garantizan la obtención de la solución óptima.

- Aceptan ocasionalmente malos movimientos, es decir, se trata de procesos de búsqueda en los que cada nueva solución no es necesariamente mejor, en términos de la función objetivo que la inmediatamente anterior. Algunas veces aceptan, incluso, soluciones no factibles como paso intermedio para acceder a nuevas regiones no exploradas.
- Son relativamente sencillos, todo lo que se necesita es una representación adecuada del espacio de soluciones, una solución inicial (o un conjunto de ellas) y un mecanismo para explorar el campo de soluciones.
- Son generales. Prácticamente se pueden aplicar en la resolución de cualquier problema de optimización de carácter combinatorio. Sin embargo, la definición de la técnica será más o menos eficiente en la medida en que las operaciones tengan relación con el problema considerado.
- La regla de selección depende del instante del proceso y de la historia hasta ese momento. Si en dos iteraciones determinadas, la solución es la misma, la nueva solución de la siguiente iteración no tiene por qué ser necesariamente la misma. En general, no lo será.
- Aunque las soluciones que ofrecen las técnicas metaheurísticas no son las óptimas y, en general, ni siquiera es posible conocer la proximidad de las soluciones al óptimo, permiten estudiar problemas de gran complejidad de una manera sencilla y obtener soluciones suficientemente buenas en tiempos razonables.
- A pesar de que estas técnicas son relativamente recientes, los campos de aplicación de las técnicas metaheurísticas son numerosos, electrónica, telecomunicaciones, electromagnetismo, logísticas por mencionar algunas, y entre ellos se encuentra el de la ingeniería de organización.

A continuación, se explican las características más importantes de la metaheurística que se utiliza en este estudio: La técnica de los algoritmos genéticos.

### 2.8.1 Algoritmos genéticos.

La técnica metaheurística de los algoritmos genéticos fue ideada por Holland en 1975 y está inspirada en los procesos de adaptación de los seres vivos. Los resultados de los patrones de evolución de los seres vivos han sido sobradamente probados con éxito a lo largo de la evolución

de las especies y constituyen la base de los algoritmos genéticos. Por un lado, estos patrones permiten que con el transcurso del tiempo se exploren continuamente nuevas posibilidades y, por otro, y en condiciones normales, raramente conducen a la obtención de individuos absolutamente desadaptados e incapaces de sobrevivir.

Partiendo de una población inicial, es decir, un conjunto inicial de soluciones, se realizan manipulaciones por las que se obtienen sucesivas poblaciones. La función de adaptación indica la bondad de las soluciones consideradas en cada momento. En cada iteración se realizan una serie de operaciones con los individuos de la población, de entre las cuales las más comunes son: la selección, la mutación y el cruce (este último aplicado en la propuesta del caso de estudio). La aplicación de los operadores anteriores permite obtener, típicamente, soluciones con mejores funciones de adaptación.

Los algoritmos genéticos pertenecen al grupo de las técnicas evolutivas, que son aquellas técnicas que en cada iteración disponen de un conjunto de soluciones a partir de las cuales obtienen un nuevo conjunto de soluciones, supuestamente, más evolucionadas con respecto al cumplimiento del objetivo a optimizar.

#### *2.8.1.1 Nomenclatura de los algoritmos genéticos.*

Como se ha dicho, los algoritmos genéticos están basados en la observación de la evolución natural de las especies. Existen, por lo tanto, analogías entre la nomenclatura propia de la Biología y la que se emplea en la técnica metaheurística de los algoritmos genéticos.

Los cromosomas de los seres vivos contienen la información de los mismos. Estos cromosomas están, a su vez, formados por genes, y cada uno de los genes es responsable de un rasgo del individuo. Los genes están formados por secuencias de cuatro tipos de aminoácidos. La información contenida en los cromosomas se llama genotipo. La decodificación (realizada por diferentes enzimas) del genotipo de cada individuo da lugar a un conjunto de características (llamado fenotipo), lo que le confiere al individuo unas determinadas condiciones de adaptación en función del entorno en el que se encuentre.

En los algoritmos genéticos, el equivalente del genotipo es una cadena de caracteres. El equivalente del fenotipo es la solución que resulta de la decodificación de la cadena anterior y,

finalmente, la función objetivo hace las veces de entorno y permite evaluar la bondad de las soluciones.

El significado del término ‘individuo’ es distinto en el contexto de los algoritmos genéticos y en el ámbito biológico. En términos biológicos, un individuo es un animal o vegetal de determinada especie. Sin embargo, y haciendo un abuso del lenguaje, al hablar de un individuo nos referimos a una cadena de caracteres que representan una solución o un conjunto de ellas. El conjunto de individuos constituye una población.

La “FIGURA 10” ilustra la relación entre los algoritmos genéticos y la biología.

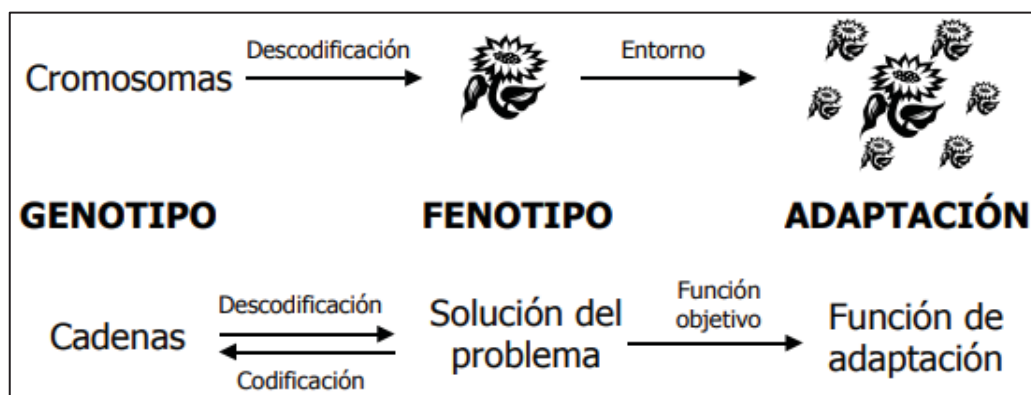


FIGURA 10.- “Analogías entre la técnica metaheurística de los algoritmos genéticos y la Biología”.

Fuente: A. García “Técnicas metaheurísticas”.

### 2.8.1.2 Método.

El método que siguen los algoritmos genéticos no es único y rígido. Existen diferentes métodos propuestos por diversos autores, con características similares, pero con diferencias significativas. Todos ellos trabajan con un conjunto de individuos que son sometidos a diferentes operadores genéticos con objeto de obtener nuevos y mejores individuos. Las variantes de los operadores y la forma en la que se aplican sobre la población determinan las diferencias más notables entre unos algoritmos y otros.

A continuación, se describen someramente algunos de los aspectos del método que siguen los algoritmos genéticos. Más adelante se profundiza en los aspectos más relevantes de la técnica.

El espacio de soluciones del problema tratado queda representado por un conjunto finito de cadenas o matrices. Cada una de estas, a las que se les denomina individuos, representa al menos

una solución del problema. Debe existir, por lo tanto, un código que establezca una relación entre las diferentes soluciones y las representaciones de las mismas.

En cada instante existe un conjunto de individuos llamado población. A lo largo del proceso de búsqueda (y a diferencia de otras técnicas metaheurísticas) los algoritmos genéticos exploran un conjunto de soluciones y no una sola. De esta forma, se pretende que el proceso de búsqueda no quede atrapado en un óptimo local.

De cada uno de los individuos es posible obtener su función de adaptación a través de la evaluación de la solución a la que representa. Cuanto mayor es dicha función mejor es la solución (su equivalente en el ámbito biológico es la capacidad del individuo para sobrevivir y generar descendencia).

Los individuos mejor adaptados (con mayores valores de la función de adaptación) son seleccionados, con mayor probabilidad cuanto mayor sea la función de adaptación (selección). Estos individuos, “los padres”, se someten a una operación, por ejemplo, de cruce donde se generan nuevos individuos que conforman la descendencia resultado de la unión de diferentes elementos de la cadena de los progenitores.

Algunos o todos los individuos que formaban la población inicial son reemplazados por parte o todo el conjunto de los nuevos individuos de la descendencia. En cualquier caso, al comienzo de cada iteración se cuenta siempre con una población de un determinado número de individuos, que permanece constante durante el proceso de búsqueda.

Por otra parte, con una determinada probabilidad las cadenas de los individuos pueden someterse a algún tipo de modificación, hecho conocido como mutación.

El proceso se detiene cuando se cumple alguna condición relativa al tiempo de proceso o al número de iteraciones o a la bondad de las soluciones obtenidas hasta el momento.

### *2.8.1.3 Selección de la población inicial.*

Como en el resto de técnicas metaheurísticas, la solución de partida (la población en este caso) se puede obtener de forma aleatoria o partir de la aplicación de alguna regla sencilla o, simplemente, a partir de soluciones conocidas obtenidas por experiencias anteriores.

La generación de una población de forma aleatoria es ventajosa en cuanto que permite que el proceso de búsqueda comience con un conjunto de soluciones suficientemente diferentes. Por otro lado, al generar una población aleatoria, si el resultado del proceso de búsqueda es satisfactorio, esto será por las bondades del propio proceso y no por el método de generación de la primera población.

#### 2.8.1.4 Codificación.

Se distinguen principalmente dos tipos de codificación de genes.

- Codificaciones binarias: Las representaciones son cadenas de ceros y unos. Este tipo de codificación es el que más se ha empleado en la literatura, tratando de obtener ventajas derivadas del empleo de los diferentes operadores.
- Codificaciones no binarias: Aunque menos empleadas, pueden ofrecer ciertas ventajas. Exigen un tratamiento diferente al de las codificaciones binarias.

#### 2.8.1.5 Operador selección.

Con este operador se obtiene el conjunto de individuos de la población actual que va a generar la descendencia de una población dada, que formarán parte de individuos de la siguiente población.

En términos biológicos, los individuos más adaptados tienen más probabilidad de sobrevivir y de procrear en mayor medida. La técnica metaheurística, igualmente, selecciona aquellas soluciones cuya función de adaptación sea mayor. Sin embargo, si sólo se eligieran aquellos individuos cuya función de adaptación fuera mayor existiría el peligro de converger en torno a un óptimo local de forma prematura.

La probabilidad de que este operador seleccione a cada individuo es mayor cuanto mayor sea su función de adaptación. Algunas de las formas de establecer esta relación son las siguientes.

- Selección proporcional: La probabilidad de selección de cada individuo es proporcional a su función de adaptación. Conviene notar que se trata de una probabilidad y no una proporción determinista. Los individuos mejor adaptados tienen más probabilidad de ser seleccionados y, por lo tanto, por término medio serán elegidos en mayor proporción, pero no existen garantías de que en una iteración particular los individuos sean seleccionados en proporciones idénticas a sus probabilidades de selección.

- Selección determinista: En este caso sí que se trata de proporciones deterministas. Los individuos son seleccionados en una proporción directamente proporcional a su función de adaptación. Con este tipo de selección se acelera la convergencia del algoritmo. Si existen soluciones mejor adaptadas que otras, pero próximas a un óptimo local, la búsqueda se centrará en la región de dicho óptimo local, a pesar de que puedan existir otros individuos peor adaptados alejados de dicho óptimo y más próximos a otro óptimo local (mejor que el anterior) o incluso más próximo al óptimo global.
- Selección por ruleta: Consiste en que a cada uno de los individuos de la población se le asigna una parte proporcional a su ajuste de una ruleta, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Generalmente, la población está ordenada en base al ajuste, por lo que las porciones más grandes se encuentran al inicio de la ruleta. Para seleccionar un individuo basta con generar un número aleatorio del intervalo  $[0,1]$  y devolver el individuo situado en esa posición de la ruleta. Esta posición se suele obtener recorriendo los individuos de la población y acumulando sus proporciones de ruleta hasta que la suma exceda el valor obtenido. Presenta además el inconveniente de que el peor individuo puede ser seleccionado más de una vez.
- Clasificación: Según este criterio, se asignan probabilidades de selección directamente proporcionales al lugar que ocupa cada individuo en la clasificación que se establece al ordenar los individuos por valor creciente de la función de adaptación.  
Lo que se pretende con este método es seleccionar a los individuos independientemente de la función de adaptación y atendiendo sólo a sus posiciones relativas.
- Selección por torneo: Este procedimiento abandona por completo el criterio de selección proporcional y está basado en comparaciones (torneos) entre individuos. En el proceso se van comparando parejas y se va estableciendo una clasificación de los individuos. En primer lugar, se escogen dos individuos de la población al azar. Aquel cuya función de adaptación sea menor pasa a formar parte de la lista de clasificación, y como se trata del primer elemento elegido ocupará el último lugar. Este elemento deja de ser un candidato para participar en nuevas comparaciones porque ya ha sido clasificado. El otro elemento de la comparación (mejor adaptado) sí vuelve a ser candidato para participar en nuevas comparaciones. Repitiendo este proceso se obtiene finalmente una lista con la



clasificación definitiva de los individuos de la población. Esta clasificación, tal y como se obtiene, es la que se emplea en el proceso de selección. Ya no es necesario realizar ningún tipo de asignación de probabilidad proporcional porque, de hecho, el elemento aleatorio se introduce mediante la elección de los individuos que participan en cada comparación.

- Elitismo: consistente en copiar siempre al mejor, o en su caso mejores, individuos de una generación en la generación siguiente. De esta manera se garantiza que el proceso de búsqueda nunca dará un paso atrás en cuanto a la calidad de la mejor solución obtenida, sino que un cambio en ésta siempre implicará una mejora.

#### 2.8.1.6 Operador cruce.

Este operador, conocido también como el de recombinación, es el más importante de esta técnica metaheurística. El objetivo del cruce es combinar elementos de información de diferentes individuos, de modo que las características interesantes que estaban dispersas en diferentes individuos queden reunidas en uno nuevo, confiando en que los individuos obtenidos de esta manera representen soluciones de mejor calidad.

La forma en que se realiza el cruce depende del tipo de representación que se escoja. Para ilustrar algunas posibilidades supondremos que la codificación de las soluciones de un determinado problema es de tipo binario y es una cadena de ocho elementos. Los individuos A y B han sido seleccionados para someterlos al operador del cruce:

Individuo A: 1 1 1 0 1 0 0 1.

Individuo B: 0 1 0 0 1 1 0 0.

Podemos describir los siguientes tipos de cruce (que no son los únicos):

- Operador de cruce simple: Según este tipo se cruce, se selecciona un punto de la cadena en cada uno de los padres y se generan nuevos individuos combinando las partes que generan los cortes anteriores, como aparece en la “*FIGURA 11*”.

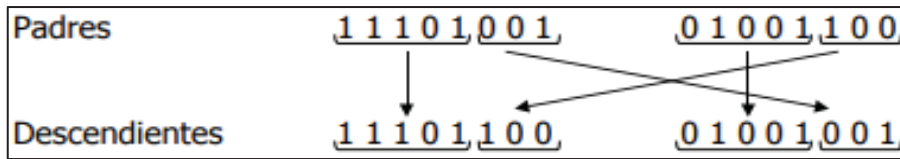


FIGURA 11.- “Operador de cruce simple”.

Fuente: A. García “Técnicas metaheurísticas”.

- Operador con dos puntos de corte: Es análogo al anterior, salvo que se seleccionan dos puntos de corte y los padres intercambian los elementos de la cadena que quedan entre dichos puntos para generar los descendientes.

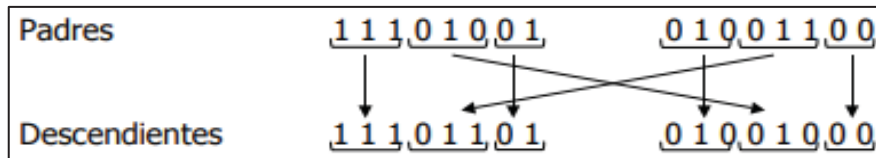


FIGURA 12.- “Operador de cruce con dos puntos de corte”.

Fuente: A. García “Técnicas metaheurísticas”.

- Operador de cruce conforme a una máscara de cruce: En este caso, los genes de los descendientes se obtienen de acuerdo con el criterio dado por una máscara. La máscara, en el ejemplo, es una cadena de ceros y unos. Para cada posición de la descendencia se tomará el gen del padre 1 si el valor de la máscara para dicha posición es 1 y del padre 2 si el valor del gen es 0.

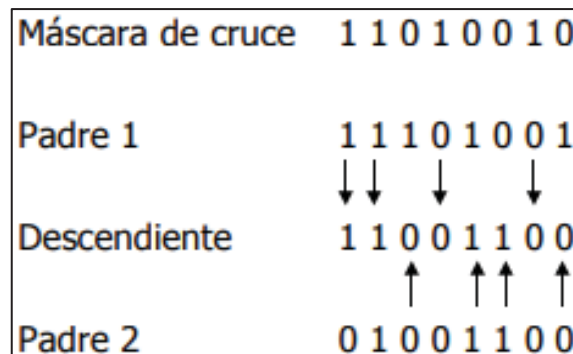


FIGURA 13.- “Operador de cruce conforme a una máscara de cruce”.

Fuente: A. García “Técnicas metaheurísticas”.

### 2.8.1.7 Operador mutación.

Con los operadores anteriores se obtienen individuos que combinan rasgos que están presentes en los individuos de la población. Sin embargo, pueden existir características que quedan sin explorar si sólo se emplean los operadores anteriores. Con la mutación se introducen modificaciones en los individuos de la descendencia. Siguiendo con el ejemplo anterior, la mutación consistiría en transformar un cero en uno (o viceversa) con una probabilidad determinada.

Individuo antes de la mutación	1	1	0	1	0	0	1	0
						↓		
Individuo tras la mutación	1	1	1	0	1	1	0	1

FIGURA 14.- “Operador de mutación”.

Fuente: A. García “Técnicas metaheurísticas”.

Si la probabilidad con la que tiene lugar la mutación es muy pequeña, es difícil que vuelvan a aparecer características que han sido abandonadas por el operador de cruce. En una determinada región puede ocurrir que, si las primeras tres posiciones están ocupadas por elementos ‘1’, el resultado obtenido no sea bueno, por lo tanto, los operadores de selección y cruce harán que las esas características se abandonen. Pero si cambia la región en la que tiene lugar la exploración, es decir, si el resto de los elementos cambian notablemente, puede ocurrir que tres ‘1’ en las tres primeras posiciones arrojen un buen resultado; la mutación permite que esas características se vuelvan a recuperar.

Si la probabilidad de mutación es elevada, es probable que alguna de las características adecuadas de la solución se pierda y la técnica se desvíe de regiones potencialmente interesantes sin haber explorado con suficiente profundidad las regiones visitadas. En el caso extremo de que la probabilidad de mutación fuera “1” el proceso se convertiría en una exploración de todo el espacio de soluciones altamente ineficiente al no eliminar la posibilidad de examinar un individuo más de una vez.

Es por las razones descritas anteriormente, que el operador mutación resulta ser un operador muy sensible con respecto a la problemática planteada, es decir, en algunos casos logra ser un factor determinante en la optimización cuando este prosigue las soluciones planteadas ya sea,

por operadores de selección o cruce encontrando resultados con mejor adaptación que los originalmente planteados. O bien puede ser drástico el uso de la mutación cuando se involucran características las cuales no son más óptimas y se aleja la búsqueda a zonas lejanas de la mejor solución haciendo más tediosa la búsqueda, hecho que finalmente se soluciona con cada nueva iteración del cruce.

Para sintetizar y simplificar el método con el operan los algoritmos genéticos, se adiciona el flujograma de una de las posibles combinaciones de los operadores anteriores, propuesta por Pham D.T. y Karaboga D. (2000).

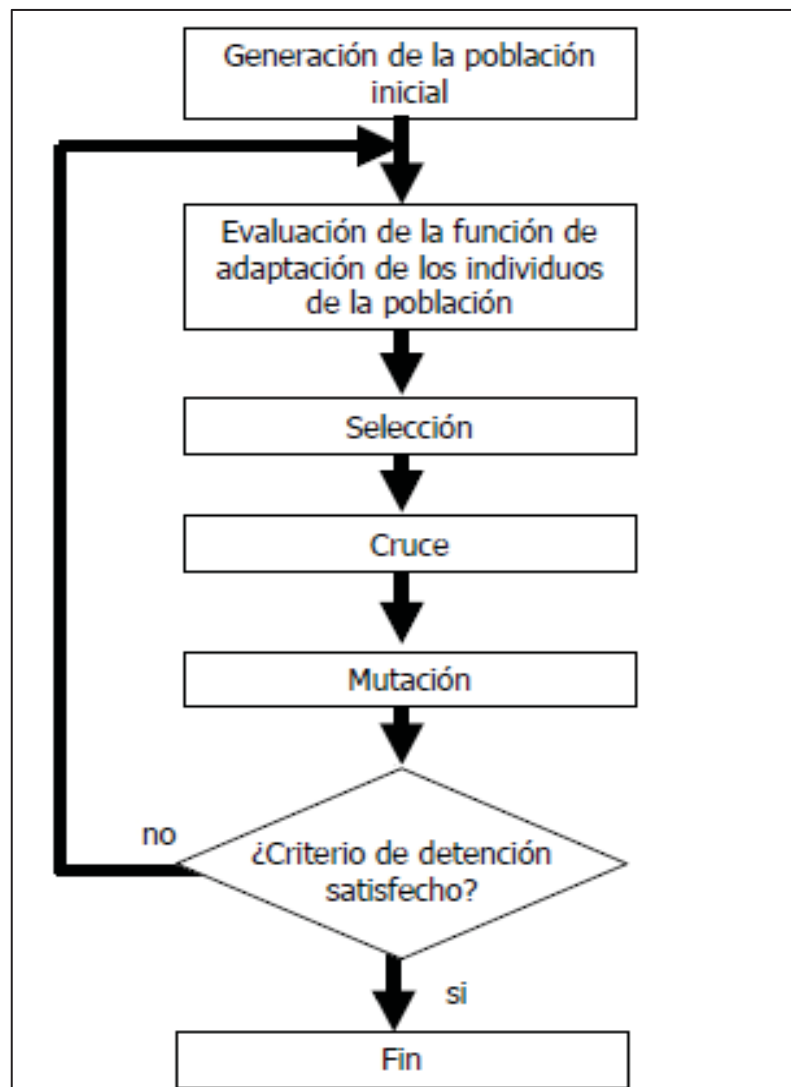


FIGURA 15.- "Algoritmo genético de Pham D.T. y Karaboga D. (2000)".

Fuente: A. García "Técnicas metaheurísticas".

### **3. ELABORACIÓN DEL MODELO.**

El modelo permite el cálculo del costo global de la gestión de repuestos no reparables, el cual se compone de los tres tipos de costos que implica la gestión a largo del ciclo de vida, siendo estos, los costos logísticos, los costos directos y los costos de almacenamiento.

- Costo Logístico: Costos generados por el consumo de los recursos requeridos para realizar las actividades que involucra el proceso logístico de gestión. Actividades tales como recepción, empaque, venta, transporte, devolución, transacciones, etc.
- Costo Directo: Costo que resulta de la suma del precio de compra del activo físico, más los costos necesarios para poner dicho activo a disposición de la empresa.
- Costo de Almacenamiento (capital): Costo que involucra el mantener los activos físicos en el almacén. Se relaciona directamente con el espacio ocupado en el almacén, así como el tiempo de permanencia en el mismo.

#### **3.1 Costo logístico.**

El cálculo del costo logístico se basa en el costeo basado en actividades (ABC), el cual es un método que mide los costos, el desempeño de las actividades y los objetos de costo. Se basa en tres supuestos: la gestión de los repuestos requiere actividades, las actividades consumen recursos y los recursos tienen un costo.

##### **3.1.1 Actividades, recursos y repuestos.**

En una primera etapa, los principales requisitos son la identificación de los recursos utilizados, las actividades realizadas y las relaciones de estas con los repuestos considerados.

- Recursos ( $r_j$ ): En la gestión del ciclo de vida de un repuesto no reparables, no existe una norma que defina exclusivamente los recursos a utilizar, estos serán variables de acuerdo del repuesto tratado, como de las características y economía de las organizaciones, entre otros factores.

Se define de manera general un vector que sea capaz de abarcar la cantidad de recursos necesarios en cada caso. Este vector se denomina entonces “Vector de recursos”.

Vector de recursos			
Recurso 1	Recurso 2	Recurso 3	Recurso j

TABLA 1.- “Vector de recursos”.

Fuente: Elaboración propia.

- Costo de los recursos ( $cr_j$ ): Es necesario definir de igual manera, un vector que posea los costos de los recursos a utilizar. Estos costos deben ser determinados en base a una escala de tiempo, es decir, costos diarios, costos mensuales, costos semestrales, costos anuales, etc.
- Actividades ( $a_i$ ): En la gestión del ciclo de vida de un repuesto no reparables, no existe una norma que defina exclusivamente las actividades a realizar, caso similar a lo que se describió anteriormente con los recursos. Siguiendo la misma línea de acción se define entonces el “Vector de actividades” (Lista de actividades).

Vector de actividades			
Actividad 1	Actividad 2	Actividad 3	Actividad i

TABLA 2.- “Vector de actividades”.

Fuente: Elaboración propia.

- Repuestos ( $p_k$ ): Se puede analizar la gestión del ciclo de vida de uno o varios repuestos no reparables a la vez, depende netamente del caso a tratar. Es por esto, que se define de manera general el “Vector de repuestos”.

Vector de repuestos			
Repuesto 1	Repuesto 2	Repuesto 3	Repuesto k

TABLA 3.- “Vector de repuestos”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidos los tres vectores es necesario vincular estos términos, para asignar el consumo de los recursos por las actividades, y de igual manera asignar el consumo de actividades para cada repuesto.

Se define entonces una matriz de consumo de recursos por las actividades, se le asigna el nombre de “Matriz recursos-actividades”, como se muestra en la siguiente tabla.

Matriz recursos-actividades.				
I/J	Recurso 1	Recurso 2	Recurso 3	Recurso J
Actividad 1	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{1J}$
Actividad 2	$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{2J}$
Actividad 3	$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$	$r_{3J}$
Actividad I	$r_{I1}$	$r_{I2}$	$r_{I3}$	$r_{IJ}$

TABLA 4.- “Matriz recursos-actividades”.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz recursos-actividades es de tamaño [I x J], y cada componente que conforma esta matriz corresponde a una proporción de consumo, por ejemplo,  $r_{IJ}$  corresponde a la proporción del costo del recurso J asignado a la actividad I.

Se define de igual modo una matriz de consumo de actividades por los repuestos, se le asigna el nombre de “Matriz actividades-repuestos”.

Matriz actividades-repuestos.				
K/I	Actividad 1	Actividad 2	Actividad 3	Actividad I
Repuesto 1	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{1I}$
Repuesto 2	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{2I}$
Repuesto 3	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{3I}$
Repuesto K	$a_{K1}$	$a_{K2}$	$a_{K3}$	$a_{KI}$

TABLA 5.- “Matriz actividades-repuestos”.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz actividades-repuestos es de tamaño [K x I], y cada componente que conforma esta matriz corresponde a una proporción de consumo, por ejemplo,  $a_{KI}$  corresponde a la proporción de consumo de la actividad I asignado al repuesto K. Se calcula dividiendo la proporción de la actividad I relacionada con el repuesto K ( $\overline{a_{KI}}$ ), por la cantidad total de actividad I ( $a_I$ ), quedando expresado como:

$$a_{KI} = \frac{\overline{a_{KI}}}{a_I}.$$

Ya definidos todos los vectores y matrices que exige la aplicación del costeo del ciclo de vida basado en actividades en los repuestos no reparables, solo queda finalizar este apartado vinculando los términos. La “FIGURA 16” lo ejemplifica.

Matriz recursos-actividades		X	Matriz actividades-repuestos		X	Vector costo de los recursos		=	Vector costo imputado a cada repuesto	
I/J	J Recursos		K/I	I Actividades		J Recursos	K repuesto			
I Actividades	r ij		K Repuestos	a ki		\$			\$	

FIGURA 16.- “Método ABC adaptado al CCV de un repuesto no reparable”.

Fuente: Elaboración propia.

También es posible modelar el método de costeo basado en actividades de la gestión del ciclo de vida de los repuestos no reparables de la siguiente manera:

$$p_k = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I a_{ki} \times r_{ij} \times cr_j .$$

Donde,

- $a_{ki}$ : Es la proporción de la actividad  $i$  destinada al repuesto  $k$ .
- $r_{ij}$ : Es la proporción que la actividad  $i$  consume del recurso  $j$ .
- $cr_j$ : Es el monto total de costo del recurso  $j$ .
- $p_k$ : Siendo este resultado el costo logístico del repuesto  $k$ .

Este costeo puede ser empleado para diversos tipos de repuestos y considerando un ciclo de vida de  $cv$  años. Conjuntamente se aplica una tasa de interés exigido  $t_d$  para cada período  $y$  del ciclo de vida para transformar los flujos a valor presente.

Por lo que el costo logístico al valor presente neto para un repuesto  $k$  y para un ciclo de vida de  $cv$  años:

$$CL_{k cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{a_{kiy} \times r_{ijy} \times cr_{jy}}{(1 + td)^y} \text{ [\$]}.$$

Donde,

- $td$ : Tasa de interés exigido para el período  $y$ , como también para el ciclo de vida  $cv$ .



### 3.1.2 Influencia de la tasa de falla en la destinación de los recursos.

El ritmo del consumo de las unidades del repuesto  $k$  será dictado por el comportamiento de la tasa de falla para un determinado período  $y$ . Es de este parámetro del cual se obtiene la cantidad total de unidades de repuestos no reparables que serán consumidas  $y$ , por lo tanto, gestionadas por la organización en él período.

Luego, es correcto decir que el consumo de recursos por parte de la actividad  $i$  durante el período  $y$  está en función de la tasa de falla del repuesto  $k$ .

$$a_{ki y} = f(\lambda_{k y}).$$

Dado que la logística de repuestos requiere de actividades, las cuales necesitan de recursos para realizar las ejecuciones, se puede definir la proporción de recursos  $j$  destinados para la actividad  $i$ , como la relación entre la cantidad de recurso destinado y el monto total del recurso  $j$ .

Esto significa que, al existir un mayor ritmo de consumo de las unidades, mayor será la cantidad de ejecuciones de las actividades, las cuales consumirán un mayor número de recursos.

Se desprende entonces, que el consumo de recursos también está en función de la tasa de falla.

$$r_{ij y} = f(\lambda_{k y}).$$

Una actividad puede ser expresada como una tarea que se ejecuta. Teniendo en cuenta esto, el parámetro  $a_{ki}$  puede ser escrito como la relación entre la cantidad de ejecuciones de la actividad  $i$  destinadas para el repuesto  $k$  durante el año  $y$ , y el total de veces que se ejecutó dicha actividad.

$$a_{ki y} = \frac{E_{ik y}}{\sum_{k=1}^K E_{ik y}} [-].$$

Donde,

- $E_{ik y}$ : Ejecuciones de la actividad  $i$ , para servir al repuesto  $k$  durante el período  $y$ .
- $\sum_{k=1}^K E_{ik y}$ : Total de ejecuciones de la actividad  $i$  realizadas durante  $y$ .

Dentro de las actividades que se realizan para la logística de los repuestos no reparables, la actividad ordenar (“pedir”) es la primera en ser efectuada dentro del proceso logístico y es la

cual define la forma de pedido y la cantidad total de unidades que serán gestionadas durante un período  $y$ .

La frecuencia y cantidad de veces que se ejecuta el pedido dependerá de la política de inventarios que se haya definido. Siendo esta de dos tipos posibles; revisión continua o revisión periódica.

### 3.1.3 Influencias sobre la política de revisión continua.

En esta clase de política, el pedido se realiza cada vez que el nivel de inventario  $S$  iguale al punto de reorden  $R$ , siendo

$$R = \text{tasa de demanda} \times \text{tiempo de entrega.}$$

Para el caso de repuestos no reparables la demanda de unidades será igual a la tasa de falla de estos, ya que una falla del componente genera la demanda en bodega de una unidad para la reposición.

El punto de reorden es fijado por la organización de acuerdo con la demanda (tasa de falla) que se tenga del repuesto, además del tiempo de entrega de las unidades solicitadas (lead time del proveedor).

Para el repuesto  $k$  durante el período  $y$ , y con un tiempo de entrega  $t_{de}$ , se tiene:

$$R = \lambda_y \times t_{de} \text{ [unidades].}$$

Como  $\lambda_k$  puede variar en el tiempo,  $\lambda_y$  variará también, constituyendo esto en un cambio en la política de inventarios, esto podrá tener repercusiones en los costos.

Luego de ingresar a bodega el stock pedido (tamaño de lote de pedido  $Q_k$ ) del repuesto  $k$ , comienza el tiempo  $t_p$ , en donde se activa el consumo de las unidades del repuesto  $k$  hasta alcanzarse nuevamente el stock mínimo, mientras se espera la llegada de la próxima orden, tras la cual se reinicia el ciclo con el consumo de las siguientes unidades recibidas.

La tasa de falla representa la pendiente de la curva de consumo de stock, por lo que el tamaño de lote pedido  $Q_k$  y la tasa de falla  $\lambda_{k y}$  del repuesto  $k$  para el período  $y$ , logran definir el número de ejecuciones de la actividad “hacer el pedido” (transacciones).

$$E_{ik y} = \frac{\lambda_{k y}}{Q_k} \text{ [ejecuciones].}$$

Un ejemplo de lo anterior se visualiza en la “FIGURA 17”, donde se consideran cuatro ejecuciones de la actividad “pedir” en un período  $y$ , con un tamaño de lote  $Q_k$ .

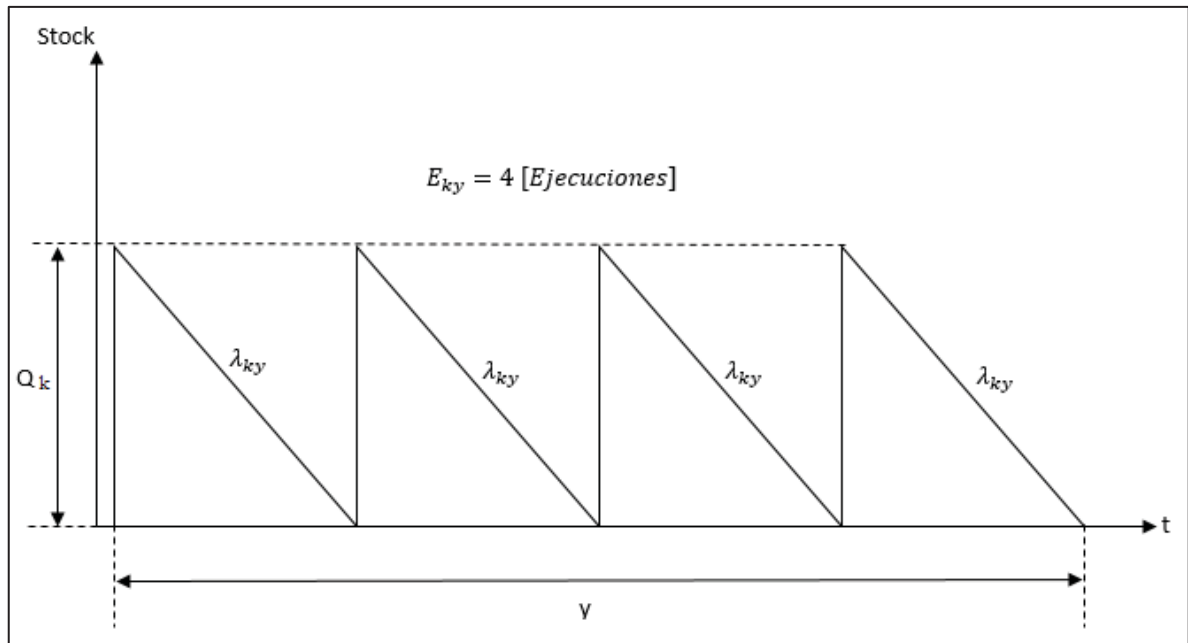


FIGURA 17.- “Ejecuciones de la actividad pedir en la curva de stock”.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.4 Influencias sobre la revisión periódica.

En este caso el tiempo entre pedidos  $t_p$  es fijado para cada período  $y$ . Durante el cual, cada pedido de unidades  $Q_k$  es igual a la cantidad necesaria para alcanzar el stock objetivo establecido. Dado que se asume un ritmo de consumo es constante durante cada período  $y$ , la cantidad de pedidos o las ejecuciones de la actividad “comprar” serán:

$$E_{ik y} = \frac{y}{t_{pk y}} [\text{ejecuciones}].$$

Se asume un  $t_{pki}$  constante durante un dado período  $y$ , pero constituye una variable de decisión durante el ciclo de vida.

### 3.1.5 Tamaño de lote en las ejecuciones.

Luego de realizarse el pedido se gatilla una serie de actividades del proceso logístico, las cuales pueden ser ejecutadas con distintos tamaños de lotes (diferentes a los lotes de compras).

- $h_{ik}$ : Se define entonces el tamaño de lote de unidades del repuesto  $k$  por cada ejecución de la actividad  $i$ .

Generalmente los tamaños de lotes de las distintas actividades (exceptuando la actividad pedir o comprar) son definidas arbitrariamente por el departamento de logística de repuestos (concepto de logística de repuestos). Esto es, la cantidad de repuestos para los cuales se desarrollan las diferentes actividades, por ejemplo, en bodega la actividad almacenar se ejecuta con un tamaño de lote logístico de diez unidades, es decir, cada lote almacenado contendrá diez unidades del componente tratado. Cada una de las actividades que se desarrollan en bodega trabajarán con tamaños de lotes que dependerán en cada caso de factores como espacio, número de operadores y cualquier otro factor que tenga influencias sobre el tamaño de lote de la actividad a ejecutar.

Cumplíendose entonces la siguiente expresión:

$$E_{ik y} = \frac{\lambda_k y}{h_{ik}} [\text{ejecuciones}].$$

Si la actividad  $i$  se realiza de a una unidad por ejecución  $h_{ik}$  asume el valor uno. Por otro lado, si se realiza la ejecución de la actividad  $i$  de a varias unidades,  $h_{ik}$  asume un número entero mayor a uno.

### 3.2 Costo directo.

Es el costo directo del repuesto, este es constante e independiente del tamaño de lote que se realiza por pedido, pues sea cual sea el tamaño de lote de la actividad “pedir”, se asume que se consume (y paga) el mismo número de unidades del repuesto en el período.

Este costo es el resultado del precio unitario del repuesto por la demanda o ritmo de consumo de las unidades en cada período (se asume un valor unitario independiente del tamaño de lote de pedido).

Luego el costo directo para el repuesto  $k$  durante el período  $y$  está dado por:

$$CD_{k y} = P v_{k y} \times \lambda_{k y} \quad [\$]$$

Donde,

- $Pv_{ky}$ : Precio de venta del repuesto  $k$  en el período  $y$ .
- $\lambda_{ky}$ : Tasa de falla del repuesto  $k$  durante el período  $y$ .
- $CD_{ky}$ : Costo directo del repuesto  $k$  en el período  $y$ .

El costo para una cantidad de  $t$  tipos de repuestos y un ciclo de vida  $cv$ , será entonces:

$$CD_{k cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \frac{Pv_{ky} \times \lambda_{ky}}{(1+td)^y} [\$].$$

Donde,

- $td$ : Tasa de interés exigido para el período  $y$ , como también para el ciclo de vida  $cv$ .

### 3.3 Costo de almacenamiento.

El costo anual de almacenamiento (o de capital) del stock está relacionado con el nivel medio de stock mantenido a lo largo del año  $y$ . Representa los costos de capital (o costo de oportunidad del material inmovilizado en bodega).

Bajo los supuestos del modelo determinista de cantidad económica de pedido (EOQ) se asume que:

- El nivel de stock oscila entre las 0 y  $Q_{ky}$  unidades.
- El ritmo de consumo  $\lambda_{ky}$  es constante durante el período  $y$  (enfoque determinístico).
- No se permiten rupturas de stock.
- No se aplican descuentos por cantidad (el precio del componente no varía en función de la cantidad adquirida).

El costo anual de almacenamiento de las unidades del repuesto  $k$  durante el período  $y$  es:

$$CA_{ky} = \frac{Q_{ky}}{2} \times Pv_{ky} \times ti_y [\$].$$

Donde,

- $Q_{ky}$ : Tamaño de lote por pedido del repuesto  $k$  en el período  $y$ .
- $ti_y$ : Tasa de interés exigido del año  $y$  para el almacenamiento.
- $CA_{ky}$ : Costo de almacenamiento del repuesto  $k$  en el período  $y$ .

El costo para una cantidad de  $k$  tipos de repuestos y un ciclo de vida  $cv$ , será:

$$CA_{k\ cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \frac{Q_{ky} \times Pv_{ky} \times ti_y}{(1+td)^y} \quad [\$].$$

Donde,

- $td$ : Tasa de interés exigido para el período  $y$ , como también para el ciclo de vida  $cv$ .

### 3.4 Costo global de la gestión.

El costo global de la gestión será entonces la suma de los tres tipos de costos que influyen en la gestión de repuestos no reparables. Para el repuesto  $k$  durante el período  $y$ , se define:

$$CGG_{k\ y} = CA_{k\ y} + CD_{k\ y} + CL_{k\ y} \quad [\$].$$

Luego, para  $k$  tipos de repuestos y traído a valor presente neto a través de la tasa de descuento exigido por la empresa  $td$ , el costo global de la gestión de un repuesto  $k$  no reparable durante su ciclo de vida de  $cv$  años, será entonces:

$$CGG_{k\ cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K CA_{k\ y} + CD_{k\ y} + CL_{k\ y} \quad [\$].$$

### 3.5 Optimización del modelo.

De acuerdo con el enunciado del último apartado, el costo global de la gestión de un repuesto no reparable durante el ciclo de vida del componente al cual pertenece será entonces el indicador de costos que permitirá seleccionar la política de inventario óptima para la gestión de repuestos no reparables. Es decir, a menor valor del costo global de la gestión de un repuesto, la política de inventario seleccionada será óptima, haciendo más eficiente la distribución de recursos en las actividades relacionadas.

Ahora bien, la pregunta que se plantea es ¿Cómo se puede optimizar el costo global de la gestión de un repuesto sin modificar factores triviales? Con factores triviales entiéndase a la modificación de los costos de los recursos, las tasas de interés, y el costo de los repuestos, que claramente son factores ajenos a la voluntad de una organización.

Entonces, si se revisa nuevamente el modelo que permite estimar el costo global de la gestión, se logra visualizar el único factor en el cual se puede tener intervención para optimizar en el modelo propuesto, este factor es el tamaño de lote para la actividad de pedido  $Q_{k\ y}$ , y que influye de manera directamente proporcional en el costo de almacenamiento y de manera inversamente

proporcional en el costo logístico, recordar que el costo directo no varía en función del tamaño de lote.

La determinación del tamaño de lote para la actividad de pedido  $Q_{ky}$ , va a depender de la política de inventario según la cual se desenvuelve la gestión. Las condiciones de la política de stock en revisión continua privilegian el enfoque de pedir un tamaño de lote constante durante un período y a partir de éste, se determinan otras variables como la cantidad de pedidos durante el período, el tiempo entre pedidos, el nivel de alarma, etc.

Caso contrario a lo que ocurre bajo las políticas de la revisión periódica, donde se ejecutan pedidos entre tiempos constantes para un período, es decir, a partir de los tiempos entre pedidos o su similar, el número de pedidos durante un período, definen el tamaño de lote con el cual trabajar que puede no ser necesariamente constante.

Por lo tanto, se decide realizar un análisis independiente de la actividad realizar pedido (o comprar) con relación a las otras actividades, con esto se modifica el modelo del cálculo del costo logístico, quedando:

$$CL_{kcv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{a_{kiy} \times r_{ijy} \times cr_{jy}}{(1+td)^y} + \frac{\lambda_{ky} * c_Q}{(1+td)^y} [\$].$$

Donde,

- $\sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{kiy} \times r_{ijy} \times cr_{jy}$ : Representa el costo logístico de la gestión del ciclo de vida de los repuestos sin considerar la actividad “pedir o comprar”.
- $\frac{\lambda_{ky}}{Q_{ky}}$ : Representa la cantidad de veces que se ejecuta la actividad “pedir o comprar” de un repuesto para un determinado período.
- $c_Q$ : Corresponde al costo asociado por ejecutar una vez la actividad “pedir o comprar” (costo unitario de la gestión de compra).
- $(1+td)^y$ : Factor de interés para convertir los costos a año cero.

#### **4. ALGORITMOS GENÉTICOS EN MATLAB.**

Dentro de la gran gama de servicios que ofrece el software Matlab, se puede encontrar dentro de las cajas de herramientas, el método de optimización mediante el uso de algoritmos genéticos.

Para aplicar el método de búsqueda de soluciones basado en los algoritmos genéticos, es necesario definir previamente algunos términos fundamentales que exige el software para la ejecución:

- Función objetivo (o fitness): Es el objeto por optimizar, descrito mediante una ecuación matemática, que incluye las todas variables (incógnitas).  
El objetivo de la propuesta es optimizar (minimizar) el costo global de la gestión de un repuesto no reparable, por lo tanto, el “CGG” es la función objetivo.
- Número de variables de decisión: Como su nombre lo dice, es la cantidad de incógnitas que se presentan en la función objetivo, y a las cuales se pretende asignar un valor que optimice el “CGG”.
- Límite inferior (LB): Corresponde al menor valor que puede tomar la variable de decisión que se evalúa en la función fitness, es decir, es el valor que acota inferiormente a la región factible de posibles soluciones.
- Límite superior (UB): Corresponde al mayor valor que puede tomar la variable de decisión que se evalúa en la función fitness, es decir, es el valor que acota superiormente a la región factible de posibles soluciones.
- Función de restricciones: Es una función matemática que, como su nombre lo dice, describe restricciones sean lineales o no lineales (dependiendo del carácter del problema) a la búsqueda de la incógnita óptima en base a la función objetivo.
- Opciones: Es un operador que permite seleccionar el tipo de búsqueda, visualizar búsquedas, crear gráficas que muestran la procreación de las poblaciones, entre otros.

Se invita a revisar el Anexo de este documento, donde se adjuntan los códigos y funciones utilizados en Matlab para la modelación del objetivo de esta propuesta.



#### 4.1 implementación del modelo en matlab.

Como una forma de validar los modelos propuestos y representar de mejor manera su funcionamiento y utilidad, se evalúa un caso simple de estudio mediante el método de búsqueda exhaustiva y mediante el método de los algoritmos genéticos, tanto para la política de revisión continua como periódica.

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a los métodos de búsqueda, se procederá a comparar dichos resultados y se concluirá si es que la modelación ha sido correcta, además de evaluar el comportamiento de la optimización mediante el uso de los algoritmos genéticos.

El caso de estudio que se propone considera evaluar el costo de la gestión de sólo un repuesto crítico, al cual se le asigna un ciclo de vida de nueve años, y cada fase del ciclo de vida del equipo tiene una duración de tres años (fase de mortalidad infantil, fase de vida útil y fase de envejecimiento).

A continuación, se presenta una serie de tablas que resumen las variables y datos que modelan el ejemplo a tratar, como las actividades y recursos más comunes que son participe dentro de un proceso logístico, que es la orientación principal de este trabajo.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.			
VARIABLE.	SIGLA.	UNIDAD.	CANTIDAD.
Número de repuestos.	[k]	[Unidades]	1
Tasa de interes.	[Ti]	[%]	15
Tasa de descuento.	[Td]	[%]	10
Inflación.	[I]	[%]	2
Costo de ejecutar un pedido.	[CQ]	[Unidad monetaria]	\$ 750

*TABLA 6.- “Variables de entrada”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Importante es recalcar que en la “*TABLA 6*” se menciona el costo de ejecutar una vez la actividad “realizar un pedido”, tal y como se mencionó en el marco teórico, con objetivo de analizar independientemente la optimización en base a dicha actividad.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.			
VARIABLE.	SIGLA.	UNIDAD.	k=1
Ciclo de vida.	[CV]	[Años]	9
Costo de adquisición.	[PV]	[Unidad monetaria]	\$ 10.000
Servicio.	[W]	[Horas/año]	8760

TABLA 7.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

De la “TABLA 7” se desprende que adquirir un repuesto tiene un costo directo de \$10.000 unidades monetarias, mientras que el servicio corresponde al tiempo de funcionamiento anual de trabajo del componente.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.							
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.			
Costo de los recursos anuales.			[Cr]	[Unidad monetaria]			
Mano de obra	Gestión	Equipos de carga	Equipos móviles	Estructura IT	Edificaciones	Auxiliares	Energía
\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000

TABLA 8.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la “TABLA 8” se asumen ocho recursos que participan en el proceso de gestión de un activo físico no reparable durante el ciclo de vida del equipo. Estos ocho recursos generalmente son consumidos por las actividades con diferentes intensidades en las mayorías de los sistemas logísticos. Para generalizar la magnitud de los recursos, se decide trabajar los recursos como unidades monetarias, sin especificar el tipo de moneda utilizado.

A continuación, en la “TABLA 9” se definen entonces las actividades que se asumen participando en la gestión de un repuesto no reparable, es decir, las actividades relacionadas con el sistema logístico, donde además se pueden visualizar los tamaños de lote asumidos para cada categoría de actividad.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.	
VARIABLE.	SIGLA.
Tamaño de lote por actividad.	[h]
Actividades de la gestión.	UNIDAD.
	[unid./Actividad]
Recepción	1
Almacenaje	10
Almacenamiento	10
Deposito	10
Picking	10
Cuidados	10
Embalaje	1
Embarque	10
Revisión	1
Despachos	10
Informes	10

TABLA 9.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.								
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.				
Matriz consumo de recurso por actividad			[r i j]	[%]				
I/J	Mano de obra	Gestión	Equipos de carga	Equipos móviles	Estructura IT	Edificaciones	Auxiliares	Energía
Recepción	24%	24%	19%	0%	1%	14%	9%	10%
Almacenaje	12%	12%	10%	0%	0%	14%	9%	3%
Almacenamiento	6%	6%	4%	0%	0%	14%	9%	24%
Deposito	6%	6%	10%	0%	0%	14%	9%	31%
Picking	19%	20%	48%	0%	3%	14%	9%	3%
Cuidados	13%	13%	0%	0%	17%	13%	9%	10%
Embalaje	15%	14%	10%	0%	3%	13%	9%	7%
Embarque	0%	0%	0%	43%	17%	1%	9%	3%
Revisión	0%	0%	0%	57%	29%	1%	9%	3%
Despachos	2%	2%	0%	0%	29%	1%	9%	3%
Informes	3%	3%	0%	0%	2%	1%	9%	3%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

TABLA 10.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

La “TABLA 10” presenta como se asume el consumo de recursos anuales por parte de las actividades, dichos consumos se presentan porcentualmente.

A continuación, se presentan las tablas que definen los tres parámetros necesarios para aplicar la ecuación de distribución de densidad de Weibull, distribución de densidad necesaria para determinar las tasas de fallas anuales.

Se asumen los siguientes valores de los parámetros:

DEFINICIÓN DE VARIABLES.									
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.					
Parámetro de forma.			[Beta]	[-]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	3	3	3

TABLA 11.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.									
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.					
Parámetro de vida característica.			[Alpha]	[-]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	150	150	150	300	300	300	18	18	18

TABLA 12.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.									
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.					
Parámetro inicial de localización.			[gamma]	[-]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLA 13.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas todas las variables de entrada, se procede a ejecutar el método propuesto buscando optimizar el costo global de la gestión de un repuesto no reparable, esto se realiza tanto para la política de revisión continua como para la política de revisión periódica.

Es importante mencionar que en primera instancia se desarrolla un modelo de optimización donde se realiza una búsqueda exhaustiva, es decir, no se aplica ninguna metaheurística al modelo. Esta búsqueda resulta ser muy extensa y toma mucho tiempo para concluir su ejecución.

A continuación, se presentan los resultados de todos los métodos.

#### 4.2 Resultados generales de Weibull.

Con la ecuación de distribución de densidad de Weibull se estiman las tasas de fallas para cada período, en este caso de estudio corresponden a tasas de fallas anuales.

Estas tasas de fallas son los primeros resultados obtenidos del modelo propuesto, y que consecuentemente pasan a ser los datos que desencadenan la ejecución del costeo basado en actividades, bajo la política de stock en revisión continua o revisión periódica, los resultados se visualizan en la “*TABLA 14*” adjunta a continuación.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Tasa de fallas anuales.		[Lambda]		[Unidades/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	357	252	206	29	29	29	220	288	365

*TABLA 14.- “Tasa de falla anual”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Si se gráfica la tasa de falla en función del tiempo, se obtiene:

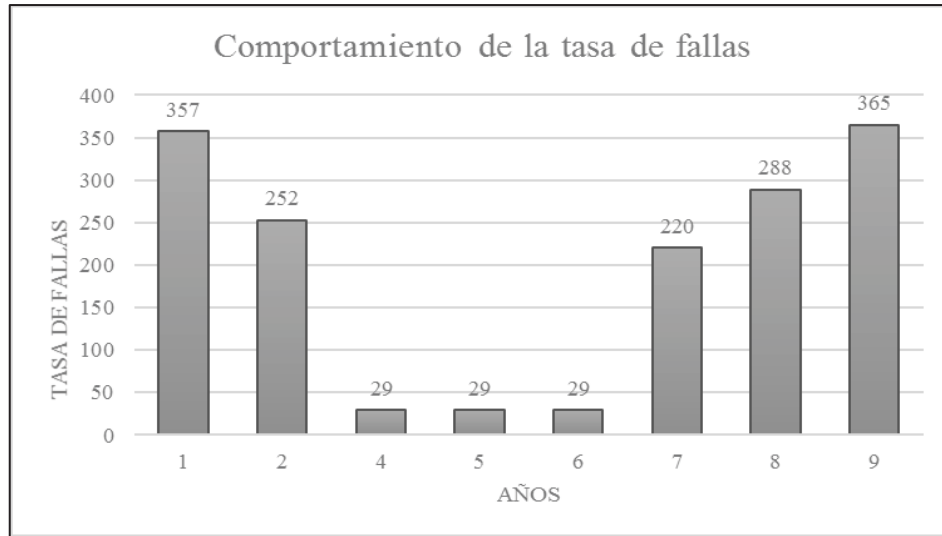


FIGURA 18.- “Comportamiento de la tasa de fallas”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende de la “FIGURA 18” que el comportamiento de la tasa de fallas para este caso de estudio se asemeja a la curva de la bañera.

Se puede apreciar claramente las tres fases del ciclo de vida del componente cada una de duración igual a tres años, donde en la zona de mortalidad infantil las fallas son decrecientes anualmente donde ocurren ochocientos quince fallas en la fase, mientras que en la zona de vida útil se mantiene constante un fallo anual de veintinueve unidades anuales. Finalmente, a partir de la zona de envejecimiento comienza a aumentar la tasa de fallas, en esta zona se producen ochocientos setenta y tres fallas.

Se concluye entonces que durante el ciclo de vida del equipo se producen mil setecientos setenta y cinco fallas.

#### 4.2.1 Resultados del método exhaustivo en revisión continua.

Aplicado el primer método de búsqueda desarrollado, método exhaustivo bajo la política de la revisión continua, resulta ser muy relevante poder observar cómo se comportan los costos que son dependientes del tamaño de lote de pedido ( $Q_{ky}$ ), es decir, los costos logísticos y de almacenamiento.

A continuación, se adjunta un gráfico “FIGURA 19” donde se presenta el comportamiento de los costos dependientes en función del tamaño de lote de pedido para el primer año del ciclo de vida.

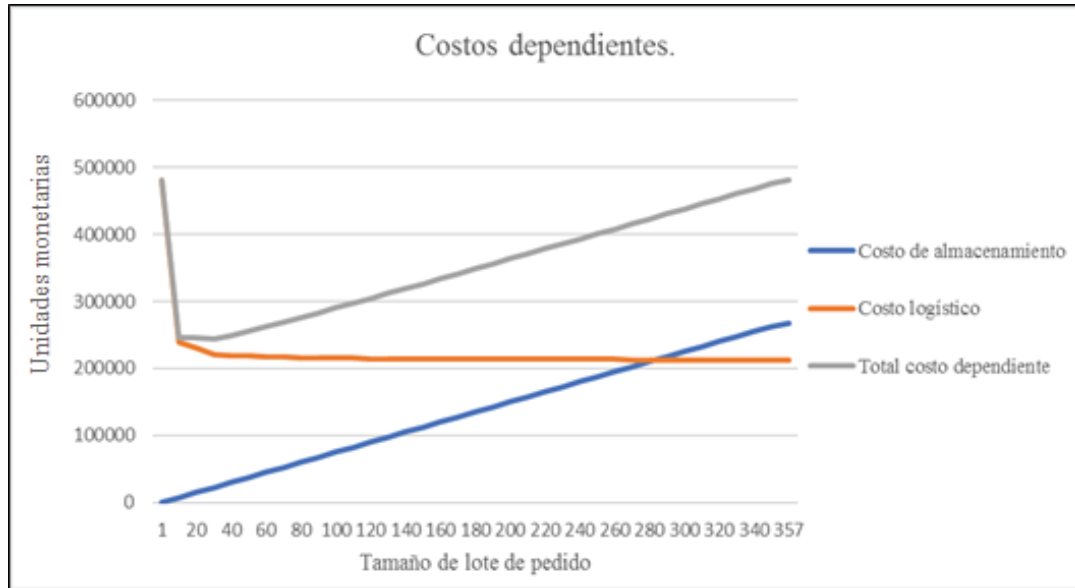


FIGURA 19.- “Comportamiento de los costos dependientes en función del tamaño de lote de pedido”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende de la “FIGURA 19” que el costo de almacenamiento tiene un comportamiento proporcional directo con el tamaño de lote, es decir, mientras más grande el tamaño de lote de pedido más grande será el costo de almacenamiento, asemejando su comportamiento a una recta con una pendiente positiva bien definida dónde la diferencia del costo de almacenamiento entre los extremos del rango del tamaño de lote de pedido se aproxima a 280.000 unidades monetarias.

Por otro lado, el comportamiento del costo logístico también es proporcional al tamaño de lote, pero de manera inversa, es decir, mientras mayor sea el tamaño de lote de pedido, menor será el valor del costo logístico, esta vez la pendiente negativa que define la función del costo logístico no es muy drástica, más bien es bastante discreta la razón de cambio donde la diferencia del costo logístico entre los extremos del rango del tamaño de lote de pedido se aproxima a 50.000 unidades monetarias.

Finalmente, se visualiza la suma de ambos costos, es decir, el costo total dependiente cuyo comportamiento es muy llamativo debido a que presenta a bajos tamaños de lotes una razón

proporcional inversa, mientras que el resto de la curva presenta un comportamiento proporcional directo con el crecimiento del tamaño de lote de pedido. Estos comportamientos concuerdan con los esperados y definidos por el modelo básico de Wilson (EOQ).

En la “FIGURA 20” se presenta el comportamiento de los costos de la gestión durante el ciclo de vida del equipo tratado, sean el costo logístico, de almacenamiento y finalmente el costo directo bajo el criterio de la optimización, es decir, la combinación de los costos anuales que minimizan el costo global de la gestión durante el ciclo de vida del equipo.

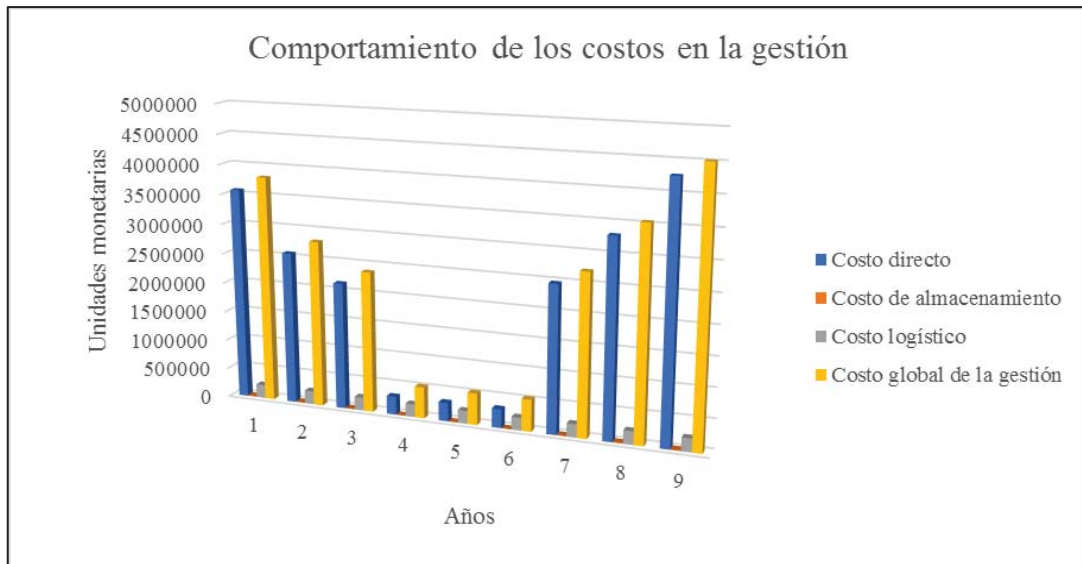


FIGURA 20.- “Comportamiento de los costos en la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende la “FIGURA 20” que los costos de la gestión del repuesto durante el ciclo de vida tienen comportamientos diferentes, el costo de almacenamiento y el costo logístico permanecen casi constantes en el tiempo, mientras que la curva del costo directo se asemeja mucho a la curva de la bañera del repuesto, debido a que el costo directo es función de la tasa de fallas del activo. La suma de los costos es el indicador propósito del desarrollo del método, y que se define como costo global de la gestión del repuesto no reparable, cuya tendencia en el gráfico, en este caso es similar a la curva de la bañera debido a que el costo directo es mucho más elevado en comparación con el costo logístico y de almacenamiento sobre todo en la primera y tercera fase del ciclo del repuesto.



Una vez analizados los comportamientos de los costos involucrados en la gestión de un activo durante su ciclo de vida, es necesario definir el tamaño de lote de pedido óptimo, bajo el criterio de la optimización en el método de búsqueda exhaustivo considerando la política de revisión continua.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Q_min]		[Unidades/pedido]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	19	16	14	5	5	5	14	16	18

TABLA 15.- “Tamaño óptimo de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Si se grafican estos resultados durante el ciclo de vida del equipo, se obtiene:

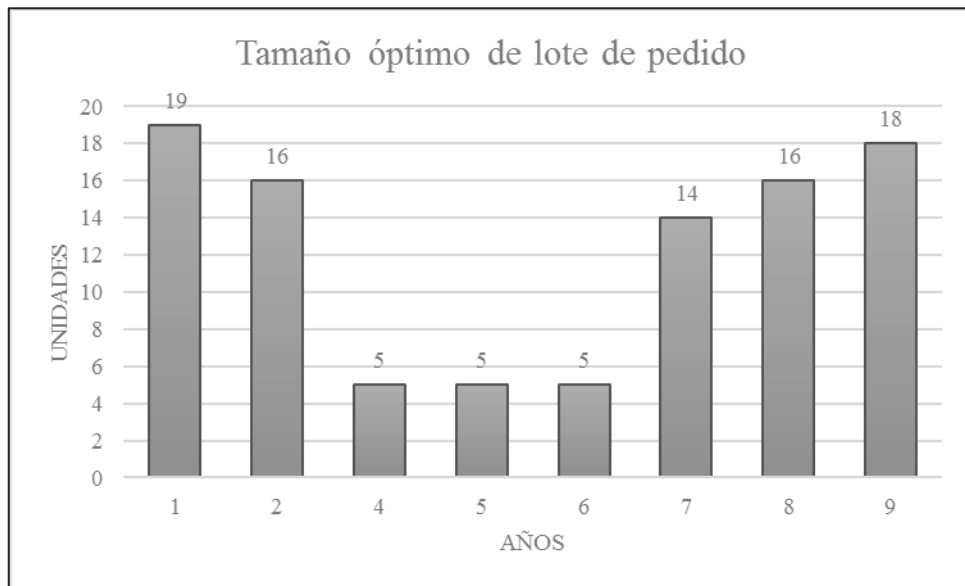


FIGURA 21.- “Tamaño óptimo de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

El tamaño óptimo de lote de pedido demuestra tener un comportamiento similar a la curva de la tasa de fallas anuales del repuesto, misma tendencia que obedece el costo global de la gestión durante el ciclo de vida del activo.

Además, el tamaño de lote óptimo para el primer año del ciclo de vida es de diecinueve unidades, valor que se presagiaba al interpretar la “FIGURA 19”. - “Comportamiento de los costos dependientes en función del tamaño de lote de pedido”.

Teniendo como resultado el tamaño de lote óptimo de pedido, se da paso a presentar entonces la cantidad de veces que se ejecuta la actividad pedir anualmente.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Número de pedidos.		[Nq]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,79	15,75	14,71	5,80	5,80	5,80	15,71	18,00	20,28

TABLA 16.- “Número anuales de ejecuciones de la actividad pedir”.

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el método de búsqueda exhaustiva en la política de revisión continua se obtienen valores decimales para la cantidad de ejecuciones de la actividad pedir anualmente.

Dicho resultado se puede interpretar de dos maneras, como se resume en la siguiente tabla donde se ejemplifican los valores obtenidos en el primer período del ciclo de vida:

Validación de las interpretaciones para el primer periodo del ciclo del vida.								
Interpretación	Q 1	N 1	Q 2	N 2	CA	CD	CL	CG
1	19	18	15	1	\$ 14.095	\$ 3.570.000	\$ 226.450	\$ 3.810.545
2	18	19	15	1	\$ 13.388	\$ 3.570.000	\$ 227.200	\$ 3.810.588

TABLA 17.- “interpretaciones de los resultados obtenidos”.

Fuente: Elaboración propia.

La interpretación 1 es:

- Pedir 18 veces un tamaño de lote de 19 unidades, luego pedir una vez un tamaño de lote de 15 unidades.

La interpretación 2 es:

- Pedir 19 veces un tamaño de lote de 18 unidades, luego pedir una vez un tamaño de lote de 15 unidades.

Se concluye entonces, que cada vez que se obtengan resultados decimales se debe proceder a evaluar las posibles interpretaciones, con el objetivo de poder identificar entre las posibilidades cual se comporta mejor en base a la optimización del costo global de la gestión.

No se puede dejar al azar la interpretación a utilizar, pues en problemáticas de optimización basta con desplazarse unas milésimas del valor para estar fuera de la zona factibles de solución.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto (omitiendo la validación de las interpretaciones en el resto de períodos).

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]				
Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
\$ 3.464.131	\$ 2.319.550	\$ 1.786.166	\$ 360.824	\$ 331.893	\$ 305.311	\$ 1.392.388	\$ 1.655.029	\$ 1.916.830

*TABLA 18.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

De la “TABLA 18”, se concluye que el cálculo de los costos asemeja su tendencia a la curva del costo global de la gestión presentada anteriormente en la FIGURA 20.- “Comportamiento de los costos en la gestión del repuesto”.

Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 13.532.121

*TABLA 19.- “Costo global de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Se concluye entonces que la propuesta del método de búsqueda exhaustiva bajo el criterio de revisión y su implementación en un caso de estudio resulta ser exitoso, donde el costo global de la gestión resulta ser factor de discriminación, abriendo entonces la posibilidad de implementar esta propuesta al criterio de revisión periódica para posteriores comparaciones.

#### 4.2.2 Resultados del método exhaustivo en revisión periódica.

Aplicando la búsqueda exhaustiva considerando la política de la revisión periódica, resulta ser muy relevante poder observar cómo se comportan los costos que son dependientes de la ejecución de un pedido, es decir, los costos logísticos y de almacenamiento.

Es fundamental recordar que en el caso de la política de revisión periódica se determina en primer lugar la cantidad de ejecuciones de pedido, y en base a esto, se define el tamaño de lote de pedido.

A continuación, se adjunta un gráfico “FIGURA 22” donde se presenta el comportamiento de los costos dependientes en función de la cantidad de ejecuciones de la actividad de pedido para el primer año del ciclo de vida del equipo, que se asume puede ser desde una a trecientas sesenta y cinco ejecuciones anuales, es decir, pedir una vez al año hasta una vez diaria.

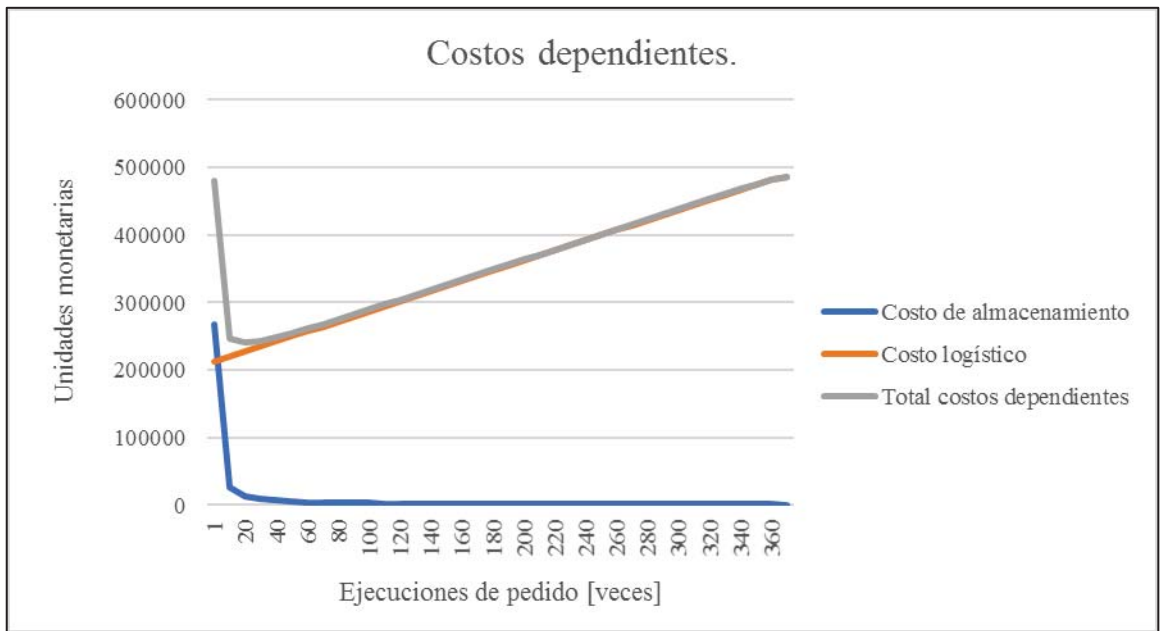


FIGURA 22.- “Comportamiento de los costos dependientes en función de las ejecuciones de un pedido”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende de la “FIGURA 22” que el costo logístico tiene un comportamiento proporcional directo con las veces que se ejecuta un pedido, es decir, mientras más veces se ejecutan los pedidos, más grande será el costo logístico, asemejando su comportamiento a una recta con una

pendiente positiva bien definida dónde la diferencia del costo logístico entre los extremos del rango de ejecuciones se aproxima a 300.000 unidades monetarias.

Por otro lado, el comportamiento del costo de almacenamiento también es proporcional a las veces que se ejecuta un pedido, pero de manera inversa, es decir, mientras más veces se ejecute un pedido menor será el valor del costo de almacenamiento.

Finalmente se visualiza la suma de ambos costos, es decir, el costo total dependiente cuyo comportamiento es muy llamativo debido a que presenta a bajas ejecuciones de pedido una razón proporcional inversa, mientras que el resto de la curva presenta un comportamiento proporcional directo con el crecimiento de la cantidad de ejecuciones.

En la “FIGURA 23” se presenta el comportamiento de los costos de la gestión durante el ciclo de vida del equipo tratado, sean el costo logístico, de almacenamiento y finalmente el costo directo bajo el criterio de la optimización, es decir, la combinación de los costos anuales que minimizan el costo global de la gestión del repuesto.

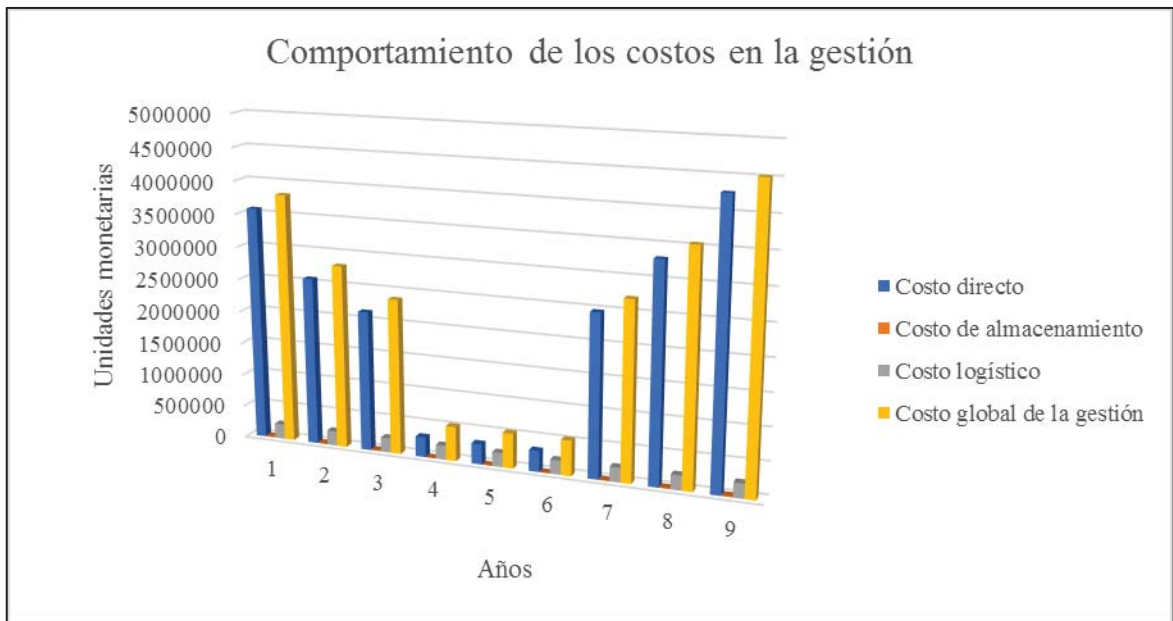


FIGURA 23.- “Comportamiento de los costos en la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende la “FIGURA 23” que los costos de la gestión del repuesto durante el ciclo de vida tienen comportamientos diferentes, el costo de almacenamiento y el costo logístico permanecen

casi constantes en el tiempo, mientras que la curva del costo directo se asemeja mucho a la curva de la bañera del repuesto, debido a que el costo directo es función de la tasa de fallas del activo. La suma de todos los costos definidos, como se dijo, es el indicador global de la gestión del repuesto no reparable, cuya tendencia en el gráfico, en este caso es similar a la curva de la bañera, esto debido a que el costo directo (factor proporcional a la tasa de fallas) resulta ser en este caso mucho mayor en comparación con la suma del costo logístico y de almacenamiento., lo que implica una tendencia similar a la curva de a bañera.

Una vez analizados los comportamientos de los costos involucrados en la gestión de un activo durante su ciclo de vida, es necesario definir el número óptimo de veces que se ejecuta la actividad de pedido en el ciclo de vida, usando, inicialmente, el método de búsqueda exhaustivo en revisión periódica.

RESULTADO	SIGLA.		UNIDAD.						
Números óptimos de pedidos.	[N_min]		[Veces/año]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	19	16	15	6	6	6	16	18	21

TABLA 20.- “Número óptimo de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Si se grafican estos resultados durante el ciclo de vida del equipo, se obtiene:

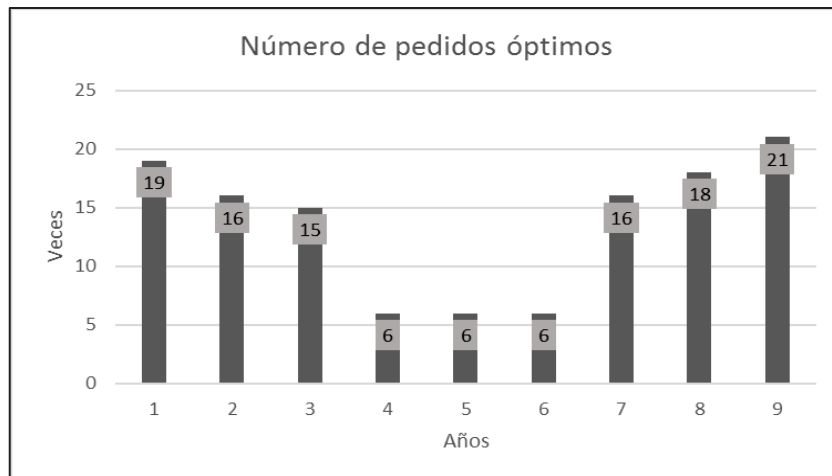


FIGURA 24.- “Número de pedidos óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

El número óptimo de pedidos demuestra tener un comportamiento similar a la curva de la tasa de fallas anuales del repuesto, misma tendencia que obedece el costo global de la gestión del repuesto no reparable.

Teniendo como resultado el número óptimo de pedidos, se da paso a presentar entonces el tamaño de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo.

RESULTADO		SIGLA.	UNIDAD.						
Número de pedidos.		[Nq]	[Veces/año]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,79	15,75	14,71	5,80	5,80	5,80	15,71	18,00	20,28

TABLA 21.- “Tamaños de lotes de pedidos anuales”.

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el método de búsqueda exhaustiva con criterio de revisión periódica se obtienen valores decimales para el tamaño de lote anual. Omitiendo el cálculo de la validación de las interpretaciones, se tiene para el primer período:

- Tasa de falla al primer año: 357 [unidades].
- Ejecutar dieciocho veces la actividad pedir con un tamaño de lote de diecinueve unidades más pedir un último lote con un tamaño de quince unidades.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO		SIGLA.	UNIDAD.						
Costo de la gestión al valor presente neto.		[CGVPN]	[Unid. monetarias]						
Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	
\$ 3.463.131	\$ 2.319.546	\$ 1.786.170	\$ 360.836	\$ 331.902	\$ 305.317	\$ 1.392.390	\$ 1.655.029	\$ 1.916.829	

TABLA 22.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

De la “TABLA 22”, se concluye que el cálculo de los costos asemeja su tendencia a la curva del costo global de la gestión presentada anteriormente la FIGURA 23.- “Comportamiento de los costos en la gestión del repuesto”.

Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 13.532.151

TABLA 23.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el caso de estudio, la diferencia entre el costo global de la gestión en revisión continua y periódica es casi imperceptible, favoreciendo a la revisión continua en un 0,00004%.

#### 4.2.3 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.

En esta sección se omite el análisis del comportamiento de los costos asociados a la gestión de un repuesto no reparable, ya que, la estructura del método de costeo basado en actividades es el mismo que se utiliza en el método exhaustivo en revisión continua, por lo tanto, si se quiere tener información de los comportamientos refiérase al apartado “4.2.1 Resultados del método exhaustivo en revisión continua”.

Se definen entonces los operadores y criterios que configuran la búsqueda de los algoritmos genéticos:

- Población genética: Se crea una población inicial aleatoria con una distribución uniforme, donde el tamaño de la población se define de veinticinco individuos.
- Criterios de parada: El primer criterio de parada es cuando se llegue a un máximo de cien generaciones. El último criterio de detención es que cuando luego de sesenta segundos desde la primera evaluación de la función fitness, no se obtenga ninguna mejora de la función objetivo.
- Operadores genéticos: Se permite copiar al mejor individuo en la próxima generación (Elitismo), Selección de individuos por torneo, generación de un ochenta por ciento (sin considerar la elite) de los nuevos individuos mediante cruce simple de genes, de ser necesario se puede incluir la mutación de nuevos individuos.

De esta manera, fue posible es necesario definir el tamaño de lote de pedido óptimo utilizando algoritmos genéticos con política de revisión continua.



RESULTADO		SIGLA.	UNIDAD.						
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Q_min]	[Unidades/pedido]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,89	15,72	14,07	5,23	5,18	5,13	13,98	15,83	17,65

TABLA 24.- “Tamaño de lote de pedido óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se puede apreciar como el algoritmo genético transcurridos sesenta segundos desde la primera evaluación en la función objetivo se detiene luego de generar cinco nuevas generaciones sin obtener una mejora en la función fitness en el primer período del ciclo de vida.

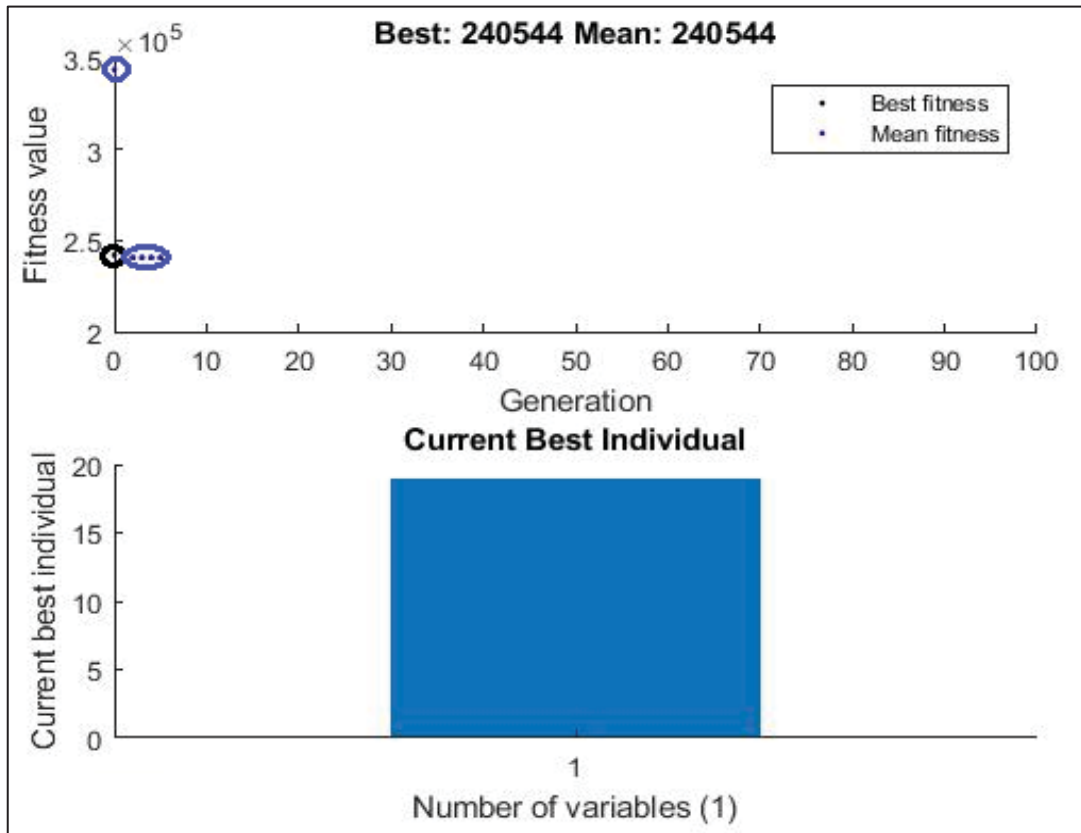


FIGURA 25.- “Generaciones evaluadas en la función objetivo y tamaño de lote óptimo para el primer período del ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

De la “FIGURA 25” se puede observar tanto la evolución del error del mejor individuo (puntos azules) y la media de la población (punto negro), como la mejor solución finalmente encontrada.

Si se grafican los resultados del tamaño de lote de pedido óptimo, se obtiene la “FIGURA 26” mostrada a continuación.

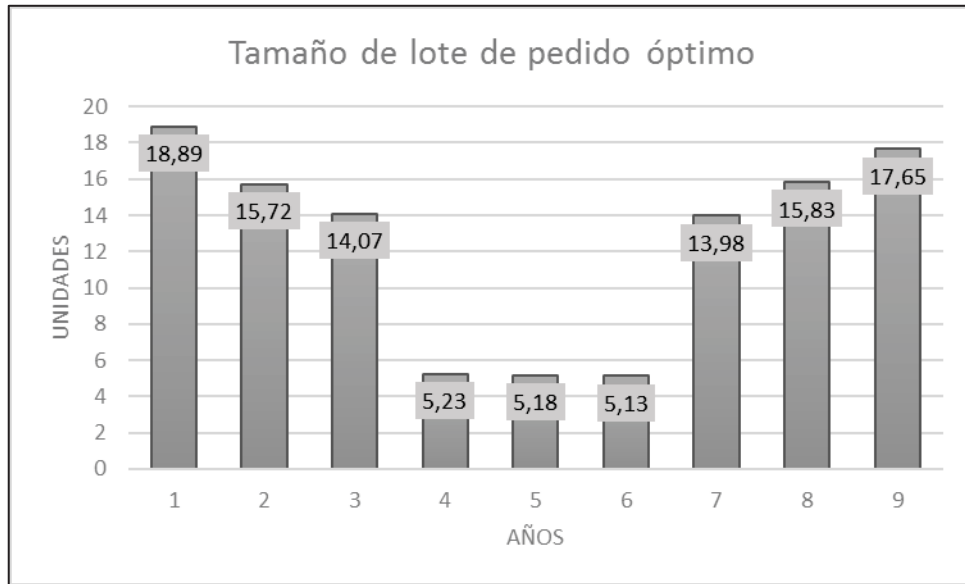


FIGURA 26.- “Tamaño de lote de pedido óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el tamaño de lote óptimo de pedido, se da paso a presentar entonces la cantidad de veces que se ejecuta la actividad pedir anualmente.

RESULTADO	SIGLA.		UNIDAD.						
Número de pedidos.	[Nq]		[Veces/año]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,89	16,03	14,64	5,55	5,60	5,66	15,74	18,19	20,68

TABLA 25.- “Número anuales de ejecuciones de la actividad pedir”.

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el método de optimización con algoritmos genéticos y bajo el criterio de revisión continua se obtienen valores decimales para la cantidad de ejecuciones de la actividad pedir anualmente, al igual que el tamaño de lote de pedido óptimo. Entiéndase que dichos resultados se deben interpretar de la siguiente manera (omitiendo la validación de las interpretaciones):

- Tasa de falla al primer año: 357 [unidades].

- Ejecutar dieciocho veces la actividad pedir con un tamaño de lote de diecinueve unidades más un último lote de quince unidades.

Esta interpretación es válida para todos los años del ciclo de vida en la gestión del repuesto, considerando previamente la validación de las interpretaciones.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetarias]				
Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
\$ 3.463.131	\$ 2.319.546	\$ 1.786.165	\$ 360.818	\$ 331.890	\$ 305.309	\$ 1.392.388	\$ 1.655.028	\$ 1.916.828

TABLA 26.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 13.532.104

TABLA 27.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparables obtenido mediante algoritmo genético versus el factor obtenido mediante la búsqueda exhaustiva, las diferencias entre los mismos son casi imperceptibles, existiendo una leve diferencia que se justifica por trabajar con valores decimales en los tamaños de lotes en el caso de los algoritmos genéticos.

Esto permite concluir que el algoritmo genético fue capaz de encontrar la solución óptima hallada antes, a través de la búsqueda exhaustiva.

#### 4.2.4 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión periódica.

En esta sección se omite el análisis del comportamiento de los costos asociados a la gestión de un repuesto no reparable, ya que, la estructura del método de costeo basado en actividades es el mismo que se utiliza en el método exhaustivo en revisión periódica, por lo tanto, si se quiere

tener información de los comportamientos refiérase al apartado “4.2.2 Resultados del método exhaustivo en revisión periódica”.

Se definen entonces los operadores y criterios que configuran la búsqueda de los algoritmos genéticos, que serán los mismos utilizados en el caso de la política de revisión continua.

Consecuentemente es necesario definir la cantidad óptima de veces que se ejecutarán los pedidos, usando el método de búsqueda por algoritmos genéticos en revisión periódica.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Números óptimos de pedidos.		[N_min]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,89	16,03	14,64	5,55	5,60	5,66	15,74	18,19	20,68

TABLA 28.- “Número óptimo de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

*Fuente: Elaboración propia.*

A diferencia del resultado obtenido por el método de búsqueda exhaustiva, el algoritmo genético es mucho más exacto en la solución considerando los números de pedidos óptimos como valores decimales, que en la realidad de la problemática son resultados imposibles de ejecutar, por lo que se concluye entonces la igualdad de los resultados.

A continuación, se puede apreciar como el algoritmo genético transcurridos sesenta segundos desde la primera evaluación en la función objetivo se detiene luego de generar cinco nuevas generaciones sin obtener una mejora en la función fitness en el primer período del ciclo de vida.

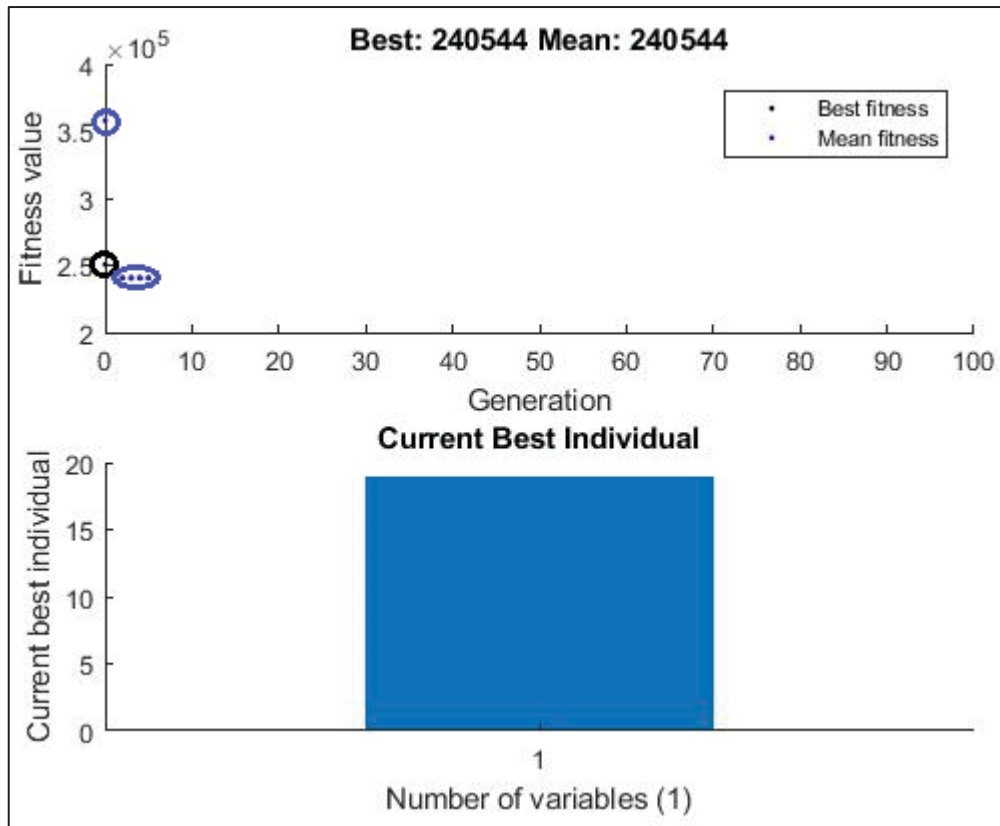


FIGURA 27.- “Generaciones evaluadas en la función objetivo y número de pedido óptimo para el primer período del ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

De la “FIGURA 27” se puede observar tanto la evolución del error del mejor individuo (puntos azules) y la media de la población (punto negro), como la mejor solución finalmente encontrada.

Si se grafican los resultados de los números de pedido óptimo, se obtiene la “FIGURA 28” mostrada a continuación.

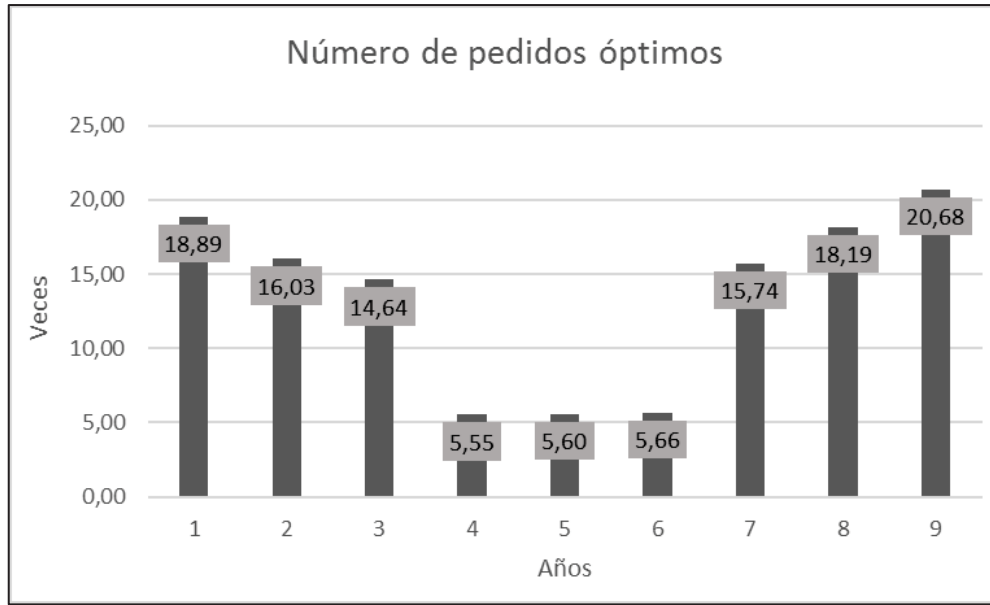


FIGURA 28.- “Número de pedidos óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

El número óptimo de ejecuciones de pedido demuestra tener un comportamiento similar a la curva de la tasa de fallas anuales del repuesto, misma tendencia que obedece el costo global de la gestión del activo no reparable.

Teniendo como resultado el número óptimo de pedidos, se presentan los valores óptimos del tamaño de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo.

RESULTADO	SIGLA.		UNIDAD.						
Cantidad de respuestos por pedido.	[Qn]		[unidades/pedido]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	18,9	15,7	14,1	5,2	5,2	5,1	14,0	15,8	17,7

TABLA 29.- “Tamaño de lotes de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando algoritmos genéticos y bajo el criterio de revisión periódica se obtienen valores decimales para la cantidad de ejecuciones de la actividad pedir, al igual que el tamaño de lote de pedido óptimo. Entiéndase que dichos resultados se deben interpretar de la siguiente manera (omitiendo la validación de los criterios posibles):

- Tasa de falla al primer año: 357 [unidades].

- Ejecutar dieciocho veces la actividad pedir con un tamaño de lote de diecinueve unidades más un último lote con un tamaño de quince unidades.

Esta interpretación es válida para todos los años del ciclo de vida en la gestión del repuesto (considerando la validación de las interpretaciones).

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]				
Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
\$ 3.464.131	\$ 2.319.546	\$ 1.786.165	\$ 360.818	\$ 331.890	\$ 305.309	\$ 1.392.388	\$ 1.655.028	\$ 1.916.828

TABLA 30.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 13.532.104

TABLA 31.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparables obtenido mediante algoritmo genético versus los obtenidos mediante la búsqueda exhaustiva, las diferencias entre los mismos son casi imperceptibles, lo que permite concluir que el algoritmo genético encuentra el valor óptimo.

#### 4.2.5 Conclusiones de la implementación de los modelos.

- Se proponen cuatro modelos de simulación de costos de gestión de piezas de repuestos no reparables a lo largo del ciclo de vida del equipo. Estos modelos fueron desarrollados incorporando aspectos de confiabilidad del componente, pudiendo ser usados para la gestión de más de un tipo de repuesto. La confiabilidad es expresada a través de distribuciones del tipo Weibull, mientras que, las políticas de stock aplicadas son

expresadas a través del número de pedidos para una política de revisión periódica, y del parámetro de tamaño de lote por pedido para una revisión continua.

- Posteriormente fue aplicado en un caso de estudio con un único tipo de repuesto en donde se pudo ver que el modelo al fundamentarse en el costeo basado en actividades permite el cálculo de los costos generados por la gestión de repuestos no reparables, donde el método de los algoritmos genéticos otorga el mismo resultado tanto para revisión continua como periódica, hecho que valida la modelación utilizando algoritmos genéticos.
- Finalmente se concluye de estas propuestas la validación de las modelaciones en la problemática de la logística de inventarios tratada, con esto, se da paso a experimentar en problemáticas de diversas envergaduras y más complejas, como lo es, por ejemplo, evaluar más de un repuesto a la vez, variar los factores de confiabilidad, variar factores económicos, etc. Con esto determinar la mejor política de inventario a utilizar con una visión a largo plazo.



## **5. EXPERIMENTOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

Del marco teórico de la problemática abarcada en este trabajo, se desprende que existen diversos factores que repercuten directamente en el costo global de la gestión de un repuesto no reparable, como lo son, por ejemplo, los costos de adquisición de un repuesto, los costos de los recursos en un determinado periodo, factores de confiabilidad que determinan la magnitud de la tasa de falla, entre otros.

Por otra parte, del capítulo anterior se desprende la validación de los modelos de costeo propuestos, pero esto, considerando la utilización de un único repuesto. Es por esta razón, que en este capítulo se decide experimentar cómo se comportan los modelos frente a problemáticas más complejas, por ejemplo, trabajar con más de un tipo de repuesto, que presenten comportamientos económicos y de confiabilidad distintos entre si, para poder discriminar entre la mejor política de inventario a utilizar.

Hasta el momento siempre se han obtenidos resultados de la búsqueda exhaustiva, pues como se mencionó con anterioridad, la problemática abarcada ha sido bastante sencilla, estos resultados han sido fundamento principal para validar el método de los algoritmos genéticos. Pero, el objetivo principal de implementar un modelo de costeo con la utilización de una metaheurística es obtener resultados de problemáticas complejas cuando la búsqueda exhaustiva no sea capaz de otorgar un resultado, o bien, demore demasiado tiempo en dar una solución.

Por último, se decide implementar una quinta propuesta de modelación del costeo de repuestos no reparables, esta propuesta consiste en trabajar con valores enteros tanto para el tamaño de lote de la actividad “pedir”, como para la cantidad de veces que se “piden” los tamaños de lote, el objetivo de esta propuesta es evitar tener que evaluar la mejor interpretación de los resultados, como se mostró en el capítulo anterior ¿Qué tan efectiva fue resultado ser esta propuesta?

Ya introducidos en el objetivo de este capítulo, se da paso a presentar el desarrollo de los seis experimentos tratados.

### **5.1 Experimento 1: Método de los divisores.**

Debido a que en las propuestas anteriormente implementadas siempre es necesario tener que asumir criterios de interpretación de los resultados, esto debido al obtener como soluciones cifras decimales, se decide experimentar un nuevo método que consta de trabajar sólo con

números enteros. Esto se logra evaluando únicamente los valores que sean divisores de la tasa de falla anual.

Siguiendo con el mismo caso de estudio propuesto en los cuatro casos anteriormente desarrollados, se obtienen los siguientes resultados.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Q_min]		[Unidades/pedido]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	51	63	103	29	29	29	44	48	73

TABLA 32.- “Tamaño de lote de pedido óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el tamaño de lote óptimo de pedido, se da paso a presentar entonces la cantidad de veces que se ejecuta la actividad pedir anualmente.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Número de pedidos.		[Nq]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	7,00	4,00	2,00	1,00	1,00	1,00	5,00	6,00	5,00

TABLA 33.- “Número anuales de ejecuciones de la actividad pedir”.

Fuente: Elaboración propia.

Es interesante visualizar cómo se comportan ambos resultados en función del período evaluado, al igual como se graficó en los apartados anteriores.

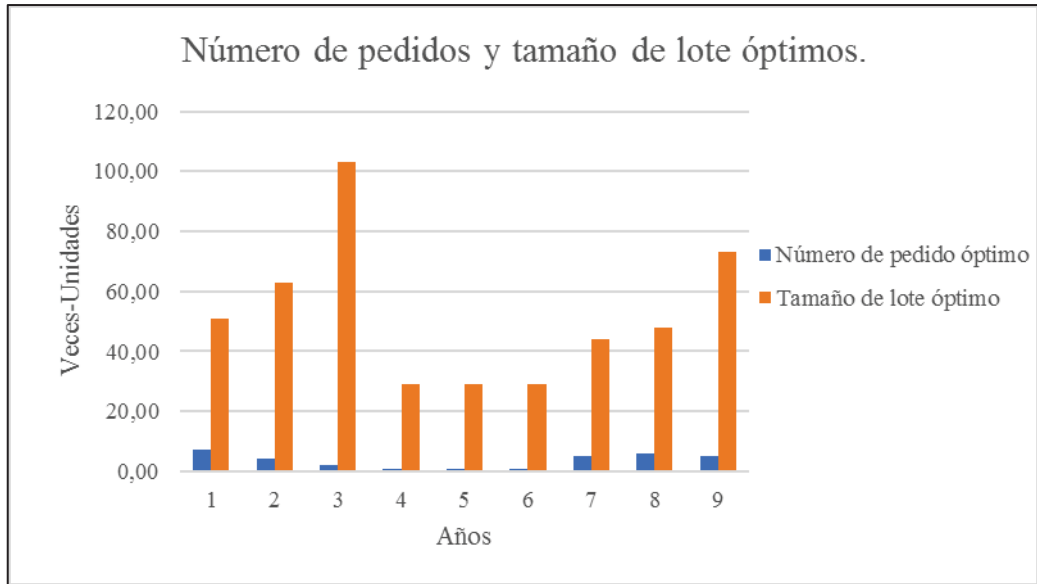


FIGURA 29.- “Comportamiento del número de pedido y tamaño de lote óptimos”.

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia una gran diferencia del comportamiento de las curvas con relación a los métodos anteriormente propuestos, esto porque, ni el número óptimo de pedidos ni el tamaño de lote óptimos se asemejan a la curva de la bañera, efecto del comportamiento que obviamente tendrá influencia en los costos asociados.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.					
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]					
Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	
\$ 3.525.639	\$ 2.366.775	\$ 1.842.447	\$ 376.534	\$ 346.412	\$ 318.730	\$ 1.420.511	\$ 1.684.684	\$ 1.948.371	

TABLA 34.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADO		SIGLA.	UNIDAD.
Costo global de la gestión al valor presente neto.		[CGGVPN]	[Unid. monetaria]
			\$ 13.830.104

TABLA 35.- “Costo globales de la gestión del ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Para poder comprobar la eficacia del método de los divisores, se compara el indicador del costo global de la gestión del repuesto con los resultados obtenidos desde los cuatro métodos anteriormente propuestos, cuyos resultados se adjuntan en la gráfica siguiente.

RESULTADO.			
Costo global de la gestión al valor presente neto. [CGGVPN]			
Unidad	[Unidades monetarias]		
Método	Algoritmos genéticos	Búsqueda exhaustiva	Divisores
Revisión continua	\$ 13.532.151	\$ 13.532.121	\$ 13.830.104
Revisión periódica	\$ 13.532.104	\$ 13.532.104	

TABLA 36.- “Costo globales de la gestión del repuesto en los métodos propuestos”.

Fuente: Elaboración propia.

Claramente se puede observar que las diferencias entre los costos obtenidos mediante la búsqueda exhaustiva y los algoritmos genéticos son casi imperceptibles, mientras que el costo global de la gestión obtenido mediante el método de los divisores es un poco más elevado.

A continuación, se presenta un gráfico comparativo de barras “FIGURA 30”, donde se puede apreciar mejor esta diferencia.

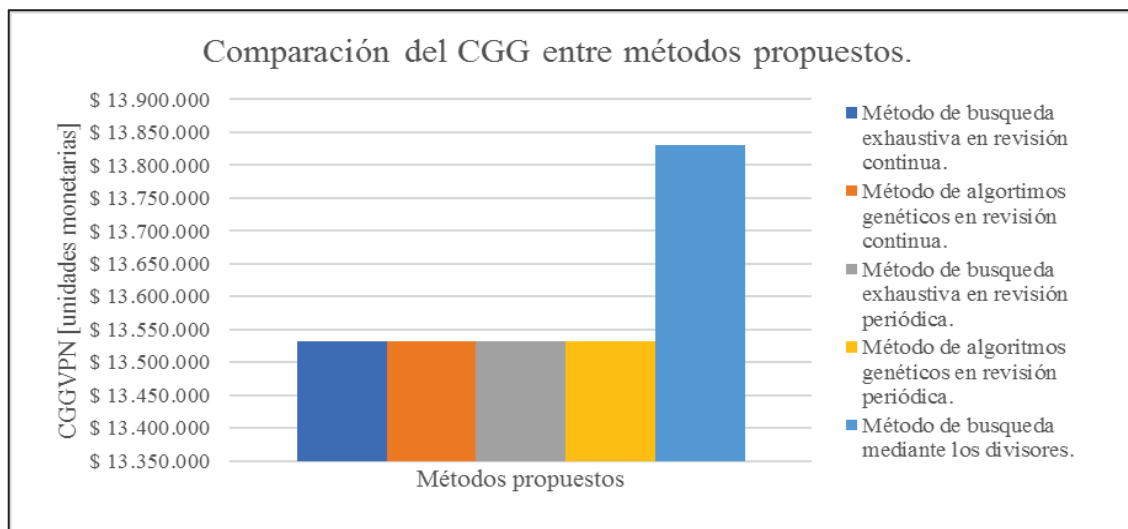


FIGURA 30.- “Comparación del costo global de la gestión entre los métodos propuestos”.

Fuente: Elaboración propia.

Se desprende la “*FIGURA 30*” que el método de búsqueda mediante los divisores tiene un costo global de la gestión del repuesto más elevada en comparación con los otros métodos propuestos que son muy similares. Pero, sin embargo, parece entregar soluciones más viables al problema.

En la “*FIGURA 30*” se puede apreciar una pequeña diferencia entre el costo global de la gestión obtenido mediante el método de los divisores y las otras cuatro propuestas, diferencia que en realidad alcanza a un 2,2% y que equivale aproximadamente a 297984 unidades monetarias, siendo mayor el costo global de gestión obtenido mediante el método de los divisores.

#### 5.1.1 Conclusiones del método divisor.

- Desde el punto de vista del realismo, el método de los divisores parece ser recomendable entre todas las propuestas mencionadas, esto pues no es necesario tener que asumir un criterio de interpretación de los resultados, anulando así la posibilidad de error existente en el criterio del usuario.
- Por otro lado, y considerando el objetivo de la optimización, la propuesta del método de los divisores es, en este caso, menos eficiente, pues el costo global obtenido supera al promedio de las otras cuatro soluciones en un 2,2%.
- Se concluye finalmente la recomendación de no utilizar el método de los divisores y optar por la búsqueda exhaustiva o algoritmos genéticos cuando se pretenda optimizar la gestión de un activo físico no reparable, como lo es el objetivo de este trabajo.

#### 5.2 Experimento 2: Influencias económicas sobre el costo global de la gestión.

Este experimento consiste en hacer variar los valores de algunos factores que tienen influencias en el cálculo del costo global de la gestión, en otras palabras, se sensibilizarán los modelos propuestos, específicamente, los que utilizan el método de los algoritmos genéticos ya que la utilización de la metaheurística permitió agilizar las ejecuciones del cálculo, obteniéndose buenas soluciones también.

##### 5.2.1 Caso original.

Para simplificar el cálculo, se decide evaluar un solo repuesto cuyos factores que describen su comportamiento se describen en las “*TABLAS 37 A 44*”.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.			
VARIABLE.	SIGLA.	UNIDAD.	CANTIDAD.
Número de repuestos.	[k]	[Unidades]	1
Tasa de interes.	[Ti]	[%]	15
Tasa de descuento.	[Td]	[%]	10
Inflación.	[I]	[%]	2
Costo de ejecutar un pedido.	[Cq]	[Unidad monetaria]	\$ 750

TABLA 37.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.			
VARIABLE.	SIGLA.	UNIDAD.	k=1
Ciclo de vida.	[CV]	[Años]	6
Costo de adquisición.	[PV]	[Unidad monetaria]	\$ 7.000
Servicio.	[W]	[Horas/año]	8760

TABLA 38.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.							
VARIABLE.		SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de los recursos anuales.		[Cr]	[Unidad monetaria]				
Mano de obra	Gestión	Equipos de carga	Equipos móviles	Estructura IT	Edificaciones	Auxiliares	Energía
\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000

TABLA 39.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.										
VARIABLE.		SIGLA.	UNIDAD.							
Tamaño de lote por actividad.		[h]	[unid./Actividad]							
Recepción	Almacenaje	Almacenamiento	Deposito	Picking	Cuidados	Embalaje	Embarque	Revisión	Despachos	Informes
1	10	10	10	10	1	10	1	10	10	10

TABLA 40.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.								
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.				
Matriz consumo de recurso por actividad			[r i j]	[%]				
I/J	Mano de obra	Gestión	Equipos de carga	Equipos móviles	Estructura IT	Edificaciones	Auxiliares	Energía
Recepción	24%	24%	19%	0%	1%	14%	9%	10%
Almacenaje	12%	12%	10%	0%	0%	14%	9%	3%
Almacenamiento	6%	6%	4%	0%	0%	14%	9%	24%
Deposito	6%	6%	10%	0%	0%	14%	9%	31%
Picking	19%	20%	48%	0%	3%	14%	9%	3%
Cuidados	13%	13%	0%	0%	17%	13%	9%	10%
Embalaje	15%	14%	10%	0%	3%	13%	9%	7%
Embarque	0%	0%	0%	43%	17%	1%	9%	3%
Revisión	0%	0%	0%	57%	29%	1%	9%	3%
Despachos	2%	2%	0%	0%	29%	1%	9%	3%
Informes	3%	3%	0%	0%	2%	1%	9%	3%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

TABLA 41.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.						
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.		
Parámetro de forma.			[Beta]	[-]		
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6
k=1	0,5	0,5	1	1	3	3

TABLA 42.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.						
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.		
Parámetro de vida característica.			[Alpha]	[-]		
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6
k=1	200	200	90	90	15	15

TABLA 43.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.						
VARIABLE.			SIGLA.	UNIDAD.		
Parámetro inicial de localización.			[gamma]	[-]		
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6
k=1	0	0	0	0	0	0

TABLA 44.- “Variables de entrada”.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con estas variables ingresadas, la tasa de falla anual se comporta conforme se muestra en la “TABLA 45” y “FIGURA 31”.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.		
Tasa de fallas anuales.			[Lambda]	[Unidades/año]		
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6
k=1	309	218	97	97	194	280

TABLA 45.- “Tasa de falla anual”.

Fuente: Elaboración propia.

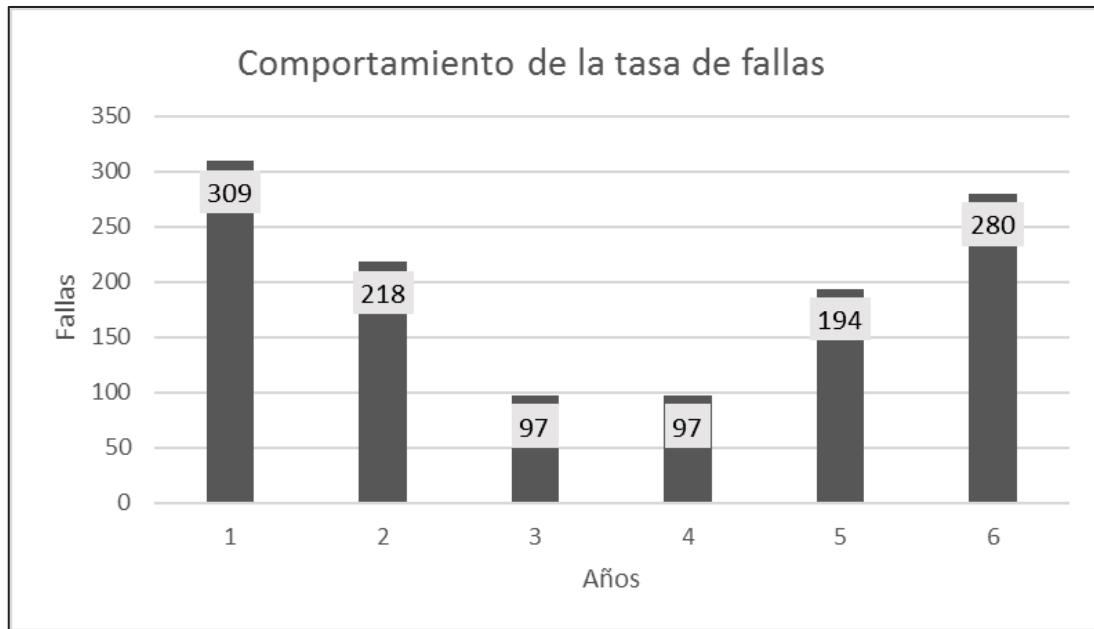


FIGURA 31.- “Comportamiento de la tasa de fallas”.

Fuente: Elaboración propia.



Para el total del ciclo de vida los repuestos requeridos son de mil ciento noventa y cinco unidades.

Posteriormente se calcula el costo global de la gestión del repuesto no reparable, utilizando el método de búsqueda exhaustiva para la política de revisión continua y periódica, obteniendo un mismo valor:

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 7.411.523

TABLA 46.- “Costo global de la gestión”.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2 Variación de la tasa de interés ( $t_i$ ).

Para el caso original se calcula el costo global de la gestión del repuesto no reparable considerando una tasa de interés del 15%. ¿Cómo será el comportamiento con la variación de la misma?

VARIABLE.	
Tasa de interes	CGG
[% ]	[Unid. monetaria]
5	\$ 10.115.079
7	\$ 10.126.331
9	\$ 10.136.060
11	\$ 10.144.755
13	\$ 10.152.690
15	\$ 10.160.035
17	\$ 10.166.904
19	\$ 10.173.380
21	\$ 10.179.523
23	\$ 10.185.380
25	\$ 10.190.987

TABLA 47.- “CGG cuando varia la tasa de interés”.

Fuente: Elaboración propia.

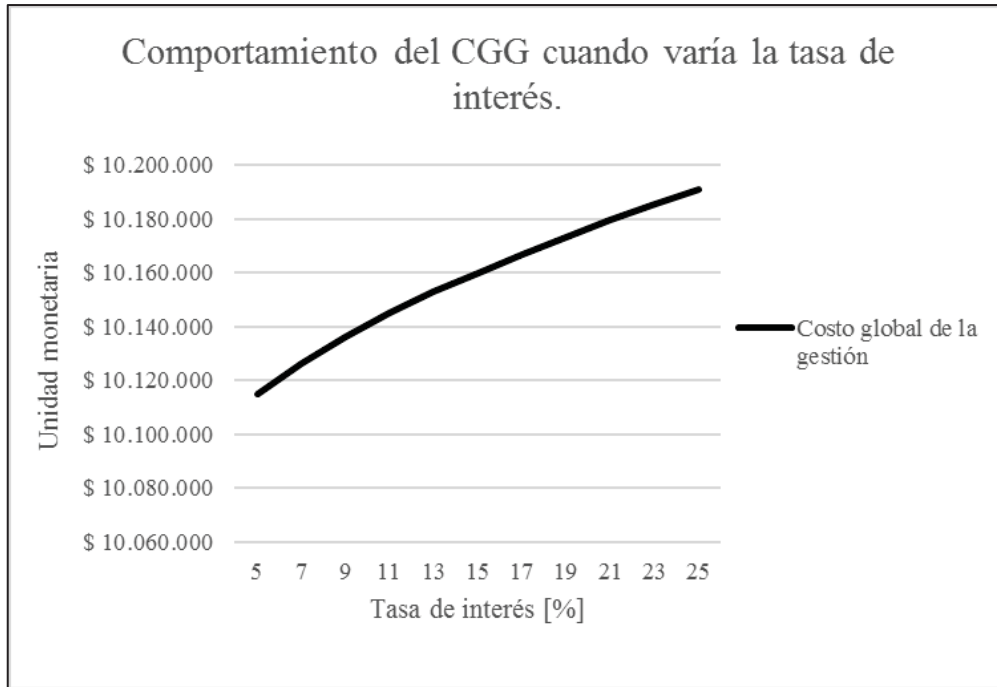


FIGURA 32.- “Comportamiento del CGG cuando varía la tasa de interés”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.2.1 Conclusiones.

- Se concluye y generaliza que la tasa de interés es directamente proporcional al costo global de la gestión del repuesto no reparable, es decir, a medida que la tasa de interés aumenta también aumenta el costo global de la gestión y viceversa.
- También es importante destacar que a medida que la tasa de interés es más grande, la variación del costo global de la gestión va a ser menor, esto por lo menos en el rango de interés desde 5% a 25%, valores comunes. Esto se justifica, pues a medida que la tasa de interés va aumentando, consecuentemente aumenta también el costo de almacenamiento, por lo tanto, se trabaja con tamaño de lotes de pedido cada vez más pequeños para disminuir dicho efecto, incrementándose así el número de ejecuciones de la actividad “pedir”, actividad que también tiene un costo asociado, y que, en el caso propuesto, el costo de ejecutar un pedido es menos influyente que en el costo global de la gestión en comparación con el costo de almacenamiento. Este comportamiento no se puede generalizar y dependerá exclusivamente de la relación económica que exista entre el costo de adquirir un repuesto con el costo de ejecutar un pedido.

- Por lo anterior, se asume que la variación de la tasa de interés no es un factor “crítico” en la determinación del costo global de la gestión de un activo, pues dependerá de la relación económica habla anteriormente, en el caso de estudio tratado al aumentar en un 20% la tasa de interés, el costo global de la gestión sólo varía un 0,75%.

### 5.2.3 Variación del costo de ejecutar un pedido ( $C_Q$ ).

Para el caso original se calcula el costo global de la gestión del repuesto no reparable considerando el costo de ejecutar un pedido de setecientos cincuenta unidades monetarias.

¿Cómo será el comportamiento con la variación del mismo?

VARIABLE.	
Costo de ejecutar un pedido	CGG
[Unid. monetaria]	[Unid. monetaria]
\$ 750	\$ 10.160.035
\$ 1.250	\$ 10.190.987
\$ 1.750	\$ 10.216.146
\$ 2.250	\$ 10.237.901
\$ 2.750	\$ 10.257.346
\$ 3.250	\$ 10.275.089
\$ 3.750	\$ 10.291.512
\$ 4.250	\$ 10.306.872
\$ 4.750	\$ 10.321.353
\$ 5.250	\$ 10.335.089
\$ 5.750	\$ 10.348.185

TABLA 48.- “CGG cuando varía el costo de ejecutar un pedido”.

*Fuente: Elaboración propia.*

Si se disponen los resultados en una gráfica, la curva que se genera es la que se presenta en la “FIGURA 33”:

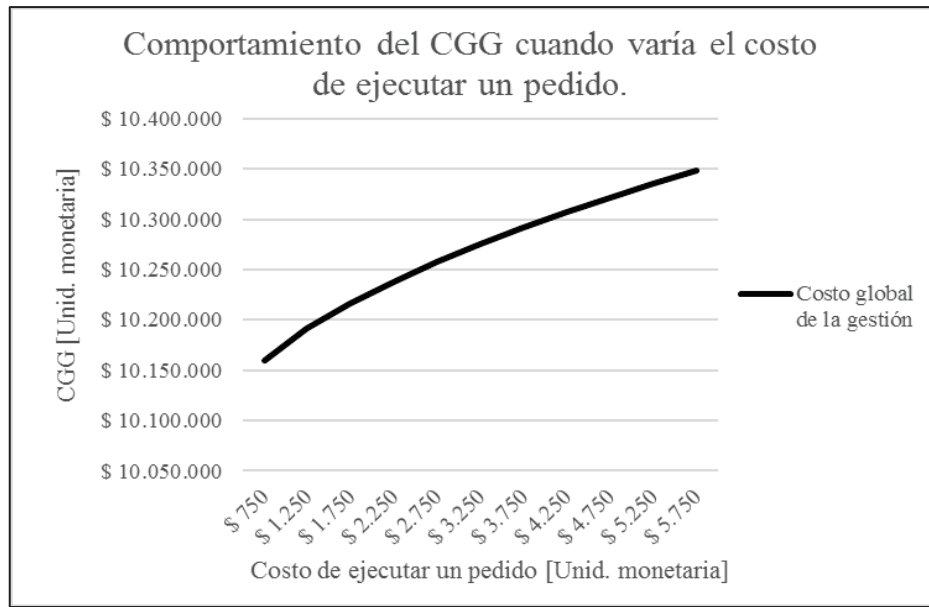


FIGURA 33.- “Comportamiento del CGG cuando varía el costo de ejecutar un pedido”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.3.1 Conclusiones.

- Se concluye y se generaliza que el costo de ejecutar un pedido es directamente proporcional al costo global de la gestión del repuesto no reparable, es decir, a medida que el costo de ejecutar un pedido aumenta también aumenta el costo global de la gestión y viceversa.
- También es importante destacar que a medida que el costo de ejecutar un pedido es más grande, la variación del costo global de la gestión va a ser menor, este comportamiento por lo menos en el rango del costo de ejecutar un pedido desde setecientos cincuenta unidades monetarias hasta cinco mil setecientos cincuenta unidades monetarias. Esto se justifica, pues a medida que el costo de ejecutar un pedido va aumentando, consecuentemente aumenta también el costo de logístico, por lo tanto, se trabaja con menos ejecuciones de la actividad pedir para disminuir dicho efecto, incrementándose así el tamaño de lote de pedido con el cual se trabaja, aumentando consecuentemente el costo de almacenamiento, y que, en el caso propuesto, el costo de ejecutar un pedido es menos influyente que en el costo global de la gestión en comparación con el costo de almacenamiento. Este comportamiento no se puede generalizar y dependerá

exclusivamente de la relación económica que exista entre el costo de adquirir un repuesto con el costo de ejecutar un pedido.

- Por lo anterior, se asume que la variación de la tasa de interés no es un factor “crítico” en la determinación del costo global de la gestión de un activo, pues dependerá de la relación económica habla anteriormente, en el caso de estudio tratado al aumentar en un 20% la tasa de interés, el costo global de la gestión sólo varía un 0,75%.
- Se asume que la variación del costo de ejecutar un pedido, como una actividad independiente, no es un factor “crítico” en la determinación del costo global de la gestión de un activo, pues al incrementar aproximadamente en un 800% el coste de ejecutar un pedido, el costo global de la gestión sólo varía un 2,2%.

#### 5.2.4 Variación del costo de los recursos anuales ( $C_r$ ).

Resulta ser interesante poder entender cómo se comporta el costo global de la gestión del repuesto no reparable cuando se varia uno de los recursos anuales en un incremento del veinticinco por ciento del costo original.

VARIABLE.										
Costo de los recursos anuales [Unidad monetaria]										
Caso	Mano de obra	Gestión	Equipos de carga	Equipos móviles	Estructura IT	Edificaciones	Auxiliares	Energía	CGG	Variación [%]
Original	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.160.035	100,00%
1era modificación	<b>\$ 106.531</b>	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.287.871	101,26%
2da modificación	\$ 85.225	<b>\$ 13.750</b>	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.176.535	100,16%
3ra modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	<b>\$ 3.438</b>	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.164.204	100,04%
4ta modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	<b>\$ 14.375</b>	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.177.285	100,17%
5ta modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	<b>\$ 14.375</b>	\$ 67.000	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.177.458	100,17%
6ta modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	<b>\$ 83.750</b>	\$ 17.500	\$ 6.000	\$ 10.260.535	100,99%
7ma modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	<b>\$ 21.875</b>	\$ 6.000	\$ 10.186.023	100,26%
8va modificación	\$ 85.225	\$ 11.000	\$ 2.750	\$ 11.500	\$ 11.500	\$ 67.000	\$ 17.500	<b>\$ 7.500</b>	\$ 10.168.675	100,09%

TABLA 49.- “CGG cuando varía el costo de los recursos anuales”.

Fuente: Elaboración propia.

##### 5.2.4.1 Conclusiones.

- Se concluye que todas las modificaciones realizadas producen un incremento en el costo global de la gestión, dependiendo del recurso que sufra el alza la variación del costo global de la gestión será diferente. Por ejemplo, cuando se incrementa un 25% el costo

de la mano de obra el costo global de la gestión sufre un incremento de un 1,26% en comparación con el caso original, siendo este recurso el más sensible a las variaciones. Por otro lado, cuando se varía en un 25% el recurso de equipos de carga el costo global de la gestión sufre un incremento de un 0,04% en comparación con el caso original, siendo este recurso el menos sensible a las variaciones.

- Se asume que la variación de uno de los costos de los recursos anuales no es un factor “crítico” en la determinación del costo global de la gestión de un activo. Si se considera el incremento de todos los recursos anuales en un 25%, la variación toma mucho más peso alcanzando un incremento del costo global de la gestión en un 3%.

### 5.3 Experimento 3: Varios tipos de repuestos.

El objetivo por el cual se decide incorporar a la optimización la utilización de una metaheurística, en este caso la de los algoritmos genéticos, es porque estos ofrecen un potencial de optimización superior a los métodos convencionales para la optimización combinatoria, sobre todo cuando se tratan problemáticas que son dependientes de un gran número de variables, obteniendo buenas soluciones de manera rápida y eficaz.

Para poder validar el potencial de los algoritmos genéticos, se decide plantear una problemática diferente a las tratadas en los experimentos anteriores, que consistían en tratar repuestos cuyos costos directos eran demasiado elevados en comparación con el costo de capital o el costo logístico.

Esta vez, se propone un caso de estudio donde se varían diferentes factores que tienen implicancias directas en el costo global de la gestión de repuestos críticos no reparables.

Para facilitar mejor la comprensión de la propuesta, a continuación, se plantea un análisis de la ecuación matemática que define el costo global de la gestión de los repuestos no reparables durante sus ciclos de vida, dicho análisis se describe en las ecuaciones y tablas siguientes:

$$CGGVPN_{k\ cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \frac{CA_k y + CD_k y + CL_k y}{(1+td)^y} \quad [\$].$$

El costo global de la gestión de un repuesto crítico no reparable durante el ciclo de vida consiste en la suma de tres costos, el costo directo, el costo de capital y el costo logístico. Ahora bien, cada uno de estos sumandos también dependen de otros factores, como lo es:

- Costo directo:

$$CD_{k cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \frac{Pv_{ky} \times \lambda_{ky}}{(1+td)^y} \text{ [\$]}.$$

Entonces se concluye, que el costo directo depende tanto de la tasa de falla que redundan en el consumo del repuesto, como del costo de adquisición (o precio) de cada uno de los “K” repuestos.

- Costo de capital:

$$CA_{k cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \frac{\frac{Q_{ky}}{2} \times Pv_{ky} \times ti_y}{(1+td)^y} \text{ [\$]}.$$

Por su parte, el costo de capital depende tanto del costo de adquisición ( $Pv_{ky}$ ), del stock medio de cada uno de los tipos de repuestos considerados y de la tasa de interés.

- Costo logístico:

$$CL_{k cv} = \sum_{y=1}^{cv} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{a_{kiy} \times r_{ijy} \times cr_{jy}}{(1+td)^y} + \frac{\lambda_{ky}}{Q_{ky}} * C_Q \text{ [\$]}.$$

Finalmente, el costo logístico depende de factores como el costo de los recursos anuales ( $C_r$ ), el costo de ejecutar un pedido ( $C_Q$ ), la proporción de consumo de recursos por parte de las actividades ( $r_{ij}$ ), la tasa de falla ( $\lambda_{ky}$ ) y el tamaño de lote de pedido ( $Q_{ky}$ ).

Del análisis de sensibilidad tratado en los experimentos anteriores, se desprende que existen factores cuyas variaciones no generan mayor influencia en el costo global de la gestión de un repuesto crítico no reparable, como lo es, por ejemplo, la tasa de interés. Además, se desprende de la teoría del método “ABC”, que la matriz de consumo de recursos por parte de las actividades tampoco tiene influencia sobre el costo global de la gestión puesto que todos los recursos serán apropiados al conjunto de repuestos durante el ejercicio.

Una vez dicho lo anterior, los factores que tienen mayor influencia sobre el costo global de la gestión de un repuesto crítico son:

- Costo de los recursos anuales ( $C_r, C_Q$ ).
- Costos de adquisición ( $Pv_{ky}$ ).
- La tasa de falla ( $\lambda_{ky}$ ).
- La política de inventario utilizada.

Se asume para variar la tasa de falla, que el parámetro de localización será en todos los casos el mismo e igual a cero, mientras que el parámetro de forma y el parámetro de escala serán las variables en la distribución de densidad de Weibull.

5.3.1.1 Variación del costo de los recursos anuales ( $C_r$ ).

Se definen tres escenarios para el comportamiento del costo de los recursos, un costo elevado, un costo medio y finalmente un costo bajo en base a tres unidades de repuesto, que se expresa en la “TABLA 50”:

VARIABLE.			
Costo de los recursos anuales [Unidad monetaria]			
Recurso	Alto	Medio	Bajo
Mano de obra	\$ 426.125	\$ 85.225	\$ 17.045
Gestión	\$ 55.000	\$ 11.000	\$ 2.200
Equipos de carga	\$ 13.750	\$ 2.750	\$ 550
Equipos móviles	\$ 57.500	\$ 11.500	\$ 2.300
Estructura IT	\$ 57.500	\$ 11.500	\$ 2.300
Edificaciones	\$ 335.000	\$ 67.000	\$ 13.400
Auxiliares	\$ 87.500	\$ 17.500	\$ 3.500
Energía	\$ 30.000	\$ 6.000	\$ 1.200

TABLA 50.- “Costos de los recursos anuales en tres escenarios”.

Fuente: Elaboración propia.

VARIABLE.		
Costo de ejecutar un pedido [Unidad monetaria]		
Alto	Medio	Bajo
\$ 3.750	\$ 750	\$ 150

TABLA 51.- “Costo de ejecutar un pedido en tres escenarios”.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.2 Variación del costo adquisición ( $P_v$ ).

Se definen tres valores del costo de adquisición, un costo elevado, un costo medio y finalmente un costo bajo, que se expresa en la “TABLA 52” siguiente:



VARIABLE.		
Costo de adquisición [Unidad monetaria]		
Alto	Medio	Bajo
\$ 250.000	\$ 50.000	\$ 10.000

TABLA 52.- “Costo de adquisición en tres escenarios”.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.3 Variación de la tasa de fallas ( $\lambda_{ky}$ ).

Como se mencionó con anterioridad, la tasa de fallas es factor exclusivamente de los parámetros de confiabilidad de la distribución de densidad de Weibull, es por esta razón, que se asume entonces la variación del parámetro de forma ( $\beta$ ) y el parámetro de escala( $\alpha$ ), para definir así, las tasas de fallas correspondientes a cada repuesto en sus respectivos períodos.

Se consideran entonces, tres de los comportamientos típicos de los componentes no reparables, como se muestra en la “FIGURA 34”:

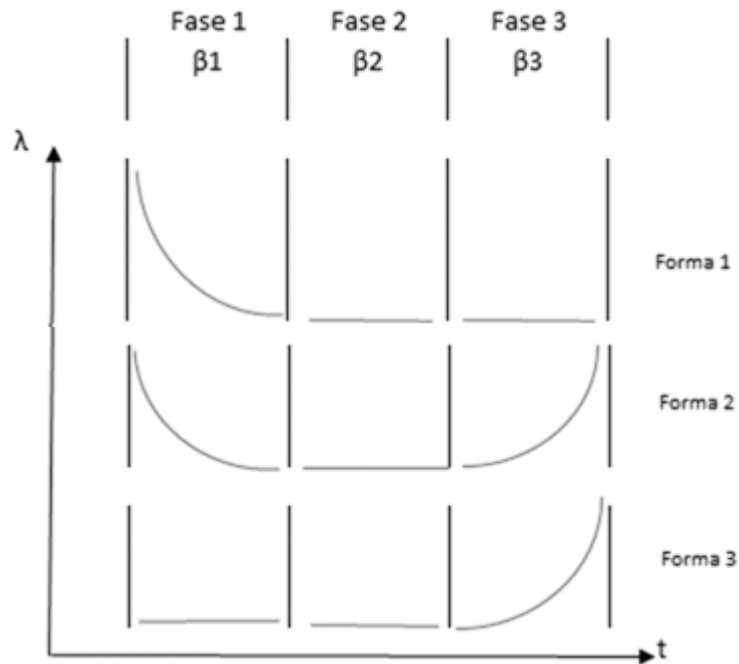


FIGURA 34.- “Comportamientos clásicos de las tasas de fallas”.

Fuente: Elaboración propia.

Se asume que el equipo al cual pertenecen los repuestos tiene ciclo de vida de nueve años, donde cada fase de su ciclo de vida tiene una duración de tres años.

VARIABLE.									
Parámetros de confiabilidad [-].									
Forma 1.									
Parámetro.	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Forma	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1
Escala	100	100	100	150	150	150	150	150	150
Forma 2.									
Parámetro.	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Forma	0,5	0,5	0,5	1	1	1	3	3	3
Escala	100	100	100	150	150	150	13	13	13
Forma 3.									
Parámetro.	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Forma	1	1	1	1	1	1	3	3	3
Escala	150	150	150	150	150	150	13	13	13

TABLA 53.- “Parámetros de confiabilidad en tres escenarios”.

Fuente: Elaboración propia.

Asumiendo las variables definidas, se procede a definir todos los repuestos a evaluar combinando todas las variables, tal y como se muestra en la “TABLA 54”:

COMBINACIÓN DE VARIABLES.			
Repuesto	Costo de los recursos	Costo de adquisición	Forma
1	Alto	Alto	1
2	Alto	Alto	2
3	Alto	Alto	3
4	Alto	Medio	1
5	Alto	Medio	2
6	Alto	Medio	3
7	Alto	Bajo	1
8	Alto	Bajo	2
9	Alto	Bajo	3
10	Medio	Alto	1
11	Medio	Alto	2
12	Medio	Alto	3
13	Medio	Medio	1
14	Medio	Medio	2
15	Medio	Medio	3
16	Medio	Bajo	1
17	Medio	Bajo	2
18	Medio	Bajo	3
19	Bajo	Alto	1
20	Bajo	Alto	2
21	Bajo	Alto	3
22	Bajo	Medio	1
23	Bajo	Medio	2
24	Bajo	Medio	3
25	Bajo	Bajo	1
26	Bajo	Bajo	2
27	Bajo	Bajo	3

TABLA 54.- “Definición de los repuestos y sus variables”.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 Resultados generales de Weibull.

Con la ecuación de distribución de densidad de Weibull se estiman las tasas de fallas para cada período, en este caso de estudio corresponden a tasas de fallas anuales.

Estas tasas de fallas son los primeros resultados obtenidos del modelo propuesto, y que consecuentemente pasan a ser los datos que desencadenan la ejecución del costeo basado en actividades, bajo la política de stock en revisión continua o revisión periódica, los resultados se visualizan en la “TABLA 55” adjunta a continuación.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Tasa de fallas anuales.		[Lambda]	[Unidades/año]						
k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=2	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=3	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=4	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=5	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=6	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=7	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=8	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=9	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=10	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=11	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=12	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=13	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=14	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=15	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=16	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=17	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=18	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=19	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=20	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=21	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=22	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=23	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=24	58	58	58	58	58	58	586	765	968
k=25	438	309	252	58	58	58	58	58	58
k=26	438	309	252	58	58	58	586	765	968
k=27	58	58	58	58	58	58	586	765	968

TABLA 55.- “Tasas de falla anual”.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 Resultados del método de búsqueda exhaustivo en revisión continua.

Aplicado el primer método de búsqueda desarrollado, método exhaustivo bajo la política de la revisión continua, resulta ser muy relevante poder observar cuales son los tamaños de lote de pedido óptimos.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Q_min]		[Unidades/pedido]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	9	8	7	3	3	3	3	3	3
k=2	9	8	7	3	3	3	10	12	13
k=3	3	3	3	3	3	3	10	12	13
k=4	21	17	16	7	7	7	7	7	7
k=5	21	17	16	7	7	7	23	26	29
k=6	8	8	7	7	7	7	23	26	29
k=7	47	39	35	17	16	16	16	16	16
k=8	47	39	35	17	16	16	51	58	64
k=9	17	17	17	17	16	16	51	58	64
k=10	4	4	3	2	2	2	2	2	1
k=11	4	4	3	2	2	2	5	5	6
k=12	2	2	2	2	2	2	5	5	6
k=13	9	8	7	3	3	3	3	3	3
k=14	9	8	7	3	3	3	10	12	13
k=15	3	3	3	3	3	3	10	12	13
k=16	21	17	16	7	7	7	7	7	7
k=17	21	17	16	7	7	7	23	26	29
k=18	8	8	7	7	7	7	23	26	29
k=19	2	2	1	1	1	1	1	1	1
k=20	2	2	1	1	1	1	2	2	3
k=21	1	1	1	1	1	1	2	2	3
k=22	4	4	3	2	2	2	2	2	1
k=23	4	4	3	2	2	2	5	5	6
k=24	2	2	2	2	2	2	5	5	6
k=25	9	8	7	3	3	3	3	3	3
k=26	9	8	7	3	3	3	10	12	13
k=27	3	3	3	3	3	3	10	12	13

TABLA 56.- “Tamaño de lote de pedido óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el tamaño de lote óptimo de pedido, se da paso a presentar entonces la cantidad de veces que se ejecuta la actividad pedir anualmente.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Número de pedidos.		[Nq]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
k=2	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5
k=3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5
k=4	20,9	18,2	15,8	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
k=5	20,9	18,2	15,8	8,3	8,3	8,3	25,5	29,4	33,4
k=6	7,3	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3	25,5	29,4	33,4
k=7	9,3	7,9	7,2	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
k=8	9,3	7,9	7,2	3,4	3,6	3,6	11,5	13,2	15,1
k=9	3,4	3,4	3,4	3,4	3,6	3,6	11,5	13,2	15,1
k=10	109,5	77,3	84,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	58,0
k=11	109,5	77,3	84,0	29,0	29,0	29,0	117,2	153,0	161,3
k=12	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	117,2	153,0	161,3
k=13	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
k=14	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5
k=15	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5
k=16	20,9	18,2	15,8	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
k=17	20,9	18,2	15,8	8,3	8,3	8,3	25,5	29,4	33,4
k=18	7,3	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3	25,5	29,4	33,4
k=19	219,0	154,5	252,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0
k=20	219,0	154,5	252,0	58,0	58,0	58,0	293,0	382,5	322,7
k=21	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	293,0	382,5	322,7
k=22	109,5	77,3	84,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	58,0
k=23	109,5	77,3	84,0	29,0	29,0	29,0	117,2	153,0	161,3
k=24	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	117,2	153,0	161,3
k=25	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
k=26	48,7	38,6	36,0	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5
k=27	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	58,6	63,8	74,5

TABLA 57.- “Número anuales de ejecuciones de la actividad pedir”.

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el método de búsqueda exhaustiva en la política de revisión continua se obtienen valores decimales para la cantidad de ejecuciones de la actividad pedir anualmente.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto (omitiendo la validación de las interpretaciones en el resto de períodos).

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]				
Año = 1	Año = 2	Año = 3	Año = 4	Año = 5	Año = 6	Año = 7	Año = 8	Año = 9
\$ 795.295.767	\$ 534.859.070	\$ 412.894.102	\$ 120.730.738	\$ 111.894.772	\$ 103.706.464	\$ 664.477.758	\$ 794.672.865	\$ 924.594.943

TABLA 58.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 4.463.126.478

TABLA 59.- “Costo global de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	1837,8

TABLA 60.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Se concluye entonces que la propuesta del método de búsqueda exhaustiva bajo el criterio de revisión continua otorga resultados con una correcta metodología de solución y búsqueda, donde el costo global de la gestión resulta ser factor de discriminación, abriendo entonces la posibilidad de implementar esta propuesta al criterio de revisión periódica para posteriores comparaciones.

#### 5.3.4 Resultados del método exhaustivo en revisión periódica.

Aplicando el segundo método de búsqueda desarrollado, método exhaustivo bajo la política de la revisión periódica, resulta ser muy relevante poder observar cómo se comportan los costos que son dependientes de la ejecución de un pedido, es decir, los costos logísticos y de almacenamiento.

Es fundamental recordar que en el caso de la política de revisión periódica se determina en primer lugar la cantidad de ejecuciones de pedido, y en base a esto, se define el tamaño de lote de pedido.

Se define el número óptimo de veces que se ejecuta la actividad de pedido en el ciclo de vida, usando, inicialmente, el método de búsqueda exhaustivo en revisión periódica.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Número de pedidos.		[N_min]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	47	40	36	18	18	18	18	18	18
k=2	47	40	36	18	18	18	57	66	75
k=3	17	17	17	18	18	18	57	66	75
k=4	21	18	16	8	8	8	8	8	8
k=5	21	18	16	8	8	8	26	30	34
k=6	8	8	8	8	8	8	26	30	34
k=7	9	8	7	4	4	4	4	4	4
k=8	9	8	7	4	4	4	11	13	15
k=9	3	3	4	4	4	4	11	13	15
k=10	105	89	81	39	40	40	40	41	41
k=11	105	89	81	39	40	40	128	148	168
k=12	38	38	39	39	40	40	128	148	168
k=13	47	40	36	18	18	18	18	18	18
k=14	47	40	36	18	18	18	57	66	75
k=15	17	17	17	18	18	18	57	66	75
k=16	21	18	16	8	8	8	8	8	8
k=17	21	18	16	8	8	8	26	30	34
k=18	8	8	8	8	8	8	26	30	34
k=19	234	198	181	88	89	89	90	91	92
k=20	234	198	181	88	89	89	287	331	365
k=21	85	86	87	88	89	89	287	331	365
k=22	105	89	81	39	40	40	40	41	41
k=23	105	89	81	39	40	40	128	148	168
k=24	38	38	39	39	40	40	128	148	168
k=25	47	40	36	18	18	18	18	18	18
k=26	47	40	36	18	18	18	57	66	75
k=27	17	17	17	18	18	18	57	66	75

TABLA 61.- “Número óptimo de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el número óptimo de pedidos, se da paso a presentar entonces el tamaño de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo.



RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.						
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.			[Qn]	[Unidades/pedido]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	
k=1	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	
k=2	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	
k=3	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	
k=4	20,9	17,2	15,8	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	
k=5	20,9	17,2	15,8	7,3	7,3	7,3	22,5	25,5	28,5	
k=6	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	22,5	25,5	28,5	
k=7	48,7	38,6	36,0	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	
k=8	48,7	38,6	36,0	14,5	14,5	14,5	53,3	58,8	64,5	
k=9	19,3	19,3	14,5	14,5	14,5	14,5	53,3	58,8	64,5	
k=10	4,2	3,5	3,1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	
k=11	4,2	3,5	3,1	1,5	1,5	1,5	4,6	5,2	5,8	
k=12	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	4,6	5,2	5,8	
k=13	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	
k=14	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	
k=15	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	
k=16	20,9	17,2	15,8	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	
k=17	20,9	17,2	15,8	7,3	7,3	7,3	22,5	25,5	28,5	
k=18	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	22,5	25,5	28,5	
k=19	1,9	1,6	1,4	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	
k=20	1,9	1,6	1,4	0,7	0,7	0,7	2,0	2,3	2,7	
k=21	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	2,0	2,3	2,7	
k=22	4,2	3,5	3,1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	
k=23	4,2	3,5	3,1	1,5	1,5	1,5	4,6	5,2	5,8	
k=24	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	4,6	5,2	5,8	
k=25	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	
k=26	9,3	7,7	7,0	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	
k=27	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2	3,2	10,3	11,6	12,9	

TABLA 62.- “Tamaños de lotes de pedidos anuales”.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.					
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]					
Año = 1	Año = 2	Año = 3	Año = 4	Año = 5	Año = 6	Año = 7	Año = 8	Año = 9	
\$ 795.289.602	\$ 534.848.436	\$ 412.884.987	\$ 120.718.196	\$ 111.882.848	\$ 103.695.120	\$ 664.473.151	\$ 794.667.959	\$ 924.590.435	

TABLA 63.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 4.463.050.735

TABLA 64.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	1210,4

TABLA 65.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de estudio, la diferencia entre el costo global de la gestión en revisión continua y periódica es de 75.743 unidades monetarias, favoreciendo en este caso a la revisión periódica (menor costo global de la gestión). Por otro lado, también bajo el criterio de revisión periódica se obtuvo un menor tiempo de ejecución en el software, esto se justifica por la diferencia de tamaño de las zonas factibles de búsqueda.

### 5.3.5 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.

Es necesario en primera instancia definir los operadores y criterios que configuran la búsqueda mediante algoritmos genéticos:

- Población genética: Se crea una población inicial aleatoria con una distribución uniforme, donde el tamaño de la población es de 25 individuos.
- Criterios de parada: El primer criterio de parada es cuando se genere un máximo de cien generaciones. El último criterio de detención es que cuando luego de sesenta segundos desde la primera evaluación de la función fitness, no se obtenga ninguna mejora en el valor de dicha función.
- Operadores genéticos: Se permite copiar al mejor individuo en la próxima generación (Elitismo), Selección de individuos por torneo, generación de un ochenta por ciento (sin considerar la elite) de los nuevos individuos mediante cruce simple de genes, de ser necesario se puede incluir la mutación de nuevos individuos.

Consecuentemente, es necesario definir el tamaño de lote de pedido óptimo utilizando algoritmos genéticos en revisión continua.

RESULTADO		SIGLA.			UNIDAD.				
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Q_min]			[Unidades/pedido]				
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=2	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=3	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=4	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	7,18	7,11	7,04
k=5	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=6	7,62	7,54	7,47	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=7	46,80	38,92	34,80	16,53	16,37	16,21	16,05	15,89	15,73
k=8	46,80	38,92	34,80	16,53	16,37	16,21	51,01	57,71	64,27
k=9	17,03	16,86	16,70	16,53	16,37	16,21	51,01	57,71	64,27
k=10	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41
k=11	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=12	1,52	1,51	1,49	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=13	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=14	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=15	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=16	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	7,18	7,11	7,04
k=17	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=18	7,62	7,54	7,47	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=19	1,87	1,56	1,39	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k=20	1,87	1,56	1,39	1,00	1,00	1,00	2,04	2,31	2,57
k=21	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,04	2,31	2,57
k=22	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41
k=23	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=24	1,52	1,51	1,49	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=25	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=26	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=27	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85

TABLA 66.- “Tamaño de lote de pedido óptimo durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado el tamaño de lote óptimo de pedido, se da paso a presentar entonces la cantidad de veces que se ejecuta la actividad pedir anualmente.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Número de pedidos.		[Nq]		[Veces/año]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43
k=2	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,28	75,30
k=3	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,28	75,30
k=4	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	8,08	8,16	8,24
k=5	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68
k=6	7,62	7,69	7,77	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68
k=7	9,36	7,94	7,24	3,51	3,54	3,58	3,61	3,65	3,69
k=8	9,36	7,94	7,24	3,51	3,54	3,58	11,49	13,26	15,06
k=9	3,41	3,44	3,47	3,51	3,54	3,58	11,49	13,26	15,06
k=10	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	40,41	40,81	41,22
k=11	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39
k=12	38,08	38,46	38,84	39,23	39,62	40,01	128,44	148,22	168,39
k=13	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43
k=14	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30
k=15	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30
k=16	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	8,08	8,16	8,24
k=17	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68
k=18	7,62	7,69	7,77	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68
k=19	233,98	198,49	181,04	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00
k=20	233,98	198,49	181,04	58,00	58,00	58,00	287,22	331,42	376,52
k=21	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	287,22	331,42	376,52
k=22	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	40,41	40,81	41,22
k=23	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39
k=24	38,08	38,46	38,84	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39
k=25	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43
k=26	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,28	75,30
k=27	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,31

TABLA 67.- “Número anuales de ejecuciones de la actividad pedir”.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO			SIGLA.		UNIDAD.			
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]		[Unid. monetaria]			
Año = 1	Año = 2	Año = 3	Año = 4	Año = 5	Año = 6	Año = 7	Año = 8	Año = 9
\$ 795.290.963	\$ 534.849.808	\$ 412.886.288	\$ 120.722.270	\$ 111.886.939	\$ 103.699.170	\$ 664.474.346	\$ 794.669.184	\$ 924.591.577

TABLA 68.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 4.463.070.544

TABLA 69.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	487,7

TABLA 70.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparables obtenido mediante algoritmo genético versus el factor obtenido mediante la búsqueda exhaustiva, las diferencias entre los mismos son casi imperceptibles, existiendo una leve diferencia que se justifica por trabajar con valores decimales en los tamaños de lotes en el caso de los algoritmos genéticos. Se observan menores tiempos de ejecución del algoritmo genético, con los operadores ya especificados.

### 5.3.6 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión periódica.

Se definen los operadores y criterios que configuran la búsqueda de los algoritmos genéticos, que serán los mismos utilizados en el caso de la política de revisión continua.

Consecuentemente es necesario definir la cantidad óptima de veces que se ejecutarán los pedidos, usando el método de búsqueda por algoritmos genéticos en revisión periódica.

RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.						
Número de pedidos.			[N_min]	[Veces/año]						
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	
k=1	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43	
k=2	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	
k=3	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	
k=4	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	8,08	8,16	8,24	
k=5	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68	
k=6	7,62	7,69	7,77	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68	
k=7	9,36	7,94	7,24	3,51	3,54	3,58	3,61	3,65	3,69	
k=8	9,36	7,94	7,24	3,51	3,54	3,58	11,49	13,26	15,06	
k=9	3,41	3,44	3,47	3,51	3,54	3,58	11,49	13,26	15,06	
k=10	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	40,41	40,81	41,22	
k=11	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39	
k=12	38,08	38,46	38,84	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39	
k=13	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43	
k=14	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	
k=15	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	
k=16	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	8,08	8,16	8,24	
k=17	20,93	17,75	16,19	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68	
k=18	7,62	7,69	7,77	7,85	7,92	8,00	25,69	29,64	33,68	
k=19	233,99	198,49	181,03	87,71	88,59	89,47	90,36	91,26	92,17	
k=20	233,99	198,49	181,03	87,71	88,59	89,47	287,21	331,43	365,00	
k=21	85,15	85,99	86,85	87,71	88,59	89,47	287,21	331,43	365,00	
k=22	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	40,41	40,81	41,22	
k=23	104,64	88,77	80,96	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39	
k=24	38,08	38,46	38,84	39,23	39,62	40,01	128,45	148,22	168,39	
k=25	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	18,07	18,25	18,43	
k=26	46,80	39,70	36,21	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	
k=27	17,03	17,20	17,37	17,54	17,72	17,89	57,44	66,29	75,30	

TABLA 71.- “Número óptimo de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del resultado obtenido por el método de búsqueda exhaustiva, el algoritmo genético es mucho más exacto en la solución considerando los números de pedidos óptimos como valores decimales, que en la realidad de la problemática son resultados imposibles de ejecutar, por lo que se concluye entonces la igualdad de los resultados.

Teniendo como resultado el número óptimo de pedidos, se presentan los valores óptimos del tamaño de lote de pedido durante el ciclo de vida del equipo.

RESULTADO		SIGLA.		UNIDAD.					
Cantidad óptima de repuestos por pedidos.		[Qn]		[Unidades/pedido]					
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9
k=1	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=2	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=3	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=4	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	7,18	7,11	7,04
k=5	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=6	7,62	7,54	7,47	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=7	46,80	38,92	34,80	16,53	16,37	16,21	16,05	15,89	15,73
k=8	46,80	38,92	34,80	16,53	16,37	16,21	51,01	57,71	64,27
k=9	17,03	16,86	16,70	16,53	16,37	16,21	51,01	57,71	64,27
k=10	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41
k=11	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=12	1,52	1,51	1,49	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=13	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=14	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=15	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=16	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	7,18	7,11	7,04
k=17	20,93	17,41	15,56	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=18	7,62	7,54	7,47	7,39	7,32	7,25	22,81	25,81	28,74
k=19	1,87	1,56	1,39	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63
k=20	1,87	1,56	1,39	0,66	0,65	0,65	2,04	2,31	2,65
k=21	0,68	0,67	0,67	0,66	0,65	0,65	2,04	2,31	2,65
k=22	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41
k=23	4,19	3,48	3,11	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=24	1,52	1,51	1,49	1,48	1,46	1,45	4,56	5,16	5,75
k=25	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15
k=26	9,36	7,78	6,96	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85
k=27	3,41	3,37	3,34	3,31	3,27	3,24	10,20	11,54	12,85

TABLA 72.- “Tamaño de lotes de pedidos durante el ciclo de vida del equipo”.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando algoritmos genéticos y bajo el criterio de revisión periódica se obtienen valores decimales para la cantidad de ejecuciones de la actividad pedir, al igual que el tamaño de lote de pedido óptimo.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.



RESULTADO			SIGLA.	UNIDAD.				
Costo de la gestión al valor presente neto.			[CGVPN]	[Unid. monetaria]				
Año = 1	Año = 2	Año = 3	Año = 4	Año = 5	Año = 6	Año = 7	Año = 8	Año = 9
\$ 795.289.230	\$ 534.848.133	\$ 412.884.670	\$ 120.717.591	\$ 111.882.432	\$ 103.694.833	\$ 664.472.956	\$ 794.667.849	\$ 924.590.343

TABLA 73.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 4.463.048.038

TABLA 74.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	455,2

TABLA 75.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparable obtenido mediante algoritmo genético versus el factor obtenido mediante la búsqueda exhaustiva, las diferencias entre los mismos son casi imperceptibles favoreciendo en este al algoritmo genético, diferencia que se justifica por trabajar con valores decimales en las cantidades de ejecuciones de pedido.

### 5.3.7 Conclusiones.

- Se concluye entonces que la propuesta de optimización por medio de algoritmos genéticos y bajo ambas políticas de inventario, otorga resultados más que aceptables.

- Se concluye al ejecutarse en un menor tiempo de ejecución los algoritmos genéticos, con los operadores ya especificados se obtuvo una reducción de aproximadamente de trece minutos en comparación con la búsqueda exhaustiva.
- Al trabajar con repuestos cuyas configuraciones de costos son diferentes, y en base a los resultados obtenidos, se puede concluir que el factor más influyente sobre la optimización en ambas políticas de stock es el costo de adquisición, como es de esperarse, al tener costos de adquisición elevados implica en realizar más ejecuciones de la actividad pedir, pero con tamaños de lote pequeños, y viceversa. Lo anterior se ejemplifica en la tabla siguiente:

CONCLUSIONES.			
Costo de adquisición ( $PV_{ky}$ )	Costo de los recursos ( $C_r + C_Q$ )	Q	N
[Unid. Monetaria]	[Unid. Monetaria]	[Unidades]	[Veces]
↗	↗	↘	↗
↘	↗	↗	↘

TABLA 76.- “Conclusiones de la variación de costos”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4 Experimento 4: Gran cantidad de repuestos.

No conforme con la magnitud de la problemática planteada en el experimento anterior, se decide aumentar en este experimento la magnitud del caso de estudio. Donde el objetivo principal es validar esta vez a mayor escala, el ahorro de tiempo que se logra utilizando los algoritmos genéticos, en comparación con una búsqueda exhaustiva.

Para lograr aumentar la magnitud de la problemática, se decide trabajar esta vez con ochenta y un repuestos, y aumentar el ciclo de vida de los equipos a los cuales pertenecen, definiendo así, un ciclo de vida común de veinte años.

Se definen entonces los repuestos a tratar, en las “TABLAS 77 a 79” (considérese los mismos costos de adquisición, costos de ejecutar un pedido, y las formas de acuerdo con los parámetros de confiabilidad definidos en el experimento anterior).

COMBINACIÓN DE VARIABLES 1.			
Repuesto	Costo de los recursos	Costo de adquisición	Forma
1	Alto	Alto	1
2	Alto	Alto	1
3	Alto	Alto	1
4	Alto	Alto	2
5	Alto	Alto	2
6	Alto	Alto	2
7	Alto	Alto	3
8	Alto	Alto	3
9	Alto	Alto	3
10	Alto	Medio	1
11	Alto	Medio	1
12	Alto	Medio	1
13	Alto	Medio	2
14	Alto	Medio	2
15	Alto	Medio	2
16	Alto	Medio	3
17	Alto	Medio	3
18	Alto	Medio	3
19	Alto	Bajo	1
20	Alto	Bajo	1
21	Alto	Bajo	1
22	Alto	Bajo	2
23	Alto	Bajo	2
24	Alto	Bajo	2
25	Alto	Bajo	3
26	Alto	Bajo	3
27	Alto	Bajo	3

TABLA 77.- “Definición de los repuestos y sus variables 1”.

Fuente: Elaboración propia.

COMBINACIÓN DE VARIABLES 2.			
Repuesto	Costo de los recursos	Costo de adquisición	Forma
28	Medio	Alto	1
29	Medio	Alto	1
30	Medio	Alto	1
31	Medio	Alto	2
32	Medio	Alto	2
33	Medio	Alto	2
34	Medio	Alto	3
35	Medio	Alto	3
36	Medio	Alto	3
37	Medio	Medio	1
38	Medio	Medio	1
39	Medio	Medio	1
40	Medio	Medio	2
41	Medio	Medio	2
42	Medio	Medio	2
43	Medio	Medio	3
44	Medio	Medio	3
45	Medio	Medio	3
46	Medio	Bajo	1
47	Medio	Bajo	1
48	Medio	Bajo	1
49	Medio	Bajo	2
50	Medio	Bajo	2
51	Medio	Bajo	2
52	Medio	Bajo	3
53	Medio	Bajo	3
54	Medio	Bajo	3

TABLA 78.- “Definición de los repuestos y sus variables 2”.

Fuente: Elaboración propia.

COMBINACIÓN DE VARIABLES 3.			
Repuesto	Costo de los recursos	Costo de adquisición	Forma
55	Bajo	Alto	1
56	Bajo	Alto	1
57	Bajo	Alto	1
58	Bajo	Alto	2
59	Bajo	Alto	2
60	Bajo	Alto	2
61	Bajo	Alto	3
62	Bajo	Alto	3
63	Bajo	Alto	3
64	Bajo	Medio	1
65	Bajo	Medio	1
66	Bajo	Medio	1
67	Bajo	Medio	2
68	Bajo	Medio	2
69	Bajo	Medio	2
70	Bajo	Medio	3
71	Bajo	Medio	3
72	Bajo	Medio	3
73	Bajo	Bajo	1
74	Bajo	Bajo	1
75	Bajo	Bajo	1
76	Bajo	Bajo	2
77	Bajo	Bajo	2
78	Bajo	Bajo	2
79	Bajo	Bajo	3
80	Bajo	Bajo	3
81	Bajo	Bajo	3

TABLA 79.- “Definición de los repuestos y sus variables 3”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.1 Resultados generales de Weibull.

Con la ecuación de distribución de densidad de Weibull se estiman las tasas de fallas para cada período, en este caso de estudio corresponden a tasas de fallas anuales.

Estas tasas de fallas son los primeros resultados obtenidos del modelo propuesto, y que consecuentemente pasan a ser los datos que desencadenan la ejecución del costeo basado en actividades, bajo la política de stock en revisión continua o revisión periódica, los resultados se visualizan en las tablas adjuntas en el apartado ANEXO 2: “Resultados generales de Weibull”.

A continuación, se define la fórmula que expresa la cantidad de evaluaciones que ejecuta la búsqueda exhaustiva en la política de revisión continua.

$$\text{Evaluaciones} = \sum_{k=1}^K \sum_{y=1}^{CV} \lambda_{ky}.$$

Mientras que la ecuación que define la cantidad de evaluaciones que ejecuta la búsqueda exhaustiva en la política de revisión periódica, es la siguiente:

$$\text{Evaluaciones} = \sum_{k=1}^K \sum_{y=1}^{CV} 365.$$

En la tabla siguiente se adjuntan las evaluaciones correspondientes a los experimentos con 27 y 81 repuestos, tanto para la política de revisión continua, como para revisión periódica.

TOTAL DE EJECUCIONES.		
Política	Revisión continua	Revisión periodica
Método	Exhaustiva	Exhaustiva
K=27	67554	88695
K=81	1469556	591300

TABLA 80.- “Total de ejecuciones del código”.

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias existentes entre la cantidad de evaluaciones para una misma cantidad de repuestos en una búsqueda exhaustiva, se justifica por la tasa de falla que pueden presentar los repuestos, recordar que en revisión continua la evaluación comprende desde la unidad hasta alcanzar la tasa de falla por repuesto en el período definido, mientras que se considera constante en la revisión periódica desde la unidad hasta trescientas sesenta y cinco, es decir, si bajo la política de revisión continua se obtienen tasas de fallas menores a 365 [unidades/período] se ejecutarán menos evaluaciones, y viceversa.

5.4.2 Resultados del método de búsqueda exhaustiva en revisión continua.

Aplicado el método de búsqueda exhaustiva bajo la política de la revisión continua, se obtuvo el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto, adjunto en la “*TABLA 81*”:

RESULTADO		SIGLA.	UNIDAD.
Costo de la gestión al valor presente neto.		[CGVPN]	
Año=1	\$ 2.385.887.301		[Unid. monetaria]
Año=2	\$ 1.604.577.209		[Unid. monetaria]
Año=3	\$ 1.238.682.305		[Unid. monetaria]
Año=4	\$ 1.014.719.319		[Unid. monetaria]
Año=5	\$ 850.583.189		[Unid. monetaria]
Año=6	\$ 729.343.573		[Unid. monetaria]
Año=7	\$ 634.160.999		[Unid. monetaria]
Año=8	\$ 267.258.306		[Unid. monetaria]
Año=9	\$ 247.706.500		[Unid. monetaria]
Año=10	\$ 229.586.182		[Unid. monetaria]
Año=11	\$ 212.793.253		[Unid. monetaria]
Año=12	\$ 197.230.304		[Unid. monetaria]
Año=13	\$ 182.807.121		[Unid. monetaria]
Año=14	\$ 4.518.019.296		[Unid. monetaria]
Año=15	\$ 4.801.210.408		[Unid. monetaria]
Año=16	\$ 5.058.537.852		[Unid. monetaria]
Año=17	\$ 5.287.893.362		[Unid. monetaria]
Año=18	\$ 5.492.261.722		[Unid. monetaria]
Año=19	\$ 5.670.205.538		[Unid. monetaria]
Año=20	\$ 5.821.007.111		[Unid. monetaria]

*TABLA 81.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, en la “*TABLA 82*”, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 46.444.470.851

*TABLA 82.- “Costo global de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto”.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	13784,1

TABLA 83.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.3 Resultados del método exhaustivo en revisión periódica.

Aplicando el segundo método de búsqueda desarrollado, método exhaustivo bajo la política de la revisión periódica, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.
Costo de la gestión al valor presente neto.	[CGVPN]	
Año=1	\$ 2.385.868.807	[Unid. monetaria]
Año=2	\$ 1.604.545.309	[Unid. monetaria]
Año=3	\$ 1.238.654.962	[Unid. monetaria]
Año=4	\$ 1.014.696.564	[Unid. monetaria]
Año=5	\$ 850.565.851	[Unid. monetaria]
Año=6	\$ 729.323.573	[Unid. monetaria]
Año=7	\$ 634.140.358	[Unid. monetaria]
Año=8	\$ 267.227.514	[Unid. monetaria]
Año=9	\$ 247.678.202	[Unid. monetaria]
Año=10	\$ 229.560.830	[Unid. monetaria]
Año=11	\$ 212.770.432	[Unid. monetaria]
Año=12	\$ 197.209.767	[Unid. monetaria]
Año=13	\$ 182.788.381	[Unid. monetaria]
Año=14	\$ 4.518.052.812	[Unid. monetaria]
Año=15	\$ 4.801.258.660	[Unid. monetaria]
Año=16	\$ 5.058.598.127	[Unid. monetaria]
Año=17	\$ 5.287.966.961	[Unid. monetaria]
Año=18	\$ 5.492.349.313	[Unid. monetaria]
Año=19	\$ 5.670.309.463	[Unid. monetaria]
Año=20	\$ 5.821.127.276	[Unid. monetaria]

TABLA 84.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.



Finalmente, se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 46.444.693.160

TABLA 85.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	14080,8

TABLA 86.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

*Fuente: Elaboración propia.*

La diferencia entre el costo global de la gestión en revisión continua y periódica es de 222.310 unidades monetarias, favoreciendo en este caso a la revisión continua (menor costo global de la gestión). Por otro lado, también bajo el criterio de revisión continua se obtuvo un menor tiempo de ejecución, esto se justifica por la diferencia de tamaño de las zonas factibles de búsqueda.

#### 5.4.4 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión continua.

El algoritmo genético se trabaja con los mismos operadores que se han mencionado en los apartados anteriores.

Luego, la propuesta entrega el costo de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.
Costo de la gestión al valor presente neto.	[CGVPN]	
Año=1	\$ 2.385.872.888	[Unid. monetaria]
Año=2	\$ 1.604.549.423	[Unid. monetaria]
Año=3	\$ 1.238.658.863	[Unid. monetaria]
Año=4	\$ 1.014.700.483	[Unid. monetaria]
Año=5	\$ 850.569.056	[Unid. monetaria]
Año=6	\$ 729.327.407	[Unid. monetaria]
Año=7	\$ 634.144.034	[Unid. monetaria]
Año=8	\$ 267.238.908	[Unid. monetaria]
Año=9	\$ 247.689.057	[Unid. monetaria]
Año=10	\$ 229.571.283	[Unid. monetaria]
Año=11	\$ 212.780.514	[Unid. monetaria]
Año=12	\$ 197.219.397	[Unid. monetaria]
Año=13	\$ 182.797.739	[Unid. monetaria]
Año=14	\$ 4.518.049.047	[Unid. monetaria]
Año=15	\$ 4.801.240.640	[Unid. monetaria]
Año=16	\$ 5.058.549.496	[Unid. monetaria]
Año=17	\$ 5.288.042.695	[Unid. monetaria]
Año=18	\$ 5.492.292.118	[Unid. monetaria]
Año=19	\$ 5.671.165.238	[Unid. monetaria]
Año=20	\$ 5.821.257.388	[Unid. monetaria]

TABLA 87.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]
		\$ 46.445.715.674

TABLA 88.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]
		3156,8

TABLA 89.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparables obtenido mediante algoritmo genético versus el factor obtenido mediante la búsqueda exhaustiva, existe una leve diferencia que se justifica por trabajar con valores decimales en los tamaños de lotes en el caso de los algoritmos genéticos.

#### 5.4.5 Resultados del método de algoritmos genéticos en revisión periódica.

Se definen los operadores y criterios que configuran la búsqueda de los algoritmos genéticos, que serán los mismos utilizados en el caso de la política de revisión continua.

Luego, la propuesta entrega el costo optimizado de la gestión del repuesto no reparable al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.
Costo de la gestión al valor presente neto.	[CGVPN]	
Año=1	\$ 2.375.450.476	[Unid. monetaria]
Año=2	\$ 1.595.074.204	[Unid. monetaria]
Año=3	\$ 1.230.044.744	[Unid. monetaria]
Año=4	\$ 1.006.869.198	[Unid. monetaria]
Año=5	\$ 843.449.452	[Unid. monetaria]
Año=6	\$ 722.854.800	[Unid. monetaria]
Año=7	\$ 628.259.619	[Unid. monetaria]
Año=8	\$ 261.881.220	[Unid. monetaria]
Año=9	\$ 242.817.827	[Unid. monetaria]
Año=10	\$ 225.142.323	[Unid. monetaria]
Año=11	\$ 208.753.649	[Unid. monetaria]
Año=12	\$ 193.558.105	[Unid. monetaria]
Año=13	\$ 179.468.815	[Unid. monetaria]
Año=14	\$ 4.515.035.196	[Unid. monetaria]
Año=15	\$ 4.798.515.375	[Unid. monetaria]
Año=16	\$ 5.056.104.282	[Unid. monetaria]
Año=17	\$ 5.285.699.861	[Unid. monetaria]
Año=18	\$ 5.490.288.309	[Unid. monetaria]
Año=19	\$ 5.668.435.796	[Unid. monetaria]
Año=20	\$ 5.819.423.921	[Unid. monetaria]

TABLA 90.- “Costo de la gestión del repuesto al valor presente neto”.

Fuente: Elaboración propia.

Se resumen los costos de la gestión del repuesto no reparable en el costo global de la gestión al valor presente neto.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Costo global de la gestión al valor presente neto.	[CGGVPN]	[Unid. monetaria]	\$ 46.347.127.171

TABLA 91.- “Costo globales de la gestión del repuesto”.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se concluyen los resultados obtenidos adicionando el tiempo en que demora la ejecución del método en Matlab, con el objetivo de comparar los tiempos obtenidos en los distintos métodos de búsqueda.

RESULTADO	SIGLA.	UNIDAD.	
Tiempo de ejecución en Matlab.	[T]	[Segundos]	3099,7

TABLA 92.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los costos globales de la gestión del repuesto no reparables obtenido mediante algoritmo genético versus el resultado obtenido mediante la búsqueda exhaustiva, las diferencias se justifican por trabajar con valores decimales en las cantidades de ejecuciones de pedido.

#### 5.4.6 Conclusiones.

- Se concluye entonces que la propuesta del método de búsqueda por medio de algoritmos genéticos y bajo ambas políticas de inventario, ahora para un problema de mayor magnitud, otorga resultados con una correcta metodología de solución y búsqueda, donde el costo global de la gestión resulta ser factor de discriminación.
- Se concluye la validación en un menor tiempo de ejecución del método de los algoritmos genéticos, con los operadores ya especificados se obtuvo una reducción de aproximadamente de tres horas en comparación con la búsqueda exhaustiva.

#### 5.5 Experimento 5: Cinco configuraciones de operadores genéticos.

En los experimentos anteriores se validaron los métodos de búsqueda mediante los algoritmos genéticos, tanto para la política de revisión continua como para la política de revisión periódica, y además estos implicaron una disminución considerable del tiempo de ejecución de los métodos

en comparación con la búsqueda exhaustiva. Dichos resultados siempre se obtuvieron con la utilización de la misma configuración de operadores genéticos, que de paso pueden considerarse muy conservativos. Al trabajar con una población inicial amplia, con la presencia del elitismo, de la mutación y un elevado porcentaje de cruce, además, criterios de parada poco exigentes, es decir, con la posibilidad de reproducir gran número de generaciones en un tiempo bastante extenso.

El objetivo de este experimento es poder disminuir aún más los tiempos de ejecución mediante la utilización de los algoritmos genéticos, utilizando y probando nuevas configuraciones de operadores genéticos, pero ¿Qué tan efectivos serán estas nuevas configuraciones en determinar el factor de discriminación (CGGVPN)?

Para responder esta interrogante se proponen cinco nuevas configuraciones de operadores genéticos, que sólo tendrán en común el tamaño de la población inicial y los criterios de parada, que esta vez serán mucho más exigentes, para con ello disminuir el tiempo de ejecución del código.

La técnica que se utiliza para determinar la robustez y efectividad de una configuración genética en un determinado problema consiste básicamente en “correr” (ejecutar) muchas veces el código, almacenando todos los resultados y comparando estos con resultados confiables en lo posible (como los obtenidos mediante una búsqueda exhaustiva).

Este experimento se realizó considerando los mismos 81 repuestos considerados en el experimento anterior, con los mismos, parámetros de confiabilidad y económicos.

A continuación, se presenta la “TABLA 93” que define las cinco configuraciones a evaluar.

CONFIGURACIONES DEL ALGORITMO GENÉTICO.					
OPERADORES	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4	Configuración 5
Tamaño población inicial	10	10	10	10	10
Selección	Ruleta	Ruleta	Torneo	Torneo	Elitismo (doble)
Cruce	Simple	Doble	Simple	Doble	Simple
% Cruce	80%	20%	80%	20%	80%
Mutación	Si	No	Si	No	Si
N° max. Generaciones	50	50	50	50	50
Tiempo max. Evaluación [s]	10	10	10	10	10

TABLA 93.- “Tiempo de ejecución en MATLAB”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas las cinco configuraciones a tratar, se da paso a presentar los resultados obtenidos.

### 5.5.1 Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 1.

Luego de concluir las diez ejecuciones del código, se obtuvieron los siguientes resultados:

CONFIGURACIÓN 1.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.473.271.323	1309	\$ 46.447.070.011	1288
Run 2	\$ 46.475.124.908	1284	\$ 46.447.171.252	1299
Run 3	\$ 46.474.854.814	1312	\$ 46.447.629.922	1309
Run 4	\$ 46.474.558.771	1319	\$ 46.446.746.149	1301
Run 5	\$ 46.479.640.316	1344	\$ 46.447.181.383	1278
Run 6	\$ 46.473.730.070	1318	\$ 46.447.404.471	1298
Run 7	\$ 46.474.704.958	1330	\$ 46.447.194.264	1306
Run 8	\$ 46.472.724.717	1325	\$ 46.446.836.763	1317
Run 9	\$ 46.476.369.390	1349	\$ 46.447.186.451	1332
Run 10	\$ 46.477.762.362	1312	\$ 46.447.386.920	1327
Promedio	\$ 46.475.274.163	1320	\$ 46.447.180.759	1306
Desviación estandar	\$ 2.118.257	18,6	\$ 261.212	16,6

TABLA 94.- “Resultados de la configuración 1”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar la configuración 1, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al utilizar la configuración original.

A continuación, se adjunta una tabla que resume las diferencias entre el promedio de la configuración 1 y la configuración original.

	RESUMEN.			
	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 1	\$ 46.475.274.163	1320	\$ 46.447.180.759	1306
Variación	\$ 29.558.489	-1837	\$ 100.053.588	-1794
Variación [%]	0,0636%	-58%	0,2159%	-58%

TABLA 95.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.1 Conclusiones.

- Se aprecia nuevamente y como era de esperarse, en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración 1, que la mejor política de inventario a utilizar en este caso corresponde a la política de revisión periódica.
- Se concluye que la configuración 1 cumple con las expectativas de disminuir el tiempo, de hecho, éste disminuye un 58% (aprox. 30 minutos) con relación al caso original y bajo ambas políticas de inventario.
- En general, se concluye que la configuración 1 bajo la política de revisión continua, resulta ser muy exacta, pero con poca precisión. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar considerable, lo que se traduce en imprecisión de los resultados. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,06% lo que implica exactitud.
- En general, se concluye que la configuración 1 bajo la política de revisión periódica, resulta ser muy precisa, y con buena exactitud. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar muy baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,2% lo que implica buena exactitud.

5.5.2 Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 2.

Luego de concluir las diez ejecuciones del código, se obtuvieron los siguientes resultados:

CONFIGURACIÓN 2.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.456.167.188	1359	\$ 46.444.697.739	1371
Run 2	\$ 46.458.107.414	1376	\$ 46.444.689.913	1429
Run 3	\$ 46.454.819.921	1370	\$ 46.444.683.722	1433
Run 4	\$ 46.454.619.153	1446	\$ 46.444.685.243	1402
Run 5	\$ 46.463.979.976	1390	\$ 46.444.689.047	1532
Run 6	\$ 46.462.337.232	1416	\$ 46.444.698.976	1523
Run 7	\$ 46.457.264.073	1390	\$ 46.444.683.544	1440
Run 8	\$ 46.457.848.282	1391	\$ 46.444.722.999	1430
Run 9	\$ 46.456.534.848	1398	\$ 46.444.691.758	1401
Run 10	\$ 46.459.477.197	1367	\$ 46.444.763.625	1361
Promedio	\$ 46.458.115.528	1390	\$ 46.444.700.657	1432
Desviación estandar	\$ 3.059.509	25,9	\$ 24.994	56,6

TABLA 96.- “Resultados de la configuración 2”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar la configuración 2, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al utilizar la configuración original.

A continuación, se adjunta una tabla que resume las diferencias entre el promedio de la configuración 2 y la configuración original.

RESUMEN.				
REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA		
CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo	
[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 2	\$ 46.458.115.528	1390	\$ 46.444.700.657	1432
Variación	\$ 12.399.854	-1767	\$ 97.573.486	-1668
Variación [%]	0,0267%	-56%	0,2105%	-54%

TABLA 97.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.5.2.1 Conclusiones.

- Se aprecia nuevamente y como era de esperarse, en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración 2, que la mejor política de inventario a utilizar en este caso corresponde a la política de revisión periódica.
- Se concluye que la configuración 2 cumple con las expectativas de disminuir el tiempo, de hecho, éste disminuye aproximadamente en un 55% (aprox. 28 minutos) con relación al caso original y bajo ambas políticas de inventario.
- En general, se concluye que la configuración 2 bajo la política de revisión continua, resulta ser muy exacta, pero con poca precisión. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar considerable, lo que se traduce en imprecisión de los resultados. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,02% lo que implica exactitud.
- En general, se concluye que la configuración 2 bajo la política de revisión periódica, resulta ser muy precisa, con buena exactitud. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar muy baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,2% lo que implica buena exactitud.



### 5.5.3 Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 3.

Luego de concluir las diez ejecuciones del código, se obtuvieron los siguientes resultados:

CONFIGURACIÓN 3.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.465.861.631	2028	\$ 46.444.749.301	1371
Run 2	\$ 46.466.028.291	2064	\$ 46.444.885.218	1429
Run 3	\$ 46.464.238.500	2028	\$ 46.445.144.452	1433
Run 4	\$ 46.464.758.715	2021	\$ 46.445.076.742	1402
Run 5	\$ 46.465.177.990	2067	\$ 46.445.032.998	1532
Run 6	\$ 46.465.093.286	2027	\$ 46.444.989.309	1523
Run 7	\$ 46.465.699.752	2055	\$ 46.444.746.948	1440
Run 8	\$ 46.465.050.608	2027	\$ 46.444.828.679	1430
Run 9	\$ 46.464.421.963	2038	\$ 46.445.145.684	1401
Run 10	\$ 46.466.255.087	2052	\$ 46.444.774.556	1361
Promedio	\$ 46.465.258.582	2041	\$ 46.444.937.389	1432
Desviación estandar	\$ 684.041	17,3	\$ 159.936	56,6

TABLA 98.- “Resultados de la configuración 3”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar la configuración 3, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al utilizar la configuración original.

A continuación, se adjunta una tabla que resume las diferencias entre el promedio de la configuración 3 y la configuración original.

RESUMEN.				
	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 3	\$ 46.465.258.582	2041	\$ 46.444.937.389	1432
Variación	\$ 19.542.908	-1116	\$ 97.810.218	-1668
Variación [%]	0,0421%	-35%	0,2110%	-54%

TABLA 99.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.3.1 Conclusiones.

- Se aprecia nuevamente y como era de esperarse, en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración 3, que la mejor política de inventario a utilizar en este caso corresponde a la política de revisión periódica.
- Se concluye que la configuración 3 cumple con las expectativas de disminuir el tiempo, de hecho, éste disminuye aproximadamente un 35% (aprox. 19 minutos) para la política de revisión continua, y un 54% (aprox. 28 minutos) para la política de revisión periódica.
- En general, se concluye que la configuración 3 bajo la política de revisión continua, resulta ser muy exacta, y con muy buena precisión. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,04% lo que implica exactitud.
- En general, se concluye que la configuración 3 bajo la política de revisión periódica, resulta ser muy precisa, con buena exactitud. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar muy baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,2% lo que implica buena exactitud.

5.5.4 Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 4.

Luego de concluir las diez ejecuciones del código, se obtuvieron los siguientes resultados:

CONFIGURACIÓN 4.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.453.609.005	1928	\$ 46.444.684.313	1889
Run 2	\$ 46.452.872.839	1952	\$ 46.444.683.544	1876
Run 3	\$ 46.453.970.988	1943	\$ 46.444.683.544	1899
Run 4	\$ 46.453.266.494	1940	\$ 46.444.683.658	1882
Run 5	\$ 46.453.422.006	1959	\$ 46.444.683.595	1884
Run 6	\$ 46.453.281.830	1941	\$ 46.444.684.250	1889
Run 7	\$ 46.453.724.693	1932	\$ 46.444.684.167	1881
Run 8	\$ 46.453.745.235	1934	\$ 46.444.684.110	1878
Run 9	\$ 46.453.727.154	1950	\$ 46.444.684.302	1885
Run 10	\$ 46.453.714.493	1949	\$ 46.444.683.615	1879
Promedio	\$ 46.453.533.474	1943	\$ 46.444.683.910	1884
Desviación estandar	\$ 321.848	9,8	\$ 342	6,9

TABLA 100.- “Resultados de la configuración 4”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar la configuración 4, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al utilizar la configuración original.

A continuación, se adjunta una tabla que resume las diferencias entre el promedio de la configuración 4 y la configuración original.

RESUMEN.				
REVISIÓN CONTINUA			REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 4	\$ 46.453.533.474	1943	\$ 46.444.683.910	1884
Variación	\$ 7.817.800	-1214	\$ 97.556.739	-1216
Variación [%]	0,0168%	-38%	0,2105%	-39%

TABLA 101.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.5.4.1 Conclusiones.

- Se aprecia nuevamente y como era de esperarse, en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración 4, que la mejor política de inventario a utilizar en este caso corresponde a la política de revisión periódica.
- Se concluye que la configuración 4 cumple con las expectativas de disminuir el tiempo, de hecho, éste disminuye aproximadamente un 38% (aprox. 20 minutos) para ambas políticas.
- En general, se concluye que la configuración 4 bajo la política de revisión continua, resulta ser muy exacta, y con muy buena precisión. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,016% lo que implica exactitud.
- En general, se concluye que la configuración 4 bajo la política de revisión periódica, resulta ser muy precisa, con buena exactitud. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar muy baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,2% lo que implica buena exactitud.

### 5.5.5 Resultados del método de algoritmos genéticos: Configuración 5.

Luego de concluir las diez ejecuciones del código, se obtuvieron los siguientes resultados:

CONFIGURACIÓN 5.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.472.419.539	1261	\$ 46.445.720.400	1288
Run 2	\$ 46.465.013.311	1251	\$ 46.446.502.775	1243
Run 3	\$ 46.468.079.563	1268	\$ 46.446.518.273	1250
Run 4	\$ 46.467.071.468	1268	\$ 46.446.281.548	1280
Run 5	\$ 46.466.521.307	1261	\$ 46.445.798.976	1258
Run 6	\$ 46.465.384.076	1264	\$ 46.446.326.553	1274
Run 7	\$ 46.471.673.561	1257	\$ 46.445.919.650	1274
Run 8	\$ 46.468.935.109	1256	\$ 46.446.301.257	1257
Run 9	\$ 46.469.033.868	1259	\$ 46.446.435.578	1252
Run 10	\$ 46.471.552.671	1249	\$ 46.446.521.219	1270
Promedio	\$ 46.468.568.447	1259	\$ 46.446.232.623	1264
Desviación estandar	\$ 2.649.512	6,4	\$ 306.115	14,7

TABLA 102.- “Resultados de la configuración 5”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar la configuración 5, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al utilizar la configuración original.

A continuación, se adjunta una tabla que resume las diferencias entre el promedio de la configuración 5 y la configuración original.

RESUMEN.				
	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 5	\$ 46.468.568.447	1259	\$ 46.446.232.623	1264
Variación	\$ 22.852.773	-1897	\$ 99.105.452	-1835
Variación [%]	0,0492%	-60%	0,2138%	-59%

TABLA 103.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.5.5.1 Conclusiones.

- Se aprecia nuevamente y como era de esperarse, en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración 5, que la mejor política de inventario a utilizar en este caso corresponde a la política de revisión periódica.
- Se concluye que la configuración 5 cumple con las expectativas de disminuir el tiempo, de hecho, éste disminuye aproximadamente un 60% (aprox. 32 minutos) para ambas políticas.
- En general, se concluye que la configuración 5 bajo la política de revisión continua, resulta ser exacta, y con muy buena precisión. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,05% lo que implica exactitud.
- En general, se concluye que la configuración 5 bajo la política de revisión periódica, resulta ser muy precisa, con buena exactitud. Esto se fundamenta debido a que los resultados obtenidos poseen una desviación estándar muy baja. Por otra parte, la diferencia del costo global de la gestión resulta ser 0,2% lo que implica buena exactitud.

Concluidas ya todas las evaluaciones de las configuraciones, es necesario definir ahora cuál es la mejor configuración en base a los resultados obtenidos. Para esto, se tomarán en cuenta tres factores que discriminan entre las mejores configuraciones, estos tres factores son: Exactitud de los resultados, precisión de los resultados y por último el tiempo de ejecución del código, bajo el mismo orden empírico.

Para recordar los resultados obtenidos, a continuación, se presenta una tabla de resumen:

	RESUMEN.			
	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[s]	[Unid. Monetaria]	[s]
Configuración original	\$ 46.445.715.674	3157	\$ 46.347.127.171	3100
Configuración 1	\$ 46.475.274.163	1320	\$ 46.447.180.759	1306
Variación [%]	0,0636%	58%	0,2159%	58%
Desviación estándar	\$ 2.118.257	18,6	\$ 261.212	16,6
Configuración 2	\$ 46.458.115.528	1390	\$ 46.444.700.657	1432
Variación [%]	0,0267%	56%	0,2105%	54%
Desviación estándar	\$ 3.059.509	25,9	\$ 24.994	56,6
Configuración 3	\$ 46.465.258.582	2041	\$ 46.444.937.389	1432
Variación [%]	0,0421%	35%	0,2110%	54%
Desviación estándar	\$ 684.041	17,3	\$ 159.936	56,6
Configuración 4	\$ 46.453.533.474	1943	\$ 46.444.683.910	1884
Variación [%]	0,0168%	38%	0,2105%	39%
Desviación estándar	\$ 321.848	9,8	\$ 342	6,9
Configuración 5	\$ 46.468.568.447	1259	\$ 46.446.232.623	1264
Variación [%]	0,0492%	60%	0,2138%	59%
Desviación estándar	\$ 2.649.512	6,4	\$ 306.115	14,7

TABLA 104.- “Resumen de las comparaciones”.

Fuente: Elaboración propia.

Claramente, se desprende de la tabla de resumen que la configuración que otorgó resultados más exactos fue la configuración 4, donde el porcentaje de variación no supera los 0,016% bajo la política de revisión continua y 0,21% bajo la política de revisión periódica.

Resulta ser también la configuración 4, la configuración que posee mayor precisión en sus resultados, precisión que se puede observar en el valor de las desviaciones estándar que son las mínimas en ambas políticas y en comparación con todas las configuraciones evaluadas.

Desde el punto de vista del tiempo, la configuración 4 logra disminuir el tiempo de ejecución del código en comparación a la configuración original, pero esta disminución es de solo un 38%, siendo esta la menor disminución de tiempo en comparación con las otras cuatro configuraciones.

Se concluye entonces, que la configuración 4 resulta ser la configuración más apta para esta problemática, optimizando el tiempo de búsqueda y otorgando además resultados muy precisos y exactos.

Estas conclusiones se visualizan de mejor manera, en las “FIGURAS 35 a 38”.

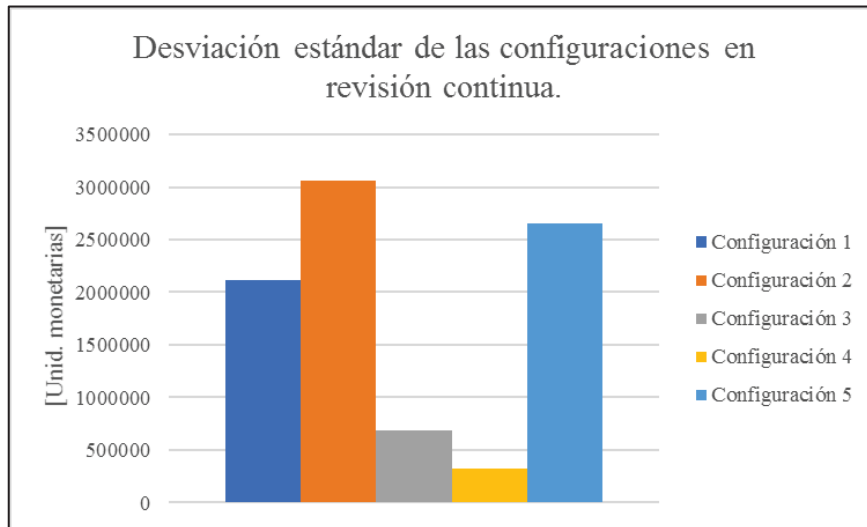


FIGURA 35.- “Desviación estándar de las configuraciones en revisión continua”.

Fuente: Elaboración propia.

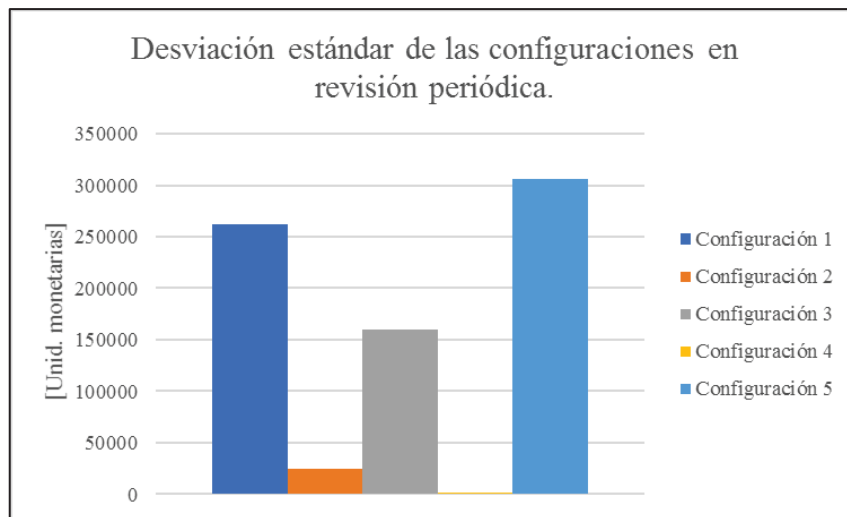


FIGURA 36.- “Desviación estándar de las configuraciones en revisión periódica”.

Fuente: Elaboración propia.

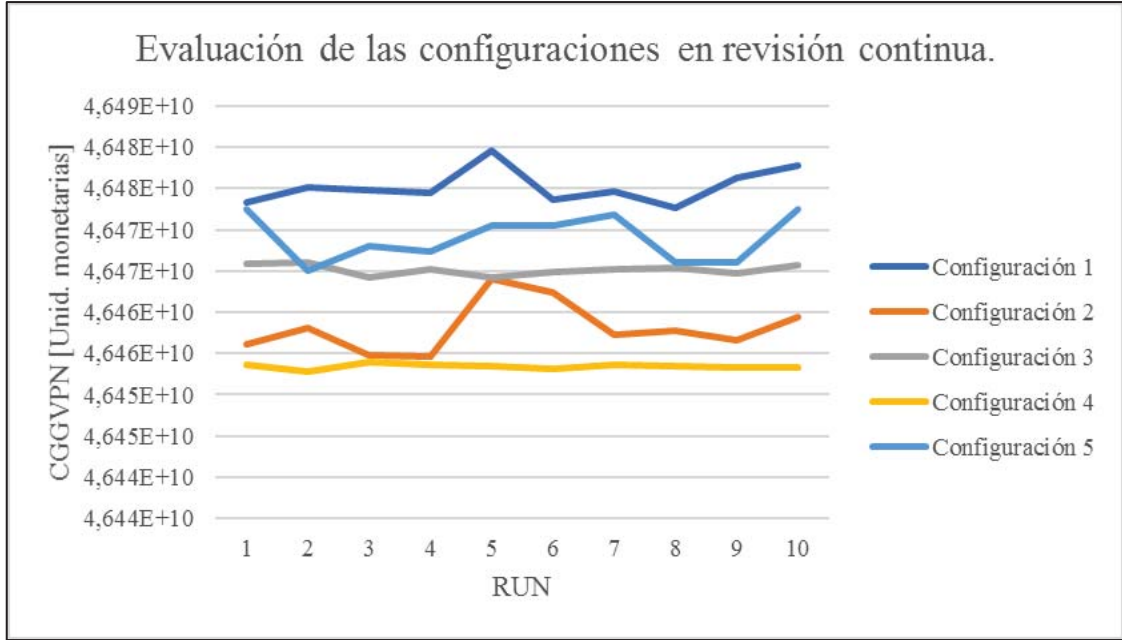


FIGURA 37.- “Evaluación de las configuraciones en revisión continua”.

Fuente: Elaboración propia.

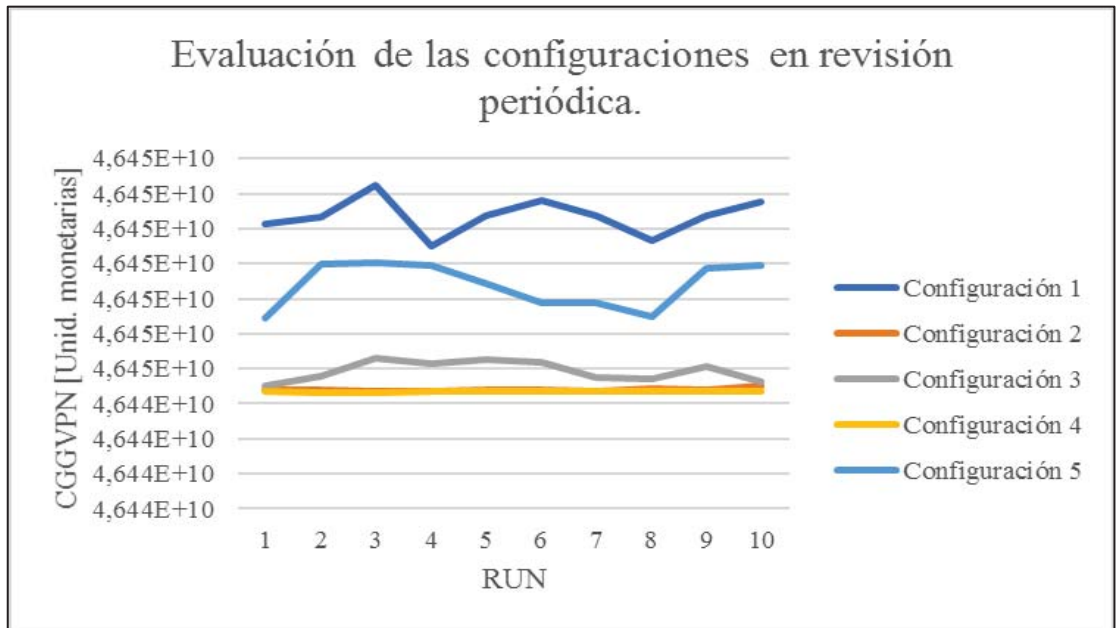


FIGURA 38.- “Evaluación de las configuraciones en revisión periódica”.

Fuente: Elaboración propia.



## 5.6 Experimento 6: Restricción del stock medio valorizado.

El objetivo de este experimento consiste en estudiar un caso que es muy común en la logística y gestión de inventarios de repuestos. Este caso consiste en el cual se restringe el stock medio valorizado en un monto máximo para los períodos abarcados. Este caso se fundamenta por la existencia de una limitante económica en las organizaciones (BUDGET). Una vez obtenidos los resultados, estos serán comparados con un caso en el cual no existe una limitante económica, es decir, sin restricción, desde donde se extraerán las conclusiones correspondientes.

Planteado el objetivo del experimento, se da paso entonces a definir las variables económicas y de confiabilidad que dan cuerpo al caso de estudio. Se considerarán los mismos 81 repuestos tratados en el “Experimento 2”, donde para conocer las variables económicas y de confiabilidad véase el apartado correspondiente al “Experimento 2”.

Luego de definir las variables correspondientes al caso, se selecciona la configuración que resulto ser más apta para este tipo de problemáticas de acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento 3, es decir, la configuración 4 (véase el apartado del “Experimento 3”).

A continuación, se plantea la restricción económica para ambas políticas de stock:

$$\frac{Q_{1i} * Pv_{1i}}{2} + \frac{Q_{2i} * Pv_{2i}}{2} + \frac{Q_{3i} * Pv_{3i}}{2} + \dots + \frac{Q_{81i} * Pv_{81i}}{2} \leq \$80.000.000 [Unid. Monetarias]$$

La interpretación de la restricción económica es la siguiente: Como se tratan ochenta y un repuestos, y cada período corresponde a un año, entonces el stock medio por año no debe superar los ochenta millones de unidades monetarias. Este valor se determinó en base a la tasa de falla de cada uno de los repuestos considerando todos los periodos abarcados en el ciclo de vida, esto para que en cada uno de los repuestos sea posible aplicar la restricción.

Con la última definición de la restricción económica, se está en condiciones entonces de ejecutar el código y obtener los resultados para su posterior análisis.

### 5.6.1 Resultados.

Se ejecuta diez veces el código y los resultados, se presentan en la “*TABLA 105*” siguiente:

CONFIGURACIÓN 4.				
Ejecuciones del código	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Run 1	\$ 46.685.466.480	887	\$ 47.547.492.140	860
Run 2	\$ 46.685.682.987	895	\$ 47.547.493.564	872
Run 3	\$ 46.685.466.480	901	\$ 47.547.492.750	885
Run 4	\$ 46.685.682.987	892	\$ 47.547.493.486	894
Run 5	\$ 46.685.608.591	889	\$ 47.547.492.325	861
Run 6	\$ 46.685.535.113	893	\$ 47.547.492.656	882
Run 7	\$ 46.685.518.784	887	\$ 47.547.493.185	881
Run 8	\$ 46.685.516.005	894	\$ 47.547.492.261	889
Run 9	\$ 46.685.567.188	887	\$ 47.547.492.302	880
Run 10	\$ 46.685.620.132	895	\$ 47.547.493.285	879
Promedio	\$ 46.685.566.475	892	\$ 47.547.492.795	878
Desviación estandar	\$ 80.005	4,6	\$ 544	11,1

TABLA 105.- “CGGVPN con restricción económica”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez visualizados los resultados que se obtuvieron al evaluar el caso con restricción económica, resulta ser muy relevante poder comparar dichos resultados con los que se obtuvieron al analizar el caso sin restricción económica.

A continuación, se adjunta la “TABLA 106” que resume las diferencias entre el promedio del caso con restricción y el caso sin restricción.

	RESUMEN.			
	REVISIÓN CONTINUA		REVISIÓN PERIÓDICA	
	CGGVPN	Tiempo	CGGVPN	Tiempo
	[Unid. Monetaria]	[Segundos]	[Unid. Monetaria]	[Segundos]
Caso sin restricción	\$ 46.453.533.474	1943	\$ 46.444.683.910	1884
Caso con restricción	\$ 46.685.566.475	892	\$ 47.547.492.795	878
Variación	\$ 232.033.001	-1051	\$ 1.102.808.885	-1006
Variación [%]	0,4995%	-54%	2,3745%	-53%

TABLA 106.- “Resumen de los casos”.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.6.2 Conclusiones.

- La primera conclusión de acuerdo con los resultados obtenidos del caso con restricción económica es que se obtiene un menor costo global de la gestión de los repuestos críticos al trabajar bajo la política de revisión continua, conclusión diferente a la que se obtuvo al evaluar el caso sin restricción.
- Como era de esperarse se obtuvieron resultados muy precisos, cuyas desviaciones estándar son casi imperceptibles en comparación con la magnitud de los costos tratados.
- El tiempo que tardó la ejecución del código para el caso con restricción disminuyó notablemente en un 50% aproximado. Esta disminución del tiempo se fundamenta debido a que, al adicionar una restricción de la valorización anual del stock medio, esto implica una disminución de la zona factible de soluciones, por lo tanto, se acota la zona de búsqueda del algoritmo.
- Se concluye que al adicionar una restricción como la anteriormente descrita, se produce una variación considerable del costo global de la gestión de los repuestos críticos, produciéndose un alza de este factor, en ambas políticas de stock. Alcanzando en la política de revisión continua un incremento de doscientos millones de unidades monetarias, y en la política de revisión periódica un incremento de mil cien millones de unidades monetarias. Se recalca la importancia de estos valores, que se deben tener en cuenta cuando se tratan pronósticos económicos a largo plazo, y que ayudan a discernir ciertas políticas de inventarios.

## **6. CONCLUSIONES.**

Se concluye como exitosa la modelación y la optimización del proceso de gestión de repuestos críticos no reparables, esto con la utilización del método de costeo basado en actividades y con aplicación de los algoritmos genéticos. Esto permite además poder discriminar entre la política de stock más adecuada a utilizar.

Se desprende del trabajo realizado, que la utilización de la metaheurística de los algoritmos genéticos presenta sus pro y contras, dentro de sus puntos favorables se pueden mencionar:

- Otorgan una solución en procesos de búsqueda que son prácticamente imposibles de determinar por medio de la utilización de herramientas de búsqueda comunes.
- Otorgan soluciones en tiempos breves en comparación, por ejemplo, con una búsqueda exhaustiva.
- Unas correctas utilizaciones de los operadores genéticos implican tener resultados muy precisos y exactos.
- Es completamente amplia la gama en donde se pueden aplicar la búsqueda mediante la metaheurística de los algoritmos genéticos, permitiendo realizar optimizaciones ya sea, maximizando o minimizando resultados.

Dentro de los defectos que presentan los algoritmos genéticos, se pueden mencionar:

- Si no existen resultados concretos con los cuales comparar la búsqueda que se obtiene desde los algoritmos genéticos, se genera una incertidumbre en cuanto a la calidad de las soluciones.
- No todas las configuraciones de los operadores genéticos proporcionan buenos resultados.
- Determinar una buena configuración de operadores genéticos, implica realizar muchas pruebas y un gran desgaste de tiempo.
- La utilización y programación de los algoritmos genéticos queda totalmente destinada a personas con conocimientos sobre el tema.

Como se pudo apreciar, resulta ser fundamental el hecho de indagar en técnicas avanzadas y poder aplicar estas a procesos reales, como fue el caso del trabajo realizado, seleccionar una política adecuada de stock cuando se trabaja con repuestos críticos no reparables, no es un tema tan simple de determinar, resulta ser fundamental otorgar la importancia necesaria a cada proceso.

Finalmente, se concluye este trabajo recalcando la importancia de evaluar procedimientos de costeos a largo plazo, en donde una simple restricción en el modelo de trabajo puede generar diferencias económicas considerables, ayudando estas conclusiones a una mejor toma de decisiones.

## **7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.**

- P. S. Afonso y O. M. Durán. “Sistema de costeo de ciclo de vida basado en actividades para logística de piezas de repuestos”, Aceptado para el XIII Congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Portugal, 2017.
- J. M. Tamborero del Pino, “Fiabilidad: La distribución de Weibull”, Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, Ministerio de empleo y seguridad social, España, 1994.
- R.A. Adame, “Costeo basado en actividades. Conceptos teóricos y metodológicos de implementación”, Facultad de Contaduría pública y Administración, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 2000.
- R. Salazar, A. Rojano, E. Figueroa y F. Pérez, “Aplicaciones de la distribución de Weibull en ingeniería de confiabilidad”, Memoria del XXI Coloquio mexicano de economía matemática y econometría, México, 2006.
- E. E. Montoya y B.C. Rossel, “Aplicación del sistema de costeo basado en actividades”, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile, Chile, 2006.
- G.G. Monsalve, “Introducción a la teoría de la confiabilidad y su aplicación en el diseño y mantenimiento de equipos industriales de un proceso de renovación”, Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2006.
- M. Gestal, D. Rivero, J. Rabuñal, J. Dorado y A. Pazos, “Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética”, Universidad de Coruña, 2009.
- A. García, “Técnicas metaheurísticas”, URL: <http://www.iol.etsii.upm.es/arch/metaheurísticas.pdf>.
- J. Vidal, “Propuesta de un modelo de costeo de ciclo de vida como apoyo a la gestión de repuestos no reparables”, Facultad de ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017.

## ANEXOS.

### Anexo 1: Terminología.

- $ABC$  Costeo basado en actividades.
- $CA_k$  Costo de almacenamiento del repuesto  $k$ .
- $CCV$  Costeo de ciclo de vida.
- $CD_k$  Costo directo del repuesto  $k$ .
- $CGG_k$  Costo global de la gestión del repuesto  $k$ .
- $CL_k$  Costo logístico del repuesto  $k$ .
- $CTA$  Costo total de las actividades.
- $CTR$  Costo total de los recursos.
- $D$  Demanda.
- $E_{ik}$  Ejecuciones de la actividad  $i$  para el repuesto  $k$ .
- $F(t)$  Función acumulativa de distribución de Weibull.
- $Pv_k$  Precio de venta del repuesto  $k$ .
- $Q$  Tamaño de lote por pedido.
- $Q_k$  Tamaño de lote por pedido del repuesto  $k$ .
- $R$  Punto de reorden.
- $R(t)$  Función de confiabilidad de Weibull.
- $a_i$  Costo de la actividad  $i$ .
- $a_{ki}$  Proporción de la actividad  $i$  destinada al repuesto  $k$ .
- $cr_j$  Monto total de costo del recurso  $j$ .
- $cv$  Ciclo de vida.
- $f(t)$  Función de densidad de Weibull.
- $h_{ik}$  Tamaño de lote de unidades  $k$  por cada ejecución de  $i$ .
- $i$  Índice de actividad.
- $j$  Índice de recurso.
- $k$  Índice de repuesto.
- $CL_k$  Costo logístico imputado al repuesto  $k$ .
- $r_{ij}$  Proporción que la actividad  $i$  consume del recurso  $j$ .

- $r_j$  Monto total del recurso j.
- $t$  Tiempo.
- $t_{de}$  Tiempo de entrega.
- $t_p$  Tiempo entre pedidos.
- $ti$  Tasa de interés exigido.
- $y$  Período del ciclo de vida.
- $\alpha$  Parámetro de vida característica de Weibull.
- $\beta$  Parámetro de forma de Weibull.
- $\gamma$  Parámetro inicial de localización de Weibull.
- $\lambda$  Tasa de falla.
- $\lambda_{ky}$  Tasa de falla del repuesto k en el período y.

### Anexo 2: Resultado generales de Weibull.

Con la ecuación de distribución de densidad de Weibull se estiman las tasas de fallas para cada período, en este caso de estudio corresponden a tasas de fallas anuales.

Estas tasas de fallas son los primeros resultados obtenidos del modelo propuesto, y que consecuentemente pasan a ser los datos que desencadenan la ejecución del costeo basado en actividades, bajo la política de stock en revisión continua o revisión periódica, los resultados se visualizan en las tablas adjuntas a continuación.



RESULTADO	SIGLA		UNIDAD																		
	Año=1	Año=2	[Unid./año]																		
Tasa de fallas anuales 1.	[Lambda]	[Lambda]	[Unid./año]																		
CV/k	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	Año=10	Año=11	Año=12	Año=13	Año=14	Año=15	Año=16	Año=17	Año=18	Año=19	Año=20	
k=1	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=2	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=3	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=4	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=5	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=6	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=7	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=8	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=9	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=10	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=11	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=12	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=13	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=14	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=15	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=16	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=17	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=18	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=19	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=20	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=21	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=22	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=23	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=24	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=25	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=26	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=27	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784

TABLA 107.- “Tasas de fallas anuales 1”.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADO	SIGLA		UNIDAD.																		
	[Lambda]																				
Tasa de fallas anuales 2.	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	Año=10	Año=11	Año=12	Año=13	Año=14	Año=15	Año=16	Año=17	Año=18	Año=19	Año=20	
k=28	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	
k=29	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=30	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=31	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=32	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=33	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=34	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=35	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=36	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=37	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=38	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=39	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=40	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=41	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=42	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=43	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=44	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=45	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=46	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=47	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=48	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=49	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=50	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=51	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=52	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=53	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=54	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784

TABLA 108.- “Tasas de fallas anuales 2”.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADO	SIGLA.		UNIDAD.																		
	[Lambda]	Año=3	Año=4	[Unid./año]																	
Tasa de fallas anuales 3.	Año=1	Año=2	Año=3	Año=4	Año=5	Año=6	Año=7	Año=8	Año=9	Año=10	Año=11	Año=12	Año=13	Año=14	Año=15	Año=16	Año=17	Año=18	Año=19	Año=20	
CV/k	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=55	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=56	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=57	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=58	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=59	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=60	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=61	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=62	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=63	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=64	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=65	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=66	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=67	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=68	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=69	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=70	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=71	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=72	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=73	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=74	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=75	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
k=76	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=77	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=78	438	309	252	219	195	178	165	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=79	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=80	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784
k=81	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	2344	2691	3062	3456	3875	4318	4784	4784

TABLA 109.- “Tasas de fallas anuales 3”.

Fuente: Elaboración propia.

### Anexo 3: Código de búsqueda exhaustiva, política de revisión continua.

```
clc, close all, clear all;
%% *FUNCIÓN DE WEIBULL* .
% Definición de las variables de entrada para la función de Weibull.
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
% Parámetro de forma para los k repuestos [Beta].
Beta=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B53:U79');
% Parámetro de vida característica para los k repuestos [Alpha].
Alpha=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B85:U111');
% Parámetro inicial de localización de los k repuestos [Gamma].
Gamma=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B117:U143');
% Operaciones logísticas para las tres fases de los k repuestos.
for k=[1:k]
    % Servicio anual de los repuestos [W].
    W=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F17:AF17');
    % Ciclo de vida de los repuestos [CV].
    CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
    for i=[1:CV(k)]
        % Función de densidad.
        f(k,i)=(((i-Gamma(k,i))^(Beta(k,i)-1))*(Beta(k,i)/(Alpha(k,i)^Beta(k,i))))*exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i))));
        % Función de confiabilidad.
        R(k,i)=exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));
        % Función acumulativa de distribución.
        F(k,i)=1-R(k,i);
        % Tasa de falla.
        Lambda(k,i)=((f(k,i)/R(k,i))*W(k));
        Lambda(k,i)=floor(Lambda(k,i));
    end
end
%% *ANÁLISIS METODO ABC* .
% Cálculo de los costos directos [CDk].
% Costo de adquisición de cada repuesto [PV].
PV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F16:AF16');
```

```
% Inflación.
I=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F10');
I=I/100;
for k=[1:k]
    Pv(k,1)=PV(k)
    CDk(k,1)=Lambda(k,1)*Pv(k,1);
    CDT(1)=sum(CDk(:,1));
    for i=[2:CV(k)]
        Pv(k,i)=Pv(k,(i-1))+Pv(k,(i-1))*I;
        CDk(k,i)=Lambda(k,i)*Pv(k,i);
        CDT(i)=sum(CDk(:,i));
    end
end
% Cálculo de ejecuciones de actividad por tamaño de lote para cada
repuesto [E] y total [ET].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
% Tamaño de lote por actividad [h].
h=xlsread('variables y resultados 2','Variables','A29:K29');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            E(k,i,j)=Lambda(k,i)/h(j)
            ET(i,j)=sum(E(:,i,j));
        end
    end
end
% Cálculo del consumo porcentual de cada repuesto por actividad [a].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            a(k,i,j)=E(k,i,j)/ET(i,j);
        end
    end
end
```

```
end
% Cálculo de costos de los recursos consumidos por cada actividad [A] y
  el costo logístico [CL].
% Vector costo de los recursos anuales [Cr].
Cr=xlsread('variables y resultados 2','Variables','A23:H23');
% Matriz consumo de recurso por actividad [rij].
rij=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B35:I45');
for j=[1:11]
    for y=[1:length(Cr)]
        A(j,y)= rij(j,y)*Cr(y);
    end
    CL(j)=sum(A(j,:));
end
% Cálculo de los costos logísticos para cada repuesto [CLk],de
  almacenamiento por repuesto [CAk],total dependiente [CTD] y cantidad de
  repuestos óptimos [Q_min].
% Tasa de interes [Ti].
Ti=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F8');
Ti=Ti/100;
% Costo de ejecutar un pedido [CQ].
CQ=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F11');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for Q=[1:Lambda(k,i)]
            for j=[1:11]
                CLP(k,i,j)=CL(j)*a(k,i,j);
                CLp(k,i)=sum(CLP(k,i,:));
            end
            CLk(k,i,Q)=CLp(k,i)+(Lambda(k,i)/Q)*CQ;
            CAk(k,i,Q)=(Q/2)*Pv(k,i)*Ti;
            CTD(k,i,Q)=CLk(k,i,Q)+CAk(k,i,Q);
        end
        CTD(CTD==0)=NaN;
        CTD_min(k,i)=min(CTD(k,i,:));
        [f(k),Q_min(k,i)]=find(CTD(k,i,:)==CTD_min(k,i));
        Nq(k,i)=Lambda(k,i)/Q_min(k,i);
        Tdp(k,i)=1/Nq(k,i);
    end
end
```

```
% Cálculo del costo de la gestión [CG] y de la gestión global [CGG].
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        CTD_MIN(i)=sum(CTD_min(:,i));
        CG(i)=CTD_MIN(i)+CDT(i);
        CGG=sum(CG);
    end
end
% Cálculo costo de la gestión al valor presente neto [CGVPN] y de la
% gestión global al valor presente neto [CGGVPN].
% Tasa de descuento [Td].
Td=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F9');
Td=Td/100;
t=length(CG);
for t=[1:t]
    CGVPN(t)=(CG(t)/((1+Td)^t));
    CGGVPN=sum(CGVPN);
end
%% *FIN.*
```

### Anexo 3: Código de búsqueda exhaustiva, política de revisión periódica.

```
clc, close all, clear all;
%% *FUNCIÓN DE WEIBULL* .
% Definición de las variables de entrada para la función de Weibull.
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
% Parámetro de forma para los k repuestos [Beta].
Beta=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B53:U79');
% Parámetro de vida característica para los k repuestos [Alpha].
Alpha=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B85:U111');
% Parámetro inicial de localización de los k repuestos [Gamma].
Gamma=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B117:U143');
% Operaciones logísticas para las tres fases de los k repuestos.
for k=[1:k]
    % Servicio anual de los repuestos [W].
```

```
W=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F17:AF17');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
for i=[1:CV(k)]
    % Función de densidad.
    f(k,i)=(((i-Gamma(k,i))^(Beta(k,i)-
    1))*(Beta(k,i)/(Alpha(k,i)^Beta(k,i))))*exp(-(((i-
    Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));
    % Función de confiabilidad.
    R(k,i)=exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));
    % Función acumulativa de distribución.
    F(k,i)=1-R(k,i);
    % Tasa de falla.
    Lambda(k,i)=((f(k,i)/R(k,i))*W(k));
    Lambda(k,i)=floor(Lambda(k,i));
end
end
%% *ANÁLISIS METODO ABC* .
% Cálculo de los costos directos [CDk].
% Costo de adquisición de cada repuesto [PV].
PV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F16:AF16');
% Inflación.
I=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F10');
I=I/100;
for k=[1:k]
    Pv(k,1)=PV(k)
    CDk(k,1)=Lambda(k,1)*Pv(k,1);
    CDT(1)=sum(CDk(:,1));
    for i=[2:CV(k)]
        Pv(k,i)=Pv(k,(i-1))+Pv(k,(i-1))*I;
        CDk(k,i)=Lambda(k,i)*Pv(k,i);
        CDT(i)=sum(CDk(:,i));
    end
end
end
% Cálculo de ejecuciones de actividad por tamaño de lote para cada
    repuesto [E] y total [ET].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
```



```
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F15:AF15');
% Tamaño de lote por actividad [h].
h=xlsread('variables y resultados 2','Variables','A29:K29');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            E(k,i,j)=Lambda(k,i)/h(j)
            ET(i,j)=sum(E(:,i,j));
        end
    end
end
% Cálculo del consumo porcentual de cada repuesto por actividad [a].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F7');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            a(k,i,j)=E(k,i,j)/ET(i,j);
        end
    end
end
% Cálculo de costos de los recursos consumidos por cada actividad [A] y
    el costo logístico [CL].
% Vector costo de los recursos anuales [Cr].
Cr=xlsread('variables y resultados 2','Variables','A23:H23');
% Matriz consumo de recurso por actividad [rij].
rij=xlsread('variables y resultados 2','Variables','B35:I45');
for j=[1:11]
    for y=[1:length(Cr)]
        A(j,y)= rij(j,y)*Cr(y);
    end
    CL(j)=sum(A(j,:));
end
% Cálculo de los costos logísticos para cada repuesto [CLk],de
    almacenamiento por repuesto [CAk],total dependiente [CTD] y cantidad de
    repuestos óptimos [Q_min].
% Tasa de interes [Ti].
```

```
Ti=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F8');
Ti=Ti/100;
% Costo de ejecutar un pedido [CQ].
CQ=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F11');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for N=[1:365]
            for j=[1:11]
                CLP(k,i,j)=CL(j)*a(k,i,j);
                CLp(k,i)=sum(CLP(k,i,:));
            end
            CLk(k,i,N)=CLp(k,i)+N*CQ;
            CAk(k,i,N)=((Lambda(k,i)/N)/2)*Pv(k,i)*Ti;
            CTD(k,i,N)=CLk(k,i,N)+CAk(k,i,N);
            CTD(CTD==0)=NaN;
            CTD_min(k,i)=min(CTD(k,i,:));
        end
        [f(k),N_min(k,i)]=find(CTD(k,i,:)==CTD_min(k,i));
        Tdp(k,i)=1/N_min(k,i);
        Qn(k,i)=Lambda(k,i)/N_min(k,i);
    end
end
% Cálculo del costo de la gestión [CG] y de la gestión global [CGG].
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        CTD_MIN(i)=sum(CTD_min(:,i));
        CG(i)=CTD_MIN(i)+CDT(i);
        CGG=sum(CG);
    end
end
% Cálculo costo de la gestión al valor presente neto [CGVPN] y de la
gestión global al valor presente neto [CGGVPN].
% Tasa de descuento [Td].
Td=xlsread('variables y resultados 2','Variables','F9');
Td=Td/100;
t=length(CG);
for t=[1:t]
    CGVPN(t)=(CG(t)/((1+Td)^t));
```

```
CGGVPN=sum(CGVPN);  
end  
%% *FIN.*
```

#### Anexo 4: Código de los algoritmos genéticos, política de revisión continua.

```
clc, close all, clear all;  
%% *FUNCIÓN DE WEIBULL* .  
% Definición de las variables de entrada para la función de Weibull.  
% Número de repuestos [k].  
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');  
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].  
CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');  
% Parámetro de forma para los k repuestos [Beta].  
Beta=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B53:U79');  
% Parámetro de vida característica para los k repuestos [Alpha].  
Alpha=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B85:U111');  
% Parámetro inicial de localización de los k repuestos [Gamma].  
Gamma=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B117:U143');  
% Operaciones logísticas para las tres fases de los k repuestos.  
for k=[1:k]  
    % Servicio anual de los repuestos [W].  
    W=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F17:AF17');  
    % Ciclo de vida de los repuestos [CV].  
    CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');  
    for i=[1:CV(k)]  
        % Función de densidad.  
        f(k,i)=(((i-Gamma(k,i))^(Beta(k,i)-1))*(Beta(k,i)/(Alpha(k,i)^Beta(k,i))))*exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i))));  
        % Función de confiabilidad.  
        R(k,i)=exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));  
        % Función acumulativa de distribución.  
        F(k,i)=1-R(k,i);  
        % Tasa de falla.  
        Lambda(k,i)=((f(k,i)/R(k,i))*W(k));  
        Lambda(k,i)=floor(Lambda(k,i));  
    end  
end  
%% *ANÁLISIS METODO ABC* .
```

```
% Cálculo de los costos directos [CDk].
% Costo de adquisición de cada repuesto [PV].
PV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F16:AF16');
% Inflación.
I=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F10');
I=I/100;
for k=[1:k]
    Pv(k,1)=PV(k)
    CDk(k,1)=Lambda(k,1)*Pv(k,1);
    CDT(1)=sum(CDk(:,1));
    for i=[2:CV(k)]
        Pv(k,i)=Pv(k,(i-1))+Pv(k,(i-1))*I;
        CDk(k,i)=Lambda(k,i)*Pv(k,i);
        CDT(i)=sum(CDk(:,i));
    end
end
% Cálculo de ejecuciones de actividad por tamaño de lote para cada repuesto
[E] y total [ET].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');
% Tamaño de lote por actividad [h].
h=xlsread('variables y resultados 3','Variables','A29:K29');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            E(k,i,j)=Lambda(k,i)/h(j)
            ET(i,j)=sum(E(:,i,j));
        end
    end
end
% Cálculo del consumo porcentual de cada repuesto por actividad [a].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
```

```
        a(k,i,j)=E(k,i,j)/ET(i,j);
    end
end
end
% Cálculo de costos de los recursos consumidos por cada actividad [A] y el
costo logístico [CL].
% Vector costo de los recursos anuales [Cr].
Cr=xlsread('variables y resultados 3','Variables','A23:H23');
% Matriz consumo de recurso por actividad [rij].
rij=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B35:I45');
for j=[1:11]
    for y=[1:length(Cr)]
        A(j,y)= rij(j,y)*Cr(y);
    end
    CL(j)=sum(A(j,:));
end
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            CLP(k,i,j)=CL(j)*a(k,i,j);
            CLp(k,i)=sum(CLP(k,i,:));
        end
    end
end
end
% Cálculo de los costos logísticos para cada repuesto [CLk],de
almacenamiento por repuesto [CAk],total dependiente [CTD] y cantidad de
repuestos óptimos [Q_min].
% Tasa de interes [Ti].
Ti=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F8');
Ti=Ti/100;
% Costo de ejecutar un pedido [CQ].
CQ=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F11');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
% *****
        %Codificación del AG.
% *****
        numberOfVariables=1
    end
end
end
```

```
LB=[1]
UB=[Lambda(k,i)]
FitnessFunction = @(x)
FUNCION_FITNESS_FINAL_RC(x,CLp(k,i),Lambda(k,i),Pv(k,i),Ti,CQ);
ConstraintFunction = @simple_constraint;
options = gaoptimset;
% *****
% Población Genética
% *****
options = gaoptimset(options,'PopulationSize',10);
options = gaoptimset(options,'CreationFcn',@gacreationuniform);
% *****
% Criterios de parada
% *****
options = gaoptimset(options,'Generations', 50);
options = gaoptimset(options,'StallTimeLimit', 3);
% *****
% Operadores Genéticos
% *****
%Elitismo
options = gaoptimset(options,'EliteCount', 2);
% Ajuste del operador de selección
options =
gaoptimset(options,'SelectionFcn',@selectiontournament);
% Ajuste del algoritmo de cruce:
options =
gaoptimset(options,'CrossoverFcn',@crossoversinglepoint);
options = gaoptimset(options,'CrossoverFraction', 0.8);
% Ajuste del algoritmo de mutación:
options =
gaoptimset(options,'MutationFcn',@mutationadaptfeasible);
% *****
% Configuración de Salida
% *****
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', ...
[@gaplotbestindiv, @gaplotbestf]);
% *****
% Ejecución algoritmo
```

```
% *****
[x, fval, reason, output, population, scores]= ...
ga(FitnessFunction,numberOfVariables,[],[],[],[],LB,UB, ...
ConstraintFunction,options);
Q_min(k,i)=x;
CTD_min(k,i)=fval;
end
end
% Cálculo del costo de la gestión [CG] y de la gestión global [CGG].
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        CTD_MIN(i)=sum(CTD_min(:,i));
        CG(i)=CTD_MIN(i)+CDT(i);
        CGG=sum(CG);
    end
end
% Cálculo costo de la gestión al valor presente neto [CGVPN] y de la
gestión global al valor presente neto [CGGVPN].
% Tasa de descuento [Td].
Td=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F9');
Td=Td/100;
t=length(CG);
for t=[1:t]
    CGVPN(t)=(CG(t)/((1+Td)^t));
    CGGVPN=sum(CGVPN);
end
%% *FIN.*
```

### Anexo 5: Código de los algoritmos genéticos, política de revisión periódica.

```
clc, close all, clear all;
%% *FUNCIÓN DE WEIBULL* .
% Definición de las variables de entrada para la función de Weibull.
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');
% Parámetro de forma para los k repuestos [Beta].
```

```
Beta=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B53:U79');
% Parámetro de vida característica para los k repuestos [Alpha].
Alpha=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B85:U111');
% Parámetro inicial de localización de los k repuestos [Gamma].
Gamma=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B117:U143');
% Operaciones logísticas para las tres fases de los k repuestos.
for k=[1:k]
    % Servicio anual de los repuestos [W].
    W=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F17:AF17');
    % Ciclo de vida de los repuestos [CV].
    CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');
    for i=[1:CV(k)]
        % Función de densidad.
        f(k,i)=(((i-Gamma(k,i))^(Beta(k,i)-
        1))*(Beta(k,i)/(Alpha(k,i)^Beta(k,i))))*exp(-(((i-
        Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));
        % Función de confiabilidad.
        R(k,i)=exp(-(((i-Gamma(k,i))/Alpha(k,i))^Beta(k,i)));
        % Función acumulativa de distribución.
        F(k,i)=1-R(k,i);
        % Tasa de falla.
        Lambda(k,i)=((f(k,i)/R(k,i))*W(k));
        Lambda(k,i)=floor(Lambda(k,i));
    end
end
%% *ANÁLISIS METODO ABC* .
% Cálculo de los costos directos [CDk].
% Costo de adquisición de cada repuesto [PV].
PV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F16:AF16');
% Inflación.
I=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F10');
I=I/100;
for k=[1:k]
    Pv(k,1)=PV(k)
    CDk(k,1)=Lambda(k,1)*Pv(k,1);
    CDT(1)=sum(CDk(:,1));
    for i=[2:CV(k)]
        Pv(k,i)=Pv(k,(i-1))+Pv(k,(i-1))*I;
```



```
CDk(k,i)=Lambda(k,i)*Pv(k,i);
CDT(i)=sum(CDk(:,i));
end
end
% Cálculo de ejecuciones de actividad por tamaño de lote para cada
repuesto [E] y total [ET].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');
% Ciclo de vida de los repuestos [CV].
CV=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F15:AF15');
% Tamaño de lote por actividad [h].
h=xlsread('variables y resultados 3','Variables','A29:K29');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            E(k,i,j)=Lambda(k,i)/h(j)
            ET(i,j)=sum(E(:,i,j));
        end
    end
end
end
% Cálculo del consumo porcentual de cada repuesto por actividad [a].
% Número de repuestos [k].
k=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F7');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            a(k,i,j)=E(k,i,j)/ET(i,j);
        end
    end
end
end
% Cálculo de costos de los recursos consumidos por cada actividad [A] y
el costo logístico [CL].
% Vector costo de los recursos anuales [Cr].
Cr=xlsread('variables y resultados 3','Variables','A23:H23');
% Matriz consumo de recurso por actividad [rij].
rij=xlsread('variables y resultados 3','Variables','B35:I45');
for j=[1:11]
    for y=[1:length(Cr)]
```

```
A(j,y)= rij(j,y)*Cr(y);
end
CL(j)=sum(A(j,:));
end
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        for j=[1:11]
            CLP(k,i,j)=CL(j)*a(k,i,j);
            CLp(k,i)=sum(CLP(k,i,:));
        end
    end
end
end
% Cálculo de los costos logísticos para cada repuesto [CLk],de
% almacenamiento por repuesto [CAk],total dependiente [CTD] y cantidad de
% repuestos óptimos [Q_min].
% Tasa de interes [Ti].
Ti=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F8');
Ti=Ti/100;
% Costo de ejecutar un pedido [CQ].
CQ=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F11');
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        % *****
        %Codificación del AG.
        % *****
        numberOfVariables=1
        LB=[1]
        UB=[365]
        FitnessFunction = @(x)
        FUNCION_FITNESS_FINAL_RP(x,CLp(k,i),Lambda(k,i),Pv(k,i),Ti,CQ);
        ConstraintFunction = @simple_constraint;
        options = gaoptimset;
        % *****
        % Población Genética
        % *****
        options = gaoptimset(options,'PopulationSize', 10);
        options = gaoptimset(options,'CreationFcn',@gacreationuniform);
        % *****
```

```
% Criterios de parada
% *****
options = gaoptimset(options,'Generations', 50);
options = gaoptimset(options,'StallTimeLimit', 3);
% *****
% Operadores Genéticos
% *****
% Elitismo
options = gaoptimset(options,'EliteCount', 2);
% Ajuste del operador de selección
options =
gaoptimset(options,'SelectionFcn',@selectiontournament);
% Ajuste del algoritmo de cruce:
options =
gaoptimset(options,'CrossoverFcn',@crossoversinglepoint);
options = gaoptimset(options,'CrossoverFraction', 0.8);
% Ajuste del algoritmo de mutación:
options =
gaoptimset(options,'MutationFcn',@mutationadaptfeasible);
% *****
% Configuración de Salida
% *****
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', ...
    [@gaplotbestindiv, @gaplotbestf]);
% *****
% Ejecución algoritmo
% *****
[x, fval, reason, output, population, scores]= ...
ga(FitnessFunction,numberOfVariables,[],[],[],[],LB,UB, ...
ConstraintFunction,options);
N_min(k,i)=x;
CTD_min(k,i)=fval;
end
end
% Cálculo del costo de la gestión [CG] y de la gestión global [CGG].
for k=[1:k]
    for i=[1:CV(k)]
        CTD_MIN(i)=sum(CTD_min(:,i));
```

```
CG(i)=CTD_MIN(i)+CDT(i);
CGG=sum(CG);
end
end
% Cálculo costo de la gestión al valor presente neto [CGVPN] y de la
gestión global al valor presente neto [CGGVPN].
% Tasa de descuento [Td].
Td=xlsread('variables y resultados 3','Variables','F9');
Td=Td/100;
t=length(CG);
for t=[1:t]
    CGVPN(t)=(CG(t)/((1+Td)^t));
    CGGVPN=sum(CGVPN);
end
%% *FIN.*
```

### Anexo 6: Código de la función de fitness, revisión continua.

```
%Codificación de la función fitness.
function CTD=FUNCION_FITNESS_FINAL_RC(x,CLp,Lambda,Pv,Ti,CQ)
CTD= (CLp) + ((Lambda/x)*CQ) + ((x/2)*Pv*Ti);
```

### Anexo 7: Código de la función de fitness, revisión periódica.

```
%Codificación de la función fitness.
function CTD=FUNCION_FITNESS_FINAL_RP(x,CLp,Lambda,Pv,Ti,CQ)
CTD= (CLp) + x*CQ + ((Lambda/x)/2)*Pv*Ti;
```

### Anexo 8: Código de la función de restricción, revisión continua.

```
%Codificación de la función de restricción, revisión continua.
function [c, ceq] =
simple_constraint1(x,Pv1,Pv2,Pv3,Pv4,Pv5,Pv6,Pv7,Pv8,Pv9,Pv10,Pv11,Pv12,Pv1
3,Pv14,Pv15,Pv16,Pv17,Pv18,Pv19,Pv20,Pv21,Pv22,Pv23,Pv24,Pv25,Pv26,Pv27,Pv2
8,Pv29,Pv30,Pv31,Pv32,Pv33,Pv34,Pv35,Pv36,Pv37,Pv38,Pv39,Pv40,Pv41,Pv42,Pv4
3,Pv44,Pv45,Pv46,Pv47,Pv48,Pv49,Pv50,Pv51,Pv52,Pv53,Pv54,Pv55,Pv56,Pv57,Pv5
8,Pv59,Pv60,Pv61,Pv62,Pv63,Pv64,Pv65,Pv66,Pv67,Pv68,Pv69,Pv70,Pv71,Pv72,Pv7
3,Pv74,Pv75,Pv76,Pv77,Pv78,Pv79,Pv80,Pv81)
```

```
c =  
[(x(1)*Pv1+x(2)*Pv2+x(3)*Pv3+x(4)*Pv4+x(5)*Pv5+x(6)*Pv6+x(7)*Pv7+x(8)*Pv8+x  
(9)*Pv9+x(10)*Pv10+x(11)*Pv11+x(12)*Pv12+x(13)*Pv13+x(14)*Pv14+x(15)*Pv15+x  
(16)*Pv16+x(17)*Pv17+x(18)*Pv18+x(19)*Pv19+x(20)*Pv20+x(21)*Pv21+x(22)*Pv22  
+x(23)*Pv23+x(24)*Pv24+x(25)*Pv25+x(26)*Pv26+x(27)*Pv27+x(28)*Pv28+x(29)*Pv  
29+x(30)*Pv30+x(31)*Pv31+x(32)*Pv32+x(33)*Pv33+x(34)*Pv34+x(35)*Pv35+x(36)*  
Pv36+x(37)*Pv37+x(38)*Pv38+x(39)*Pv39+x(40)*Pv40+x(41)*Pv41+x(42)*Pv42+x(43  
) *Pv43+x(44)*Pv44+x(45)*Pv45+x(46)*Pv46+x(47)*Pv47+x(48)*Pv48+x(49)*Pv49+x(  
50)*Pv50+x(51)*Pv51+x(52)*Pv52+x(53)*Pv53+x(54)*Pv54+x(55)*Pv55+x(56)*Pv56+  
x(57)*Pv57+x(58)*Pv58+x(59)*Pv59+x(60)*Pv60+x(61)*Pv61+x(62)*Pv62+x(63)*Pv6  
3+x(64)*Pv64+x(65)*Pv65+x(66)*Pv66+x(67)*Pv67+x(68)*Pv68+x(69)*Pv69+x(70)*P  
v70+x(71)*Pv71+x(72)*Pv72+x(73)*Pv73+x(74)*Pv74+x(75)*Pv75+x(76)*Pv76+x(77)  
*Pv77+x(78)*Pv78+x(79)*Pv79+x(80)*Pv80+x(81)*Pv81]/2-80000000];  
ceq = [];
```

### Anexo 9: Código de la función de restricción, revisión periódica.

*%Codificación de la función de restricción, revisión continua.*

```
function [c, ceq] =  
simple_constraint2(x, Pv1, Pv2, Pv3, Pv4, Pv5, Pv6, Pv7, Pv8, Pv9, Pv10, Pv11, Pv12, Pv1  
3, Pv14, Pv15, Pv16, Pv17, Pv18, Pv19, Pv20, Pv21, Pv22, Pv23, Pv24, Pv25, Pv26, Pv27, Pv2  
8, Pv29, Pv30, Pv31, Pv32, Pv33, Pv34, Pv35, Pv36, Pv37, Pv38, Pv39, Pv40, Pv41, Pv42, Pv4  
3, Pv44, Pv45, Pv46, Pv47, Pv48, Pv49, Pv50, Pv51, Pv52, Pv53, Pv54, Pv55, Pv56, Pv57, Pv5  
8, Pv59, Pv60, Pv61, Pv62, Pv63, Pv64, Pv65, Pv66, Pv67, Pv68, Pv69, Pv70, Pv71, Pv72, Pv7  
3, Pv74, Pv75, Pv76, Pv77, Pv78, Pv79, Pv80, Pv81, Lambda1, Lambda2, Lambda3, Lambda4, L  
ambda5, Lambda6, Lambda7, Lambda8, Lambda9, Lambda10, Lambda11, Lambda12, Lambda13,  
Lambda14, Lambda15, Lambda16, Lambda17, Lambda18, Lambda19, Lambda20, Lambda21, Lam  
bda22, Lambda23, Lambda24, Lambda25, Lambda26, Lambda27, Lambda28, Lambda29, Lambda  
30, Lambda31, Lambda32, Lambda33, Lambda34, Lambda35, Lambda36, Lambda37, Lambda38,  
Lambda39, Lambda40, Lambda41, Lambda42, Lambda43, Lambda44, Lambda45, Lambda46, Lam  
bda47, Lambda48, Lambda49, Lambda50, Lambda51, Lambda52, Lambda53, Lambda54, Lambda  
55, Lambda56, Lambda57, Lambda58, Lambda59, Lambda60, Lambda61, Lambda62, Lambda63,  
Lambda64, Lambda65, Lambda66, Lambda67, Lambda68, Lambda69, Lambda70, Lambda71, Lam  
bda72, Lambda73, Lambda74, Lambda75, Lambda76, Lambda77, Lambda78, Lambda79, Lambda  
80, Lambda81)  
c =  
[(Lambda1/x(1))*Pv1+(Lambda2/x(2))*Pv2+(Lambda3/x(3))*Pv3+(Lambda4/x(4))*Pv  
4+(Lambda5/x(5))*Pv5+(Lambda6/x(6))*Pv6+(Lambda7/x(7))*Pv7+(Lambda8/x(8))*P
```

$v_8 + (\text{Lambd}a_9/x(9)) * Pv_9 + (\text{Lambd}a_{10}/x(10)) * Pv_{10} + (\text{Lambd}a_{11}/x(11)) * Pv_{11} + (\text{Lambd}a_{12}/x(12)) * Pv_{12} + (\text{Lambd}a_{13}/x(13)) * Pv_{13} + (\text{Lambd}a_{14}/x(14)) * Pv_{14} + (\text{Lambd}a_{15}/x(15)) * Pv_{15} + (\text{Lambd}a_{16}/x(16)) * Pv_{16} + (\text{Lambd}a_{17}/x(17)) * Pv_{17} + (\text{Lambd}a_{18}/x(18)) * Pv_{18} + (\text{Lambd}a_{19}/x(19)) * Pv_{19} + (\text{Lambd}a_{20}/x(20)) * Pv_{20} + (\text{Lambd}a_{21}/x(21)) * Pv_{21} + (\text{Lambd}a_{22}/x(22)) * Pv_{22} + (\text{Lambd}a_{23}/x(23)) * Pv_{23} + (\text{Lambd}a_{24}/x(24)) * Pv_{24} + (\text{Lambd}a_{25}/x(25)) * Pv_{25} + (\text{Lambd}a_{26}/x(26)) * Pv_{26} + (\text{Lambd}a_{27}/x(27)) * Pv_{27} + (\text{Lambd}a_{28}/x(28)) * Pv_{28} + (\text{Lambd}a_{29}/x(29)) * Pv_{29} + (\text{Lambd}a_{30}/x(30)) * Pv_{30} + (\text{Lambd}a_{31}/x(31)) * Pv_{31} + (\text{Lambd}a_{32}/x(32)) * Pv_{32} + (\text{Lambd}a_{33}/x(33)) * Pv_{33} + (\text{Lambd}a_{34}/x(34)) * Pv_{34} + (\text{Lambd}a_{35}/x(35)) * Pv_{35} + (\text{Lambd}a_{36}/x(36)) * Pv_{36} + (\text{Lambd}a_{37}/x(37)) * Pv_{37} + (\text{Lambd}a_{38}/x(38)) * Pv_{38} + (\text{Lambd}a_{39}/x(39)) * Pv_{39} + (\text{Lambd}a_{40}/x(40)) * Pv_{40} + (\text{Lambd}a_{41}/x(41)) * Pv_{41} + (\text{Lambd}a_{42}/x(42)) * Pv_{42} + (\text{Lambd}a_{43}/x(43)) * Pv_{43} + (\text{Lambd}a_{44}/x(44)) * Pv_{44} + (\text{Lambd}a_{45}/x(45)) * Pv_{45} + (\text{Lambd}a_{46}/x(46)) * Pv_{46} + (\text{Lambd}a_{47}/x(47)) * Pv_{47} + (\text{Lambd}a_{48}/x(48)) * Pv_{48} + (\text{Lambd}a_{49}/x(49)) * Pv_{49} + (\text{Lambd}a_{50}/x(50)) * Pv_{50} + (\text{Lambd}a_{51}/x(51)) * Pv_{51} + (\text{Lambd}a_{52}/x(52)) * Pv_{52} + (\text{Lambd}a_{53}/x(53)) * Pv_{53} + (\text{Lambd}a_{54}/x(54)) * Pv_{54} + (\text{Lambd}a_{55}/x(55)) * Pv_{55} + (\text{Lambd}a_{56}/x(56)) * Pv_{56} + (\text{Lambd}a_{57}/x(57)) * Pv_{57} + (\text{Lambd}a_{58}/x(58)) * Pv_{58} + (\text{Lambd}a_{59}/x(59)) * Pv_{59} + (\text{Lambd}a_{60}/x(60)) * Pv_{60} + (\text{Lambd}a_{61}/x(61)) * Pv_{61} + (\text{Lambd}a_{62}/x(62)) * Pv_{62} + (\text{Lambd}a_{63}/x(63)) * Pv_{63} + (\text{Lambd}a_{64}/x(64)) * Pv_{64} + (\text{Lambd}a_{65}/x(65)) * Pv_{65} + (\text{Lambd}a_{66}/x(66)) * Pv_{66} + (\text{Lambd}a_{67}/x(67)) * Pv_{67} + (\text{Lambd}a_{68}/x(68)) * Pv_{68} + (\text{Lambd}a_{69}/x(69)) * Pv_{69} + (\text{Lambd}a_{70}/x(70)) * Pv_{70} + (\text{Lambd}a_{71}/x(71)) * Pv_{71} + (\text{Lambd}a_{72}/x(72)) * Pv_{72} + (\text{Lambd}a_{73}/x(73)) * Pv_{73} + (\text{Lambd}a_{74}/x(74)) * Pv_{74} + (\text{Lambd}a_{75}/x(75)) * Pv_{75} + (\text{Lambd}a_{76}/x(76)) * Pv_{76} + (\text{Lambd}a_{77}/x(77)) * Pv_{77} + (\text{Lambd}a_{78}/x(78)) * Pv_{78} + (\text{Lambd}a_{79}/x(79)) * Pv_{79} + (\text{Lambd}a_{80}/x(80)) * Pv_{80} + (\text{Lambd}a_{81}/x(81)) * Pv_{81}];$

ceq = [];