



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN MÓDULO DE GESTIÓN DE
REPUESTOS CRÍTICOS PARA UNA FLOTA DE EQUIPOS DE TRANSPORTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL MECANICO

GONZALO PATRICIO LOPEZ SANCHEZ

PROFESOR GUÍA
SR. EDUARDO SALAMANCA HENRIQUEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SR. ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT
SRA. VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: Gonzalo Patricio López Sánchez
FECHA: 16/11/ 2016
PROFESOR GUIA: Eduardo Salamanca Henríquez**

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN MÓDULO DE GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS PARA UNA FLOTA DE EQUIPOS DE TRANSPORTE

Lo que motiva la realización de este trabajo es la necesidad de generar una plataforma que facilite la gestión del mantenimiento de cualquier organización cuyo principal activo sea la maquinaria de transporte. Esta plataforma debe ser más versátil, económica, amigable y orientada al usuario, que las soluciones actualmente presentes en el mercado.

En la actualidad existen algunas soluciones que permiten gestionar activos en términos de orden y costos, y otras que admiten realizar análisis más complejos ligados a temas de confiabilidad, mas no existe una solución que trate ambos temas simultáneamente de forma simple. Además, dichas aplicaciones suelen tener un elevado costo económico y presentan un desafío en su implementación. Con este trabajo da respuesta a la necesidad de generar una herramienta que permita abordar ambas temáticas adecuadamente y acercar las metodologías modernas del mantenimiento a un universo de usuarios amplio, diverso y dinámico.

Junto con la conceptualización general de esta plataforma, este trabajo profundiza en el tema del manejo de insumos y bodega, generando un asistente virtual que permite al usuario definir la mejor política de gestión de repuestos, considerando la condición de operación de los activos, entregándole acceso a diversos modelos de estimación de demanda. El usuario es guiado mediante una serie de preguntas al modelo que mejor se ajuste a su necesidad.

Los modelos escogidos fueron implementados y probados con ayuda del software MATLAB®, y sus resultados fueron contrastados con información real proveniente de una flota de camiones de transporte de mineral no metálico. Se realizaron modificaciones a los modelos recopilados de modo de incorporar un cierto grado de incertidumbre a los parámetros definidos como constantes y entregar respuestas considerando dicha variabilidad.

En el trabajo se describen conceptualmente las características de la plataforma informática que permiten manejar dicha información, junto con llevar un control centralizado de las labores relacionadas con el mantenimiento: su optimización, requerimientos de bodega, tiempos de respuesta, historiales, entre otras tareas. Durante el trabajo se utilizan diversas técnicas de priorización y selección las cuales son aplicadas a la base de datos, de forma tal de obtener repuestos cuyos parámetros se ajustan a los requerimientos de cada modelo.

La aplicación generada permite escoger entre distintos modelos de predicción de requerimientos de repuestos, lo que para posibilita establecer buenas alternativas para la planificación de la adquisición y manejo de inventarios, niveles críticos de reposición, entre otros. Adicionalmente, se desarrolla un manual de usuario de la aplicación.

Su desarrollo considera que pueda ser a futuro parte de una plataforma integral de gestión de activos físicos y la incorporación de nuevos modelos a su programación.

A mis hijas

AGRADECIMIENTOS

A mi Padre Celestial y su hijo Jesucristo, en quienes hallé el llamado y la guía para andar este sendero.

A mi compañera eterna, mi esposa Ariela, por ser mi inspiración, mi ejemplo, mi refugio, la mano que busqué cuando mi visión se nublaba y mi mente flaqueaba. Gracias por creer cuando yo dejé de hacerlo. Gracias por tu esfuerzo, valentía y sobretodo, por tu paciencia.

A Emilia y Rafaela, mis soles, mi dicha, mi razón de ser. Soy y seré mejor por y para ustedes. Gracias por permitirme acompañarlas y aprender a ser padre en el camino.

A mis padres, por recordarme siempre que la historia tenía un final y que yo podía ser el protagonista, que el esfuerzo trae frutos y que es buena meta el querer ser un buen hombre.

A mis hermanos, por ver en mí lo que ni el espejo me muestra y sus encomiables esfuerzos por intentar explicarme lo que hacen.

Al personal administrativo y docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, en quienes encontré apoyo y comprensión y que mantuvieron abierta, incluso a la fuerza, la puerta que me permitió llegar a este momento.

A los miembros de mi comisión, por aceptar guiar un velero sin timón y entregarme las herramientas que necesité en el momento justo para hallar mi rumbo.

Al profesor Carlos Gherardelli, quien aceptó acompañarme cuando por primera vez soñé con una titulación y a quien no pude retribuir a tiempo.

A mis amigos y colegas en Besalco Maquinarias, por su disposición a apoyarme y enseñarme.

A mis amigos, mi familia extendida, a quienes confiaría mi vida: los del taca, (ex) crillos, mapaches, gavines, bochefianos... Como sea que nuestros caminos se hayan cruzado, gracias por cada una de las risas que fueron y las que serán.

Y a quienes de una u otra forma aportaron directamente el desarrollo de algún aspecto del presente trabajo: Cesar, Juan Pablo, Gloria, Alvaro, Garrit, Claudio, Eduardo, José, Maricarmen, Maria Eugenia, Sole.... Que Dios les bendiga (y se los pague).

TABLA DE CONTENIDO:

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Motivación	1
1.3	Objetivos	1
1.3.1	Objetivo general	1
1.3.2	Objetivos específicos	2
1.4	Alcances	2
2	Metodología específica	3
3	Antecedentes específicos	6
3.1	Breve introducción a la teoría del mantenimiento	6
3.1.1	Estrategias de mantenimiento	6
3.1.2	Estructuras de Costos	8
3.2	Gestión de repuestos y cadena de suministros	8
3.2.1	Sistemas de control de inventario	9
3.2.2	Repuestos críticos	10
3.2.3	Priorización de repuestos	11
3.2.3.1	Diagramas de dispersión	11
3.2.3.2	Diagramas de Nelson-Aalen	14
3.2.3.3	Análisis de Modos de fallos	15
3.2.4	Modelos de Gestión de Repuestos	16
3.2.4.1	Modelo con demora en los pedidos	16
3.2.4.2	Demanda constante y variable sin demora en los pedidos	17
3.2.4.3	Minimización del costo global con costo de falla	18
3.2.4.4	Compras agrupadas	20
3.2.4.5	Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación	21
3.2.4.6	Modelo para componentes a fallo seguro	23
3.2.4.7	Inventario de componentes críticos de baja demanda	27
4	Desarrollo y Resultados	31
4.1	Descripción de la información recopilada	31
4.1.1	Caracterización de los pedidos	32
4.1.2	Análisis de Pareto	33
4.1.3	Diagrama de Nelson-Aalen de la flota en estudio	34
4.1.4	Diagrama de Nelson-Aalen modificado de los sistemas	36
4.1.4.1	Diagramas de Nelson-Aalen modificado, Grupo I	37
4.1.4.2	Diagramas de Nelson-Aalen modificado, Grupo II	42
4.1.5	Diagramas de Dispersión	47
4.1.5.1	Diagramas de Dispersión Grupo I	47
4.1.5.2	Diagramas de Dispersión Grupo II	50
4.1.6	Selección de repuestos críticos	52
4.1.6.1	Repuestos Críticos- Grupo 1	52
4.1.6.2	Repuestos Críticos- Grupo 2	55

4.2	Desarrollo e implementación de modelos de gestión de repuestos	56
4.2.1	Demanda con demora en los pedidos.....	56
4.2.1.1	Validación contra herramienta de cálculo	56
4.2.1.2	Análisis de sensibilidad	57
4.2.2	Demanda constante y variable sin demora en los pedidos.....	58
4.2.2.1	Validación contra herramienta de cálculo	58
4.2.2.2	Análisis de sensibilidad	59
4.2.3	Minimización del costo global con costo de falla	60
4.2.3.1	Validación contra herramienta de cálculo	60
4.2.3.2	Análisis de sensibilidad	61
4.2.4	Compras agrupadas	64
4.2.4.1	Validación contra herramienta de cálculo	64
4.2.4.2	Análisis de sensibilidad	65
4.2.5	Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación	66
4.2.5.1	Validación contra herramienta de cálculo	66
4.2.5.2	Análisis de sensibilidad	66
4.2.6	Modelo para componentes a fallo seguro.....	68
4.2.6.1	Validación contra herramienta de cálculo	68
4.2.6.2	Análisis de sensibilidad	69
4.2.7	Inventario de componentes críticos de baja demanda.....	72
4.2.7.1	Demanda Aleatoria.....	72
4.2.7.2	Demanda Intermitente	74
4.3	Validación de los modelos contra casos reales.....	76
4.3.1	Demanda con demora en los pedidos.....	76
4.3.2	Demanda constante y variable sin demora en los pedidos.....	79
4.3.3	Minimización del costo global con costo de falla	80
4.3.4	Compras agrupadas	82
4.3.5	Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación	83
4.3.6	Modelo para componentes a fallo seguro.....	85
4.3.7	Inventario de componentes críticos de baja demanda.....	86
4.3.7.1	Demanda Aleatoria.....	86
4.3.7.2	Demanda Intermitente	88
4.4	Descripción de las necesidades y características del sistema informático requerido para implementar los modelos elaborados.....	90
4.4.1	Requerimientos de hardware y otros recursos.....	90
4.4.2	Bases de Datos	90
4.4.3	Capas de funcionalidades.....	91
4.4.3.1	Acceso	91
4.4.3.2	Operación	92
4.4.3.3	Reportabilidad	93
4.5	Descripción del “asistente” diseñado: cuestionario considerado.....	94
4.6	Manual de usuario.....	96

5	Conclusiones y comentarios.....	97
	Bibliografía	100
	Anexo A: Manual de usuario de la aplicación	102
A.1	Introducción.....	102
A.2	Descripción general del módulo	103
A.2.1.	Árbol de decisión	103
A.3	Aplicación.....	105
A.3.1.	Acerca de MATLAB.....	105
A.3.2.	Ejecución del Modulo	107
A.3.1.1.	Definición del PATH para la ejecución del módulo.....	107
A.3.1.2.	Iniciación del módulo	108
A.3.3.	Nomenclatura	109
A.3.4.	Consideraciones al ingreso de datos.....	109
A.3.5.	Modelos incorporados	109
A.3.5.1.	Demanda con demora en los pedidos	110
A.3.5.2.	Demanda constante y variable sin demora en los pedidos	112
A.3.5.3.	Minimización del costo global con costo de falla	114
A.3.5.4.	Compras agrupadas	117
A.3.5.5.	Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación	119
A.3.5.6.	Redundancia de 2 componentes sin recambio de elemento operativo	122
A.3.5.7.	Demanda Aleatoria	125
A.3.5.8.	Demanda Intermitente	127
A.4	Comentarios.....	130
A.4.1.	Manejo de Resultados	130
A.4.2.	Limitaciones del programa.....	130
A.4.3.	Traspaso a otros lenguajes de programación.....	130
A.4.4.	Requerimientos de hardware	130
A.4.5.	Posibilidades de crecimiento y mejora.....	130
	Anexo B: Código fuente programado en MATLAB	132
B.1	Introducción.....	132
B.2	Aplicación principal: Selector de Modelos	132
B.3	Demanda con demora en los pedidos	137
B.3.1.	Función principal.....	137
B.3.2.	Función auxiliar 1: Calculo de probabilidad vectorial.....	139
B.3.3.	Función auxiliar 2: Calculo de probabilidad escalar	139
B.4	Demanda constante y variable sin demora en los pedidos	139
B.5	Minimización del costo global con costo de falla	142
B.6	Compras agrupadas	146
B.6.1.	Función principal.....	146
B.6.2.	Función auxiliar 1: Función objetivo	149
B.6.3.	Función auxiliar 1: Separador de Vectores	149
B.6.4.	Función auxiliar 2: Valores Óptimos	150
B.7	Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación	150
B.7.1.	Función principal.....	151
B.7.2.	Función auxiliar 1: optimo sin variación (incertidumbre)	153
B.7.3.	Función auxiliar 2: optimo con incertidumbre.....	154
B.7.4.	Función auxiliar 3: Separador de string	156
B.8	Redundancia de 2 componentes sin recambio de elemento operativo	156
B.8.1.	Función principal.....	156

B.8.2.	Función Auxiliar: Costo.....	159
B.8.3.	Función auxiliar: restricción de disponibilidad.....	160
B.8.4.	Función auxiliar: $M(t)$	161
B.8.5.	Función auxiliar: $Cyc(T)$	163
B.8.6.	Función auxiliar $V(T)$	164
B.8.7.	Función auxiliar $V1$	164
B.8.8.	Función auxiliar $V2$	165
B.8.9.	Función auxiliar $P1$	167
B.8.10.	Función auxiliar $P2$	168
B.8.11.	Función auxiliar Varianza (generador de incertidumbre)	169

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

En cualquier empresa cuyo principal activo físico sean las máquinas y equipos, la planificación del mantenimiento cumple un rol fundamental, sea éste preventivo, correctivo o predictivo, ya que por regla general su correcta implementación y ejecución permiten abaratar costos de reparación y extender la vida útil de dichos activos. La gestión de inventarios tiene una importancia crítica en el proceso, pues un exceso de lo requerido puede traducirse en menor liquidez o en un alto costo de oportunidad sobre el capital detenido, costos por almacenamiento, etc., mientras que su falta puede significar altos costos operacionales por indisponibilidad, aumento de primas de seguros, entre otros.

En algunos casos, el mantenimiento de las máquinas se maneja en forma autónoma y casi informal, con base en la recomendación del fabricante más algún ajuste proveniente de la experiencia. Dicha estrategia, si bien puede resultar útil para un equipo en particular, no necesariamente resulta la mejor si se desea tener un control centralizado del mantenimiento de grandes flotas, hacer seguimiento de los trabajos realizadas en las máquinas y mucho menos hacer gestión sobre dicho mantenimiento pues en algunos casos, la información generada durante el mantenimiento es en algunos casos dispersa y poco fiable. Por tanto, las decisiones que se pueden tomar tienen una versión sesgada de los acontecimientos, no pudiendo entonces ser completamente objetivas y mucho menos, óptimas. Un manejo centralizado de la información y de la gestión permite resolver algunos de estos problemas [1]

1.2 Motivación

Actualmente existen programas de planificación de recursos empresariales (ERP por sus siglas en inglés) que pueden, de una u otra forma dar respuesta a algunas necesidades de gestión de forma muy completa (por ejemplo, SAP, IBM MAXIMO). Existen otros que permiten hacer análisis de confiabilidad en base a la data disponible (Weibull++). Sin embargo, su costo de implementación y de mantención es a veces restrictivo. Es necesario, por tanto, generar una alternativa integral más económica y fácil de implementar, que entregue similares resultados pero ajustables a la real necesidad del cliente para gestionar sus activos, en particular en lo referido a la gestión de repuestos

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una aplicación de apoyo a la gestión de mantenimiento que permita discriminar distintas condiciones operacionales y escoger en base a sus características, un modelo de manejo de inventario de repuestos que se ajuste a los requerimientos de dichas situaciones.

1.3.2 Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general antes señalado, se han identificado los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y describir distintos modelos de gestión de repuestos, determinando a que condición operativa podrían ser aplicables cada uno de ellos.
- Diseñar en forma esquemática el sistema computacional para la gestión de activos físicos, estableciendo parámetros de funcionamiento, características y capacidades.
- Dentro de dicho sistema, establecer un módulo o aplicación permita discriminar dadas ciertas variables de entrada, el modelo a aplicar dada cierta política operacional y data disponible que maximice la confiabilidad de la bodega (niveles críticos, tamaño y frecuencia de pedidos, etc.)
- Desarrollar un manual de usuario del producto resultante.

1.4 Alcances

Se espera que como resultado de este trabajo se cuente con una aplicación que estime el requerimiento necesario de repuestos, adaptable a distintas realidades operacionales, ello a través de la integración de diversos modelos predictivos, disponibles al momento de realizar la consulta. Dicha aplicación tendrá una interfaz básica, disponible de modo local, siendo el foco el resultado obtenido y no la gráfica. Se aplicarán los modelos a casos reales, de modo de validar su eficacia.

2 Metodología específica

Durante el desarrollo del trabajo se realizan las siguientes actividades

- **Selección de modelos de gestión de repuestos aplicables**

Los modelos implementados son aquellos descritos en 3.2.3.3. La selección se realiza considerando la necesidad de responder a solicitudes frecuentes e infrecuentes de repuestos, siendo la mayoría de ellos críticos

Se realiza una búsqueda en la bibliografía de modelos que se ajusten a distintas circunstancias frecuentes en la industria.

- **Variaciones a los modelos y sensibilidad de la información**

Los modelos de gestión de inventario presentados, y muchos otros, operan principalmente sobre la base que la información generada en terreno es relativamente confiable y precisa. La experiencia indica que tales supuestos no siempre pueden cumplirse, ya sea por falta de conocimiento o capacitación del personal encargado de recopilarla, por falta de recursos que permitan recabar información adecuada a tiempo y con la calidad requerida, etc. Cuando la data no se ingresa al “sistema”¹ de forma adecuada, se pueden generar variaciones importantes en los indicadores que utilizan dichos datos. Por ejemplo, omitir tiempos de detención (programados o no) pueden llevar a falsos MTBF y en consecuencia falsas estimaciones de tasa de falla; tiempos de reposición mal estimados que pueden llevar a establecer políticas erradas de reposición, a tiempos de respuesta o tamaños de lote de pedido no acorde a las necesidades de la operación, entre otros.

Para abordar esta posible incertidumbre en los datos, se incorpora en el código de programación de cada modelo un estudio de Monte Carlo, esto es, se genera una muestra de n datos aleatorios asociados a alguno de los parámetros definidos como constante (λ , *Lead Time*, por nombrar algunos), se ingresa cada uno de ellos como *input* a los modelos y se estima, en lugar de un óptimo específico, un intervalo de confianza para la solución que incluya al menos 95% de la data simulada. Esto permite entregar un rango de acción y decisión más amplio que una respuesta puntual.

Para obtener los n datos, se asume que los *inputs* siguen una distribución triangular o una distribución normal, siendo el valor ingresado por el usuario la *media* de dicha distribución. La selección de dicha distribución depende del usuario, al consultar sobre el grado de certeza que tenga sobre un cierto valor “pesimista” y un valor “optimista” que completen los parámetros requeridos por la distribución: si el usuario manifiesta certeza, la distribución será triangular, de otro modo, normal.

La selección de este nuevo óptimo, que se llamará óptimo factible, se realizará evaluando el *costo* de la incertidumbre, que viene por la diferencia en el resultado de la evaluación de los

¹ Entiéndase por **sistema** al conjunto de procedimientos o documentación donde se procesa y/o almacena la información generada.

extremos probables generados. De ser mayor a un valor de referencia (5%) se escogerá el óptimo de acuerdo al escenario optimista, de lo contrario, el pesimista.

Esta modificación permite dar cierta amplitud a resultados que de otra manera serían estáticos y permite incorporar la aleatoriedad observada en eventos reales, como lo es por ejemplo un retraso en la entrega de un repuesto por fallas del proveedor, generando entonces un aporte a la flexibilidad de los modelos.

- **Desarrollo e implementación de modelos de gestión de repuestos en código compatible con software MATLAB.**

Una de las características de MATLAB es que puede realizar cálculos usando grandes volúmenes de información simultánea, puesto que su codificación está orientada al trabajo con matrices y vectores. Esto permite que, para el objetivo de realizar paralelamente el mismo cálculo con variaciones a ciertos parámetros se operen los vectores y/o matrices en los cuales están almacenados, según sea el caso.

Junto con ello, MATLAB posee en sus bibliotecas generadores de números aleatorios asociados a distribuciones conocidas, la posibilidad de integrarlo con JAVA y de crear archivos autoejecutables (incluido el motor de cálculo), además de módulos de simulación (SIMULINK), lo que se ajusta a los requerimientos del proyecto.

Los algoritmos de programación son elaborados a partir de las ecuaciones y procedimientos descritos en la bibliografía y serán incluidos en los anexos del presente trabajo.

- **Recopilación de material relativo al movimiento y requerimientos de repuestos y bodega de una empresa de transporte.**

En el presente trabajo contempla la aplicación de los modelos a una flota de transporte para su validación, cuya demanda de repuestos se considera una variable de entrada pre tratada y ajustada. Sin embargo el modelo debiese ser capaz de absorber maquinaria de otro tipo y condiciones de operación bajo los mismos principios.

Los datos recopilados corresponden a una flota de Camiones Mercedes Benz Modelos 3350S, 3344 y 2044, destinados a transporte de material no metálico en el norte de Chile. La información corresponde a los movimientos de bodega (pedidos) entre los años 2013 y 2014, provistos por Besalco Maquinarias S.A. (desde ahora, BSM)

- **Procesamiento de la información recopilada y priorización de repuestos**

De dichos datos, se obtienen repuestos considerados críticos o que responden a las condiciones requeridas por cada uno de los modelos. Para su priorización, se utilizan métodos mencionados en los antecedentes de este proyecto (Pareto, Jack Knife 3d, Nelson Aalen modificado, Análisis de modo de fallos). De tal priorización se obtienen los repuestos candidatos para su uso en los modelos y se caracteriza la flota estudiada.

- **Validación de los modelos en base a la data de repuestos disponible. Se considera el uso de simulaciones con apoyo de MATLAB.**

Se analizan los resultados de los modelos usando las herramientas de MATLAB para generar posibles escenarios y contrastar las respuestas obtenidas. Junto con ello se comparan las curvas obtenidas a partir de los parámetros que se obtienen del estudio de la información real gracias al software comercial EXCEL.

• Descripción de las necesidades y características del sistema informático requerido para implementar los modelos elaborados

Dado que dentro de los alcances del trabajo se considera la programación de los modelos hasta la interface básica (consola), se define de manera esquemática la plataforma donde ellos han de estar inmersos, es decir, se define conceptualmente los restantes módulos, relaciones y funciones que permitirán a la aplicación ser parte de un elemento funcional y que la plataforma pueda operar adecuadamente.

Se elaboran diagramas relacionales y de flujo, sin especificar requerimientos técnicos sobre hardware o software necesario para implementar la plataforma en formato web.

• Diseño de “asistente” virtual para la selección de modelo; cuestionario, parámetros a obtener.

Una de las premisas del proyecto es generar una alternativa de selección de modelos que guíe al usuario hacia el que más se ajusta a su necesidad, de acuerdo al abanico disponible. Dicha selección debe ser resultado de una serie de preguntas guiadas, que permitirán orientar al usuario a través de las opciones de un árbol de decisión. Esto tendrá como consecuencia la creación de un “asistente” virtual de selección.

• Implementación de los modelos en el sistema informático descrito, considerando la inclusión del “asistente”.

Se desarrolla una aplicación y todos los modelos a nivel de script, en base a las herramientas de MATLAB. Dicha aplicación considera la serie de consultas de guía realizadas por el asistente. Su inclusión en la plataforma será solo a nivel de diseño.

• Desarrollo de manuales y/o instructivos específicos del sistema.

Se desarrollará un manual de usuario breve de forma tal de explicar el funcionamiento de la aplicación, además de una descripción teórica de los modelos que incluye ejemplos y recomendaciones.

3 Antecedentes específicos

3.1 Breve introducción a la teoría del mantenimiento

El mantenimiento, por regla general, es el conjunto de acciones, operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, industrias, equipos, sistemas, componentes, etc., puedan seguir desempeñándose adecuadamente en la función para la cual fueron diseñados [2].

Dichas acciones deben estar correctamente coordinadas y planificadas para que el resultado sea óptimo en términos de utilización de recursos, tiempo y resultados.

Un mantenimiento mal aplicado, puede terminar con una reducción drástica de la vida útil de una maquina o un aumento de los costos requeridos para mantenerla operativa. Además, un mantenimiento incompleto o un mal mantenimiento pueden tener como resultado una merma significativa en las horas de disponibilidad del equipo.

3.1.1 Estrategias de mantenimiento

Existe un sinnúmero de estrategias con las cuales abordar el mantenimiento, cada una de éstas aplicable a una situación particular y que a su vez tendrán distintos resultados tanto técnicos como económicos. La decisión final sobre cuál de las diversas estrategias será aplicada depende de dos clases de factores: *factores externos al mantenimiento* y *factores directamente ligados al mantenimiento (internos)* [2]

Entre los factores externos, se puede encontrar situaciones a nivel empresa o ambientales. Estos tienen que ver con la redistribución de recursos disponibles para mantenimiento a nuevos proyectos, aumentos de producción, entre otros. También están los factores relacionados con la producción misma, como las propiedades de la materia prima, los tiempos muertos de producción disponible para mantenimiento, etc.

Los factores ligados directamente al mantenimiento son aquellos en que el equipo mantenedor tiene control. Entre ellos están, la calidad y cantidad de recursos humanos y materiales, la distribución de labores y el esquema organizacional, la gestión de los repuestos, etc.

En general, el mantenimiento busca preservar las funciones del equipo o sistema. Esto se traduce en la estructura de costos y puede provocar que equipos iguales tengan diferentes estrategias de mantenimiento. Si bien las alternativas son múltiples y con resultados igualmente diversos, existen 4 estrategias convencionalmente aplicadas

- *Mantenimiento preventivo, o centrado en el tiempo (o preventivo sistemático)*; el cual se basa en la historia de la máquina y su funcionamiento. De acuerdo a la estadística generada se programa la intervención de la máquina, equipo o componente a intervalos regulares.
- *Mantenimiento centrado en la condición (o predictivo)*; el cual se basa en la utilización de sensores o mediciones, que pretenden situar el mantenimiento justo antes de la ocurrencia de la falla (monitoreo continuo)

- *Mantenimiento proactivo para evitar aparición o recurrencia*; el mantenimiento que se realiza independientemente del estado del componente al momento de la intervención y que busca erradicar la causa raíz del o de los problemas, generando una condición adecuada para el trabajo de los activos.
- *Mantenimiento reactivo o correctivo*; que se aplica luego de aparecer una falla.

Las tres primeras alternativas tienen en común el hecho de que se realizan antes de que ocurra la falla. El momento de dicha intervención es crucial en términos productivos, pudiéndose generar tres situaciones

- *El equipo funciona y la producción continúa*; lo que es realizable con inspecciones preventivas o la instalación de sensores o instrumentos que informan acerca de la condición del equipo²
- *El equipo es detenido y la producción no es afectada*: lo que es posible cuando existen equipos redundantes o en *stand-by* o cuando la producción no es continua (fines de semana, por ejemplo)
- El equipo es detenido y la producción se detiene

La coordinación entre el área productiva, de logística y la del mantenimiento es de vital importancia. Una estrategia adecuada de mantenimiento preventivo depende en buena parte de un historial preciso de los equipos, esto es, el detalle de fallas ocurridas, sus soluciones, historial de mantenimientos, tiempos de intervención, mejoras u otras intervenciones. Esta información no siempre se encuentra disponible.

Cuando existe un mantenimiento centrado en la condición, o mantenimiento predictivo, se busca mediante la medición de ciertas variables que pueden dar indicios de una posible falla o deterioro, identificar la parte o componente que pudiese afectar el desempeño del conjunto y cambiarla solo cuando sea necesario. Existen diversas técnicas ampliamente utilizadas tales como:

- Análisis de vibraciones
- Medición de Temperatura
- Espectroscopia
- Análisis de aceite
- Ultrasonido
- Etc.

El mantenimiento correctivo, tiene como fin la recuperación de un elemento que ha fallado, o que ha sufrido algún tipo de daño producto de una mala operación, factores ambientales, etc. Por su naturaleza, tiene el potencial de ser el más caro, ya que no solo tiene asociados los costos de una reparación (repuestos, insumos, etc.) sino que además existen los costos de una producción detenida de forma no planificada, daños a equipos solidarios con el que falla, aumento de primas de seguros, etc.

² Actualmente, la maquinaria incluye diversos sensores que permiten alertar en el panel de control al operador sobre la ocurrencia de una condición anómala (códigos de error). Incluso, algunas compañías ofrecen el manejo de esta información de forma remota.

3.1.2 Estructuras de Costos

La falla de un sistema o componente tiene diversos tipos de costos asociados, no solamente aquellos ligados a su reparación. Adicionalmente al costo de repuestos, insumos y mano de obra requeridos para la reposición del sistema al servicio existen aquellos ligados a la pérdida de ingresos por no producción, intereses o multas.

En líneas generales, podemos desglosar el Costo Global de Mantenimiento en los siguientes términos:

$$C_g = C_i + C_f + C_a + C_{si}$$

3.1

Siendo:

C_g: Costo Global de Mantenimiento

C_i: Costos de Intervenciones

C_f: Costos por pérdidas de producción

C_a: Costos de almacenamiento

C_{si}: Costos de Sobre-inversiones

En general, estos costos están interrelacionados. Por ejemplo, con un alto costo de intervención y almacenamiento, es probable que el costo asociado a una falla disminuya.

Los *costos de intervención* son aquellos relacionados con el mantenimiento correctivo o preventivo, tanto directos (insumos, repuestos, energía) como indirectos (personal administrativo, informática).

Los *costos de falla* son los producidos por los ingresos no percibidos por la detención en la producción, las pérdidas de materia prima no utilizada, multas por incumplimiento de metas, etc.

Los *costos de almacenamiento* representan los costos de mantener y financiar un inventario de piezas e insumos para el mantenimiento, que incluyen por ejemplo: el costo del capital detenido por el inventario y la mano de obra de bodega, etc.

El *costo de sobre-inversión* corresponde a la compra de un equipo o componente con la misma función de uno en funcionamiento, pero con mayor confiabilidad³ y por ende, de una mayor inversión inicial.

En general, se busca que el costo global de mantenimiento sea siempre el mínimo posible,⁴ optimizando todos los recursos disponibles. Dependiendo de la estrategia seleccionada será el peso que cada componente de dicho costo tendrá en el balance final.

3.2 Gestión de repuestos y cadena de suministros

³ Entiéndase confiabilidad como la probabilidad de que un elemento no falle en un período de tiempo[2]

⁴ Existen casos en los cuales el objetivo es la maximización de la disponibilidad, sin importar el costo de mantenimiento, ya que el costo de la falla es demasiado alto, por ejemplo en redes de emergencia, equipos militares, de soporte vital, etc.

En la actualidad, existen diversos enfoques mediante los cuales optimizar el problema de la gestión de los repuestos. Cada uno de ellos toma diversas variables en consideración, dependiendo en la mayoría de los casos del tipo de demanda de los elementos. Esta demanda puede ser de naturaleza determinística o probabilística, según sea ésta relativamente conocida y estable, o no.

Dependiendo del grado de criticidad del insumo, surge la inquietud sobre si es necesaria o no la mantención de un inventario. Esto debido al desfase entre la producción o suministro del insumo y las fluctuaciones aleatorias de la demanda y de los tiempos de reposición [3]: el elemento en cuestión puede ser de fácil reposición y de bajo costo o por el contrario, el tiempo de espera hasta su obtención muy largo y su costo elevado, lo que puede significar serio daño a la producción u otros por ejemplo, en el caso de elementos de soporte de vida. El problema se transforma en una optimización multivariada, donde habitualmente se busca minimizar el costo total y las condiciones de borde van variando según el matiz de la situación y lo que se busca responder es con qué frecuencia pedir, cuándo pedir y cuánto pedir.

Para una mejor comprensión de los temas a tratar, es necesario definir algunos conceptos:

- Nivel de Servicio: Uno de los objetivos de la administración de inventarios es garantizar que un elemento esté disponible en el momento y en las cantidades necesarias. Generalmente se mide como mide como la probabilidad de satisfacer la demanda a partir del stock actual para un período dado [4]. Se entiende por

$$\text{Nivel de Servicio} = 1 - \frac{\text{Nº de unidades agotadas}}{\text{Demanda Total}} \quad 3.2$$

- Tiempo de reposición: En términos sencillos, es el tiempo que transcurre entre que se genera una solicitud y que el pedido se encuentra disponible. Es comúnmente conocido como *Lead Time* [8].
- Punto de reorden o nivel de alerta (s): es el nivel de inventario mínimo permitido, a partir del cual se debe emitir una orden de reposición
- Tamaño de pedido (Q): es la cantidad de insumo o elementos solicitados con cada pedido de reposición.

3.2.1 Sistemas de control de inventario

De acuerdo a la literatura, son cuatro los sistemas de control de inventario más comunes, en la teoría básica de cadena de suministro [5]

- Sistema (s, Q): Mediante revisión continua, cada vez que el inventario llega al punto de reorden s , se genera una orden de pedido por una cantidad Q .
- Sistema (s, S): Nuevamente, cuando el inventario cae al punto s o menor, se genera una orden que incremente el nivel de inventario hasta su capacidad máxima, S .
- Sistema (R, S): Mediante revisión periódica, cada R unidades de tiempo se revisará el inventario y se ordena la cantidad necesaria para llegar a S .

- Sistema (R, s, S): También por revisión periódica, cada R unidades de tiempo se revisa el inventario contra s , y se repone hasta llegar a S . En caso que el nivel sea mayor a s , no se realiza el pedido.

Una buena gestión de inventario pasa por la determinación óptima de los parámetros s , S , Q y R de acuerdo a las características de cada operación. Muchos métodos trabajan sobre la base de la historia de las solicitudes de repuestos, lo cual se ajusta de buena manera para aquellos donde la rotación es alta y la demanda es un dato relativamente conocido. Cuando los repuestos son de baja rotación, el problema se vuelve más complejo puesto que la data disponible no es mucha y el valor de dichos repuestos generalmente es alto, sin embargo, no disponer de ellos tiene la potencialidad de dañar severamente la confiabilidad de un sistema. [2]

En un caso ideal, una bodega siempre tendría los repuestos en caso de falla de un componente, para evitar detenciones innecesarias de equipos dada la posibilidad de demora en tiempos de entrega; sin embargo, tener almacenados dichos elementos tiene asociados ciertos costos [6].

En general, los costos asociados a la gestión de inventario son

- Costo de almacenamiento: asociado a intereses no devengados, seguros, arriendos, etc.
- Costo de los repuestos: asociado al precio de los mismos
- Costo de adquisición: el costo de cursar una orden de compra, manejo de repuestos, control de calidad, contabilidad, etc. Dependerá en muchos casos de la cantidad de solicitudes realizadas a un proveedor
- Costo de falla: por la no disponibilidad del elemento y sus efectos en la producción

3.2.2 Repuestos críticos

Los repuestos críticos son aquellos que soportan la operación de sistemas críticos, puesto que se generan importantes costos por su escasez. En consecuencia, se requiere una alta disponibilidad del insumo. Es posible solventar esta situación con un sobre stock, pero esta inversión en el elemento trae consigo costos de oportunidad y almacenamiento [7], los cuales pueden ser restrictivos según la estructura de costos o los límites presupuestarios que se manejen

Según el objetivo buscado, es posible discriminar la criticidad de un repuesto, ya sea la maximización de la disponibilidad o la minimización del costo. En cualquier caso, la decisión final depende del tomador de decisiones [7] y estos apuntan generalmente a:

- Minimizar el costo global asociado a la gestión de repuestos
- Maximizar la disponibilidad del sistema
- Garantizar un cierto nivel de servicio
- Maximizar la disponibilidad en misión, esto es la probabilidad de satisfacer una demanda en todo tiempo especificado.

Se han categorizado los modelos de optimización de acuerdo a diversos criterios [8], sin embargo Martínez [7] y resume de forma eficiente distintas categorías de modelos de optimización en base a otros trabajos.

- Enfoque centrado en el ítem vs. enfoque de sistema:
- Modelos para componentes reparables vs. para componentes no reparables:
- Estructura de escalón único vs. estructura multi- escalón:
- Modelos con un nivel de indentación de ítems vs. Modelos multi- indentación:

3.2.3 Priorización de repuestos

Necesariamente, para procesar grandes volúmenes de información relacionadas con repuestos de flotas de maquinarias e identificar en ellos elementos críticos, se debe recurrir a herramientas y técnicas de priorización. Idealmente, se debe identificar aquellos elementos que tengan un mayor impacto en el desempeño de la organización y realizar procesos de optimización en torno a ellos [9].

La literatura de la cadena de suministro tradicional incluye criterios como el de Pareto y ABC [3] [4] [5] y aborda el problema principalmente desde la perspectiva de la optimización de inventario. Una de sus desventajas es que fija a priori un criterio de evaluación, sesgando en cierto modo otros aspectos del problema que pudiesen ser fuentes de información importante al momento de tomar decisiones

Trabajos más recientes como los de Louit, Pascual, Banjevic y Jardine [10] [11] han ampliado la mirada incluyendo criterios asociados a la condición, la confiabilidad de los equipos y elementos. Trabajos como el de Knights [12] permiten tener una visión multicriterio a través del *Diagrama de Dispersión de Tiempo*, o diagrama de Jack Knife, el cual permite priorizar según datos de confiabilidad (λ , tasa media de fallas), mantenibilidad (MTTR, tiempo medio de reparación) e indisponibilidad (porcentaje de tiempo fuera de servicio) [9]. El trabajo de Pascual et al. [13] permite además incorporar una perspectiva económica al análisis anterior, en el *Diagrama de Dispersión de Costos*.

Adicionalmente, existe una relación de la información suministrada a las herramientas mencionadas con el historial de cada equipo, repuesto o modo de falla analizado. Existen ciertos fenómenos puntuales que pueden afectar el desempeño, incluso de fuentes externas a su funcionamiento (por ejemplo, fenómenos climáticos que aumenten puntualmente la tasa de falla de un componente o el desempeño de un operador). Dichos fenómenos pueden ser identificados gráficamente con el Diagrama de Nelson Aalen, el cual en su versión mejorada, permiten aumentar las dimensiones de análisis [14].

3.2.3.1 Diagramas de dispersión

3.2.3.1.1 Diagrama de dispersión de tiempo

El diagrama de dispersión propuesto por Knights (Dispersión de Tiempo) es multicriterio, de ejes logarítmicos. En él se define la *Indisponibilidad* de un modo de falla i como

$$D_i = \lambda_i \cdot MTTR_i$$

3.3

Por lo que la indisponibilidad total del sistema es

$$D = \sum D_i$$

3.4

Al traspasar la ecuación 3.3 a escala logarítmica, se obtiene

$$\text{Log}(D_i) = \text{Log}(\lambda_i) + \text{Log}(MTTR_i)$$

3.5

Se definen adicionalmente tres rectas, que corresponden a los promedios de la confiabilidad, tasa de falla e indisponibilidad, tal como se indica en la Ilustración 3-1 [9]

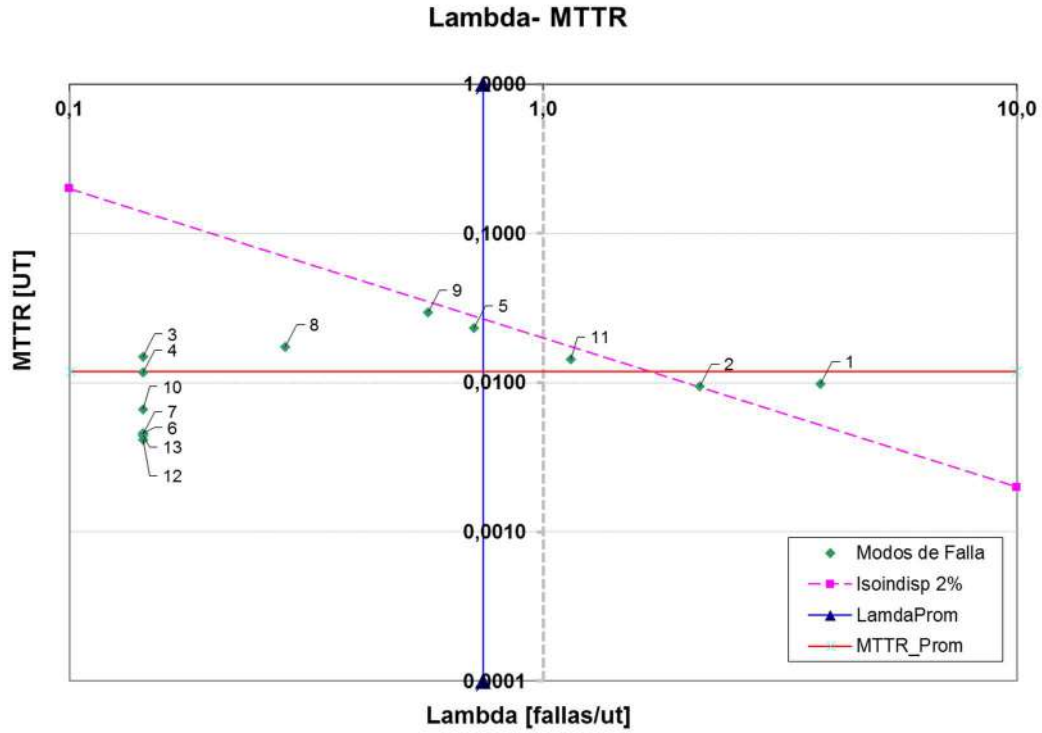


Ilustración 3-1 Diagrama de Dispersión de Tiempo. (Elaboración propia)

Dichas rectas promedio permiten categorizar ciertas fallas como *agudas* ($MTTR_i$ superior a la media), *crónicas* (λ_i mayor a la media) y *críticas* (D_i superior a la media) [9]. Las ecuaciones que describen los ejes para los N modos de falla del sistema, son las siguientes:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i}{N}$$

3.6

$$\overline{MTTR} = \frac{\sum MTTR_i}{N}$$

3.7

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{N}$$

3.8

3.2.3.1.2 Diagrama de dispersión de costos

El diagrama de dispersión de costo extiende el ámbito del diagrama de dispersión de tiempo, al agregar los efectos económicos de las fallas, generando así una visión más global del problema. Esto se logra incorporando como nuevos parámetros los costos asociados a la falla j , similares a indicados en la ecuación 3.1, del modo:

- $C_{i,j}$: Costos de Intervenciones por unidad de tiempo
- $C_{f,j}$: Costos por pérdidas de producción (falla), unidades de tiempo
- $C_{a,j}$: Costos de almacenamiento por unidad de tiempo
- $C_{si,j}$: Costos de Sobre-inversiones por unidad de tiempo

De este modo, el costo global del sistema puede ser expresado como:

$$C_g = \sum (c_{i,j} + c_{f,j} + c_{a,j} + c_{si,j}) \lambda_i \cdot MTTR_i \quad 3.9$$

O lo que es igual:

$$C_g = \sum c_{g,j} \cdot D_i \quad 3.10$$

Por lo que el costo global es el producto de la suma de los costos globales específicos asociados a la falla j y la indisponibilidad incurrida.

Se grafica de forma similar al diagrama de dispersión de costos, con ejes logarítmicos, agregando el costo como una nueva dimensión, tal como se aprecia en la Ilustración 3-2. [9]

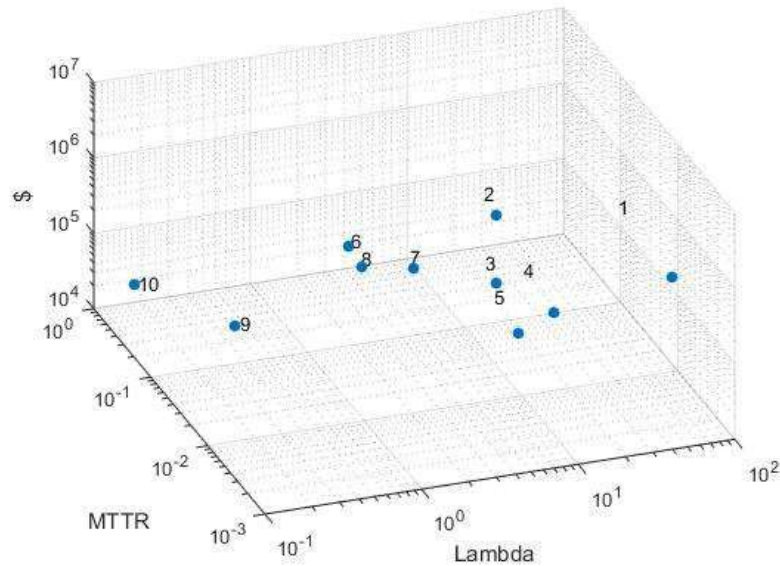


Ilustración 3-2 Diagrama de dispersión de costos en 3D

Dependiendo del enfoque requerido para el análisis, se puede tomar uno de los planos generados y proceder tal como en el diagrama de dispersión del tiempo, agregando el carácter de *críticas para el negocio* a las fallas cuyo costo global supere la media.

3.2.3.2 Diagramas de Nelson-Aalen

3.2.3.2.1 Diagrama de Nelson-Aalen tradicional

Una herramienta habitualmente utilizada en el análisis de historiales de mantenimiento es el diagrama de Nelson Aalen (DNA), el cual es un estimador no paramétrico de la función de confiabilidad que utiliza todo, o parte, del histórico de datos.

El diagrama se construye graficando la suma acumulada de eventos (normalmente intervenciones, planificadas o no) en función del tiempo [14]. Esto permite ver aproximadamente la estacionalidad de los procesos: una concavidad o convexidad en la curva pueden representar aumentos o disminuciones entre los tiempos entre intervenciones. Un ejemplo de esto se puede apreciar en la Ilustración 3-3 [14]

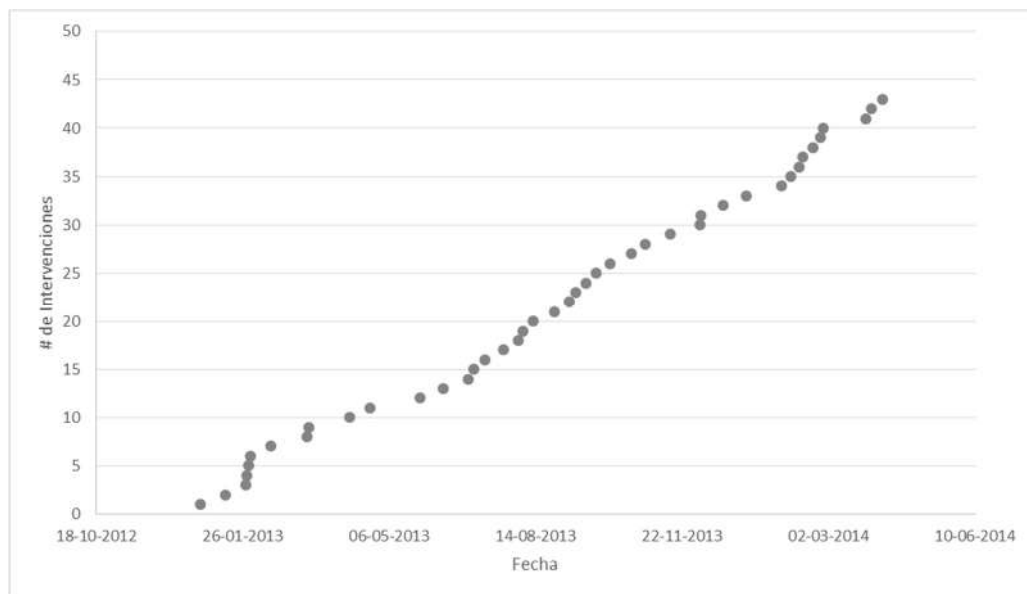


Ilustración 3-3 Diagrama de Nelson Aalen

3.2.3.2.2 Diagrama de Nelson-Aalen modificado

El diagrama de Nelson - Aalen modificado (DNAM), consiste en un gráfico de burbujas, de similar construcción al DNA tradicional, con las siguientes consideraciones [14]:

- La dispersión de las burbujas representa la misma función, punto a punto, que en el DNA original.
- El diámetro de las burbujas representa gráficamente la duración de la intervención.
- El contorno de las burbujas representa el estado del equipo durante la intervención. Si el borde es sombreado, el equipo estuvo fuera de servicio, de lo contrario, estuvo operativo.
- Si el color de la burbuja es rojo, la intervención fue no planificada (correctiva)

Un ejemplo del DNAM modificado se aprecia en la Ilustración 3-4.[14]



Ilustración 3-4 Ejemplo de Diagrama de Nelson Aalen mejorado de un modo de falla

Con esta modificación, se pueden obtener diversos datos como por ejemplo [14]:

- Desviación del mantenimiento preventivo programado: al tener identificado de un color uniforme las intervenciones programadas, se puede visualizar su frecuencia y hacer un monitoreo más acucioso del programa.
- Calidad del mantenimiento/operación: si posterior a una intervención planificada, ocurren una sucesión de intervenciones no planificadas, puede ser signo de un mantenimiento mal realizado o una operación defectuosa, sobre todo al combinar este criterio con la concavidad/convexidad de la curva.
- Eficiencia en las intervenciones: el agregar la dimensión de tiempo de duración de las intervenciones, permite identificar visualmente las desviaciones de los tiempos normales de trabajo (diferencias de diámetro) y atacar factores puntuales que pudiesen afectar el desempeño

Con esta información, también es posible construir una función de supervivencia (una aproximación a la función de confiabilidad de la maquina) pero dicho aspecto no será tratado en el presente trabajo.

3.2.3.3 Análisis de Modos de fallos

El AMF es un método analítico que permite de forma relativamente simple evaluar la criticidad de un modo de falla según su frecuencia, su probabilidad de ocurrencia y severidad de las consecuencias entre otros. [2]

La idea general es asignar valor numérico a cada modo de fallo de acuerdo a los criterios seleccionados y en base a eso, establecer la criticidad de cada uno, operando el valor del indicador para cada criterio (por ejemplo, multiplicándolos entre sí) En el caso particular de este trabajo, se utilizará esta metodología para establecer prioridades *entre repuestos*. Así, por ejemplo, si el valor de dos indicadores es 3 y 5 respectivamente para un modo de falla, bajo una lógica multiplicativa su índice de gravedad sería 15. Un ejemplo de tabulación se puede apreciar en la Tabla 3-1

Tabla 3-1 Ejemplo de tabulación de Criticidad.

Índice de Gravedad	Tiempo de Detención
1	$\leq 0,5$ hr
2	$\leq 1,5$ hr
3	≤ 5 hr
4	≤ 24 hr
5	≥ 24 hr

Fuente: Pascual [2]

3.2.4 Modelos de Gestión de Repuestos

Se muestran a continuación algunos modelos para definir los tiempos entre pedidos y los niveles mínimos de inventario (punto de reorden), para repuestos críticos y no críticos.

3.2.4.1 Modelo con demora en los pedidos

En el caso básico del modelo de Wilson se asume que el repuesto llega inmediatamente una vez solicitado, es decir que el tiempo de reposición o *Lead Time* T_d es nulo o despreciable. Cuando no es así y el consumo tiene una tasa λ , se debe realizar un nuevo pedido al llegar al nivel de alarma $s = \lambda T_d$, (equivalente al consumo medio durante el período T_d) tal como se muestra en la Ilustración 3-5 [2]

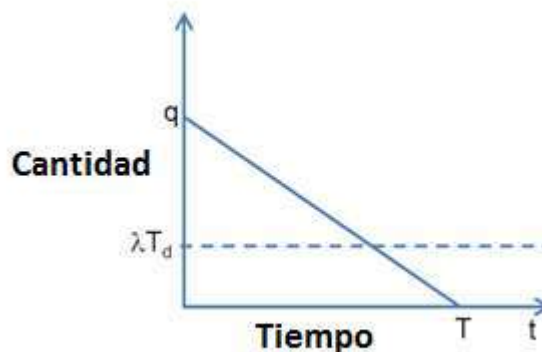


Ilustración 3-5 Modelo de Wilson con demora en los pedidos

Se puede poner un nivel de alarma un poco mayor, incorporado un elemento probabilístico. Definiendo un nivel de alarma q_a entonces la probabilidad de que el consumo sea menor en el tiempo T_d es

$$P(\text{consumo} \leq q_a) = \sum_{i=0}^{q_a} \frac{e^{-\lambda T_d} \lambda T_d^i}{i!}$$

3.11

Esto en el caso en que la demanda sigue una distribución de Poisson. Similar ejercicio se puede hacer para cuando la demanda está caracterizada por otras distribuciones.

Las variables de entrada de este modelo son entonces (para una distribución de Poisson):

- La tasa de fallas del componente $\lambda(t)$
- el nivel de alarma qa
- Td el lead time conocido y aplicable

Este modelo es particularmente sensible al lead time escogido, por lo que es necesario considerar potenciales variaciones al momento de presentar los resultados

3.2.4.2 Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

Esta extensión del modelo de Wilson permite abordar situaciones donde un componente de la demanda es constante y conocida, mientras que otra tiene cierto grado de variabilidad, pero sigue siendo determinística: por ejemplo, cuando son conocidas las intervenciones preventivas y los overhaul a un equipo y se requiere una cantidad de un elemento. La demora puede considerarse despreciable o inexistente si se trata de elementos no reparables fácilmente conseguibles en el mercado, ya sea con el elemento original o una alternativa (filtros, correas)

En tal caso el modelo de Wilson varia tal que la demanda toma la forma:

$$\lambda^f = \lambda^c + \lambda^v \quad 3.12$$

Siendo λ^c y λ^v las componentes constante (overhaul) y variable (reemplazo), respectivamente. Estas se obtienen de:

$$\lambda^c = \frac{q_c}{T_c} \quad 3.13$$

$$\lambda^v = \lambda * q_v \quad 3.14$$

Y se incorporan al modelo de Wilson con las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 3.20, que provienen de minimizar el costo global involucrado [6].

El costo global esperado es para este caso:

$$Cg = Cr + Ca + Cad + Cf \quad 3.15$$

Donde:

- $Cr = \text{Costo de repuesto por unidad de tiempo}$

$$\frac{p_u Q}{T} = p_u * \lambda \quad 3.16$$

- $Ca = \text{Costo de almacenamiento por unidad de tiempo}$

$$\frac{1}{2} Q p_u \tau \quad 3.17$$

- $Cad = \text{Costo de adquisición por unidad de tiempo}$

$$\frac{C_{ad}}{T} = C_{ad} * \frac{\lambda}{Q} \quad 3.18$$

Al optimizar la ecuación se obtiene:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2\lambda^f C_{ad}}{p_u \tau}} \quad 3.19$$

$$T^* = \frac{Q^*}{\lambda^f} \quad 3.20$$

Las variables de entrada para este modelo son:

- La tasa media de falla λ
- p_u el precio unitario
- τ la tasa de descuento o penalización aplicable
- Cad el costo de adquisición
- T el periodo entre pedidos
- La cantidad de repuestos requerido por intervención planificada y no planificada, q_c y q_v
- T_c el periodo entre intervenciones planificadas

3.2.4.3 Minimización del costo global con costo de falla

Ahora se extiende el modelo de Wilson y se agrega un costo de falla, c_f , asociado a las pérdidas de producción o cualquier acción que busque enmendar el daño causado por la falta del elemento. Supóngase T_w y q_w los óptimos estimados de acuerdo al modelo de Wilson. Con un nivel de servicio α , la demanda será satisfecha por un tiempo αT y no será satisfecha en $T_r = (1-\alpha) T$, tal como lo muestra la Ilustración 3-6 [6]

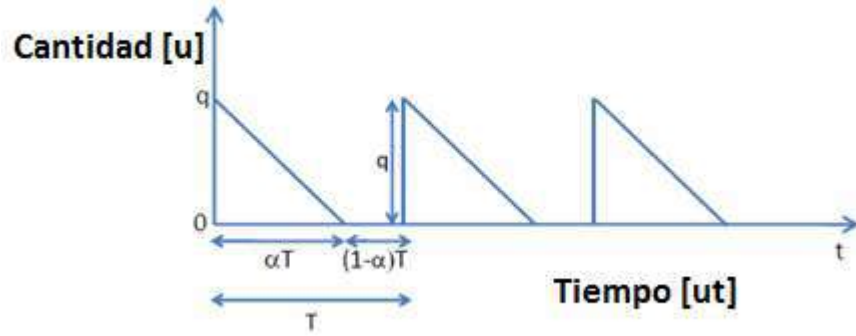


Ilustración 3-6 Situación con costo de falla por demora

Si la tasa de falla λ (consumo de repuesto) es constante, en T se consumen $\lambda T r$ repuestos y un nuevo pedido lleva el inventario a αq . El número promedio de repuestos en el periodo T es:

$$\frac{1}{2} \alpha^2 q \quad 3.21$$

Sea C_f la cantidad de demandas insatisfechas por el costo de la falla por unidad de tiempo, es decir:

$$C_f = \frac{1}{2} (1 - \alpha)^2 q c_f \quad 3.22$$

Así, el costo global toma la forma $C(q, \alpha)$. Derivando respecto a α e igualando a 0 llegamos a que:

$$\alpha^* = \frac{c_f}{c_f + p_u \tau} \quad 3.23$$

Derivando nuevamente, esta vez respecto de q y reemplazando α por α^* :

$$q^* = \sqrt{\frac{1}{\alpha^*} \frac{2\lambda C_{ad}}{p_u \tau}} \quad 3.24$$

Si los repuestos no son consumidos al llegar (la producción se detuvo), la bodega llega a un nivel q cuando llega el pedido. Realizando el mismo análisis, las variables óptimas son:

$$\alpha^* = 1 - \frac{p_u \tau}{2c_f} \quad 3.25$$

$$q^* = \sqrt{\frac{2\lambda C_{ad}}{\alpha p_u \tau + \frac{1}{2}(1-\alpha)^2 c_f}}$$

3.26

Entonces, las variables de entrada para este modelo son

- La tasa de falla $\lambda(t)$
- p_u el precio unitario
- la tasa de descuento τ
- C_{ad} el costo de adquisición
- C_f el costo de falla conocido

3.2.4.4 Compras agrupadas

Este modelo aplica cuando tenemos la posibilidad de obtener ahorros al agrupar en una orden de compra varios ítems. Tiene las siguientes condiciones [2]

- La tasa de demanda es conocida y constante; para todos los ítems
- para cualquier ítem: el nivel de inventario nunca llega a cero;
- no hay demoras en las entregas;
- El horizonte de análisis es infinito.
- Variables de entrada:
 - C_{ad} : costo por orden;
 - i : índices del ítem ($i = 1..I$);
 - C_{adi} : costo por orden asociado al ítem i ;
 - λ_i : demanda del ítem i por unidad de tiempo;
 - c_{ai} : costo de almacenamiento del ítem i por unidad de tiempo
- Variables:
 - T : intervalo básico de tiempo;
 - k_i : número (entero) de ciclos básicos entre dos pedidos de ítem i ,

En una forma gráfica el problema se presenta en la Ilustración 3-7.

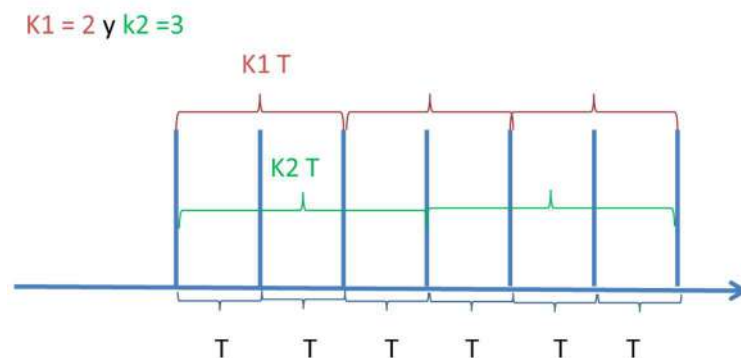


Ilustración 3-7 Ilustración grafica de compras agrupadas

El objetivo es minimizar el costo global, considerando que los pedidos se realizan cada $k_i T$ unidades de tiempo para cada elemento i y sus costos incluyen almacenamiento y el costo por cada orden. El costo global es el costo de un pedido más los costos asociados a los ítems dentro del mismo pedido y es de la forma

$$Cg = \frac{Cad}{T} + \sum_{i=1}^I \left(\frac{Cad_i}{k_i T} + \frac{1}{2} c_{ai} \lambda_i k_i T \right) \quad 3.27$$

Tal y como se muestra en la Ilustración 3-7, existirán casos en que durante un ciclo no se producirán compras (en la imagen, $2T$ y $5T$) por lo que no habrán costos asociados. Se introduce en tales casos un factor de corrección (Ecuación 3.28)

$$\Delta k = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \sum_{\{\alpha \subset \{1, \dots, n\} : |\alpha| = i\}} (MCM_{\alpha 1, \dots, k_{\alpha i}})^{-1} \quad 3.28$$

Cambiando así la expresión a:

$$Cg = \Delta(k) \frac{Cad}{T} + \sum_{i=1}^I \left(\frac{Cad_i}{k_i T} + \frac{1}{2} c_{ai} \lambda_i k_i T \right) \quad 3.29$$

Optimizando los k_i y T es posible encontrar los valores óptimos de Wilson [2]⁵

3.2.4.5 Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación

Este modelo está orientado a sacar provecho de los posibles ahorros que pudiesen generarse al consolidar repuestos entre varias bodegas (o compañías).

En el caso de la aeronáutica, una buena estrategia de gestión es el uso de repuestos modulares reparables, pues su reemplazo es rápido y permite mitigar efectos negativos en caso de una falla, pues se acorta el tiempo de reparación de la aeronave⁶. La disposición de estos elementos sin embargo genera el consecuente costo de almacenamiento⁷. Una alternativa a asumir el costo total de uno o más de dichos repuestos en un centro de costo único es realizar una consolidación de

⁵ En herramientas como Excel, es posible realizarlo con optimizadores como SOLVER. MATLAB tiene otros paquetes de optimización: de acuerdo a lo investigado, solo la función asociada a algoritmos genéticos puede manejar una optimización mixta, es decir, con valores enteros (discretos) y reales (continuos)

⁶ Un principio similar utilizan los camiones mineros modernos de alto tonelaje, donde sus motores y otros elementos complejos se manejan de forma modular y son reemplazados en caso de falla, mejorando la disponibilidad del equipo.

⁷ Según acota Pascual [2], haciendo referencia a MacDonald, las mayores oportunidades de ahorro para el negocio del transporte aéreo están en la reducción de inventario de repuestos y respondiendo a esa lógica, el valor de inventario por aeronave ha caído desde 3.75×10^6 a 3.35×10^6 USD/nave en el periodo 1995-2002

repuestos, considerando la disponibilidad del conjunto como objetivo y disminuyendo el nivel de inventario individual de las bodegas o compañías.

El modelo se centra en la cantidad de unidades requeridas para intervenciones correctivas en un programa de mantenimiento correctivo. Las unidades necesarias para el mantenimiento pueden ser obtenidas con un modelo EOQ, pues los requerimientos son conocidos y constantes [2].

La formulación inicial muestra las relaciones entre confiabilidad, tiempo medio de reposición, nivel de servicio, tamaño de la flota y el numero requerido de repuestos. En la aeronáutica, un indicador comúnmente utilizado es el Tiempo entre intervenciones no programadas (T_{bur}). Si se considera la tasa de uso del equipo η (unidades de tiempo de operación/unidades de tiempo calendario) es posible definir

$$T_{bur_{ct}} = \frac{T_{bur}}{\eta} ut \quad 3.30$$

La frecuencia de pedidos no programados recibidos es

$$\lambda = \frac{n_u}{T_{bur_{ct}}} u/ut \quad 3.31$$

Siendo n_u el número de componentes instalados en toda la flota participante. La demanda n_d esperada durante el tiempo transcurrido desde la extracción del componente del equipo hasta que queda nuevamente disponible para su uso (T_{at}) es

$$n_d = \lambda T_{at} = \frac{n_u}{T_{bur_{ct}}} T_{at} \quad u \quad 3.32$$

Es aceptado considerar que las fallas siguen una distribución de Poisson, en dicho caso la probabilidad de ocurrencia de una falla en T_{at} , siendo k el número de intervenciones correctivas es:

$$p(k) = \frac{e^{-\lambda T_{at}} \lambda T_{at}^k}{k!} \quad 3.33$$

Se requiere además extender la definición de nivel de servicio adecuado a la situación. El valor de $\alpha(k)$ es la probabilidad de satisfacer la demanda inmediatamente, dado que hay k repuestos para atender las fallas de puedan sufrir las n_u unidades en operación (3.34)

$$\alpha_k = \sum_{i=0}^k p(i) \quad 3.34$$

Si no existen unidades de repuesto ($k = 0$), la probabilidad de satisfacer la demanda es nula.

Con estos parámetros ya interrelacionados, es posible realizar análisis de sensibilidad sobre los factores y ver de qué forma los 4 factores (confiabilidad, tiempo medio de reposición, nivel de servicio, tamaño de la flota) van cambiando.

Para abarcar el concepto de pooling [15], es necesario definir dos tipos de niveles de servicio, uno global que abarque a todos los implicados y uno local, para cada bodega, base, o empresa⁸. la distribución de los repuestos se estima minimizando la varianza del servicio local.

La base donante puede ser escogida

- Aleatoriamente entre las que tienen inventario suficiente
- Las que tengan un tiempo de respuesta menor
- La que tenga el mayor inventario.

Las variables de entrada para el modelo son

- η la tasa de uso del equipo
- T_{bur} Tiempo entre intervenciones no programadas
- nu el número de componentes instalados en toda la flota participante
- T_{at} tiempo entre la falla y reposición del componente
- La cantidad de repuestos disponibles k (correspondiente al número de requerimientos).

3.2.4.6 Modelo para componentes a fallo seguro

El fallo seguro puede entenderse como la capacidad o la propiedad de un sistema de seguir funcionando adecuadamente en el caso de que uno o más de sus componentes llegasen a fallar. Si disminuye su calidad de funcionamiento, la disminución es proporcional a la gravedad de la avería, distinto al caso donde una falla menor pudiese colapsar totalmente el sistema.

En el caso de la aeronáutica, por ejemplo, la evolución de la técnica y los materiales ha permitido disminuir el peso de diversos sistemas⁹, de forma tal que los más críticos se han podido triplicar y cuadruplicar de modo que fallas simples o incluso dobles no debiesen afectar mayormente la seguridad de un vuelo.

En equipos terrestres, por otro lado, con el aumento de sus dimensiones y requerimientos de operación, algunos tienden a utilizar elementos en redundancia en sus equipos de soporte, particularmente en condiciones extremas, como los sistemas de refrigeración y protección de motores.

3.2.4.6.1 Redundancia de 2 componentes sin recambio de elemento operativo

En el trabajo de Dohi, Osahi y Kaio [15], se estudia el caso de un sistema compuesto con dos componentes redundantes, reemplazados ambos en cuanto uno de ellos sufra una falla (luego del

⁸ Cada uno de los actores debe tener considerado que la estrategia de pool de repuestos involucra un cierto riesgo asociado a no contar con el repuesto en la bodega propia y que consecuentemente, habrá una demora logística asociada al transporte del repuesto.

⁹ Esto principalmente debido a la inclusión del aluminio y sus aleaciones, además de aleaciones supe plásticas

respectivo *Lead time*). El trabajo de Rongbing Hu y Jun Xie [16] incorpora la posibilidad de que si, en algún ciclo alguna unidad no falla ésta sea reemplazada en el sistema, sin embargo, permanezca como repuesto disponible hasta el próximo ciclo, incorporándose entonces un costo por inventario (del elemento en bodega). Además, considera la disponibilidad como una restricción del problema de la optimización de costo global de mantenimiento. La optimización se logra utilizando algoritmos genéticos, dada la complejidad de los sistemas de ecuaciones

El modelo a continuación es el elaborado en [16] y sus supuestos son:

- Las distribuciones de los tiempos de vida del componente i ($i=1,2$), $F_i(t)$, se asumen arbitrarias, con una *densidad* $f_i(t)$ y *media* $1/\lambda_i$, con $f_i(t)$ diferenciable respecto de t .
- Se consideran los costos de una orden regular, una orden urgente, un quiebre de inventario, de almacenamiento y de rescate.
- Los costos de quiebre, almacenamiento y rescate se consideran lineales¹⁰
- Si ambos componentes fallan, se supone que el sistema falla.

Los parámetros del modelo son:

- Las distribuciones $F_i(t)$, sus densidades y medias
- El costo de falla (quiebre de inventario) por el periodo en que el sistema queda fuera de servicio $k_f (>0)$,
- El costo $k_i (>0)$ por unidad de tiempo del componente inventariado (stand by)
- El costo de rescate $k_s (<0)$, por la vida útil remanente del componente reemplazado que aún se encuentre operativo.
- Los costos de solicitud urgente $c_1 (>0)$ y normal $c_2 (>0)$
- Los tiempos de reposición (Lead Time) L_1 y L_2
- α , la restricción impuesta a la disponibilidad del sistema.
- Ca_1 y Ca_2 los costos de adquisición de ambas unidades (1 y 2)

De modo que el problema se presenta como:

$$\min C(t)$$

$$\begin{cases} A(T) \geq \alpha \\ T > 0 \end{cases}$$

3.35

Siendo $C(t)$ la función de costo global y $A(t)$ la disponibilidad del sistema. En este caso como la disponibilidad es una restricción, no se considera una penalización sobre el costo como en [16]

El tiempo de un ciclo se presenta de forma:

¹⁰ En particular para el costo de rescate es razonable pensar que este es proporcional a la vida útil residual del componente reemplazado

$$Ciclo(T) = \int_0^T (t + L_1) dF_1(t) + \int_T^\infty (T + L_{21}) dF_2(t)$$

3.36

Existen dos posibles inicios de ciclo distintos y excluyentes, se inicia el ciclo con o sin inventario (en bodega) del equipo en redundancia (se asume que el cambio es inmediato y solo se realiza cuando todos los componentes de reemplazo están presentes). Las probabilidades de uno y otro son:

$$P^1(T) = \int_0^{T+L_2} dF_1(t)$$

3.37

$$P^2(T) = \int_{T+L_2}^\infty dF_1(t) = 1 - P^1(T)$$

3.38

Existen 5 posibilidades de “primer inicio”

1. La unidad 1 (U1) falla antes de t_0 , inicia entonces unidad 2 (U2) y se realiza la solicitud por ambas de emergencia. U2 falla antes del tiempo de entrega y se reemplazan ambas luego de este. En este intervalo el sistema queda fuera de servicio.
2. U1 falla antes de t_0 y el sistema cambia a U2. Se realiza la solicitud de ambas. U2 no falla y se realiza el cambio de ambas unidades luego de L_1 .
3. U1 funciona hasta t_0 , se realiza entonces la solicitud normal por ambas unidades. Falla U1 durante L_2 y la operación pasa a U2. U2 falla antes de la entrega normal y el sistema queda fuera de servicio hasta la entrega de los repuestos.
4. U1 funciona hasta t_0 , se realiza entonces la solicitud normal por ambas unidades. Falla U1 durante L_2 y la operación pasa a U2. U2 no falla y ambas unidades son cambiadas luego de la entrega.
5. U1 funciona hasta t_0 , se realiza entonces la solicitud normal por ambas unidades. U1 sigue operativo hasta la entrega, se reemplazan ambas unidades y U2 permanece en inventario.

Para el “segundo inicio”, se presentan cinco casos similares, con la salvedad de que la solicitud es por una unidad en vez de dos como en el primer caso, dado que U2 se encuentra en inventario.

El costo de un ciclo en el primer inicio está dado por:

$$V^1(T) = \left[c_1 \times \int_0^T dF_1(t) + c_2 \times \int_T^\infty dF_1(t) \right] + [Ca_1 + Ca_2] + \left[ks_1 + ks_2 \times \int_0^{T+L_2} dF_1(t) \right]$$

3.39

Y para el segundo inicio:

$$V^2(T) = \left[c_1 \times \int_0^T dF_1(t) + c_2 \times \int_T^\infty dF_1(t) \right] + Ca_1 + ki_2 \\ \times \left[\int_0^T (t + L_1) dF_1(t) + \int_T^\infty (t + L_2) dF_1(t) \right] + \left[ks_1 + ks_2 \times \int_0^{T+L_2} dF_1(t) \right] \quad 3.40$$

De modo que el costo esperado $V(T)$ es:

$$V(T) = P^1(T) \times V^1(T) + P^2(T) \times V^2(T) \quad 3.41$$

Las medidas del desempeño se detallan en la Tabla 3-2.

Las relaciones que definen la optimización son:

$$C(T) = \frac{V(T)}{Cyc(T)} \quad 3.42$$

$$A(T) = \frac{M(T)}{Cyc(T)} \quad 3.43$$

Tabla 3-2: Medidas de desempeño para dos inicializaciones en distintos casos

Caso	Probabilidad	Tiempo disponible del sistema	Tiempo de permanencia de la unidad 2, en la segunda inicialización
a	$\int_0^T \int_0^{L_E} dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_0^T \int_0^{L_E} (t + u) dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_0^T (T + L_E) dF_1(t)$
b	$\int_0^T \int_{L_E}^\infty dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_0^T \int_{L_E}^\infty (t + L_E) dF_2(u) dF_1(t)$	
c	$\int_T^{T+L_N} \int_0^{T+L_N-t} dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_0^T \int_{L_E}^\infty (t + u) dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_T^{T+L_N} (T + L_N) dF_1(t)$
d	$\int_T^{T+L_N} \int_{T+L_N-t}^\infty dF_2(u) dF_1(t)$	$\int_T^{T+L_N} \int_{T+L_N-t}^\infty (T + L_N) dF_2(u) dF_1(t)$	
e	$\int_{T+L_N}^\infty t dF_1(t)$	$\int_{T+L_N}^\infty (T + L_N) dF_1(t)$	$\int_{T+L_N}^\infty (T + L_N) dF_1(t)$

Fuente Rongbing Hu, Jun Xie [17]

3.2.4.7 Inventario de componentes críticos de baja demanda

3.2.4.7.1 Componentes con demanda aleatoria

El método propuesto en [17] utiliza aproximaciones numéricas para definir el óptimo en un sistema de inventario de la forma $\{S-1, S\}$ (esto es, se repone un ítem en cuanto se solicita), con una secuencia de demandas de tipo Poisson. Existe un costo de almacenamiento para cada ítem H , un tiempo de reposición arbitrario y un costo adicional para las solicitudes de emergencia.

Dado un nivel de stock s^* , se generan demandas aleatorias con una tasa λ por unidad de tiempo. Con cada demanda se solicita un reemplazo y el tiempo hasta la entrega tiene una distribución con media τ . Se incurre en un costo L (H puede ser definido como una fracción de L) de penalización cuando se incumple con la demanda por solicitudes de emergencia, o por pérdida debido a quiebre de inventario.

La solución se busca minimizando el costo medio por unidad de tiempo, usando fórmulas de estado estacionario de teoría de colas: si s es escogido como el nivel de stock deseado en un almacén particular, entonces el proceso es análogo a un sistema de colas con s servidores, demandas tipo Poisson con una tasa λ y tiempos de servicio independientes distribuidos arbitrariamente con media τ . Dado que los quiebres se manejan con pedidos de emergencia, la fila no tiene reserva [17]. Las probabilidades de equilibrio para el sistema son:

$$Q_s(j) = P\{j \text{ unidades en stock} | \text{stock deseado} = s\} \\ = \frac{\lambda \tau^{s-j}}{(s-j)!} / \sum_{i=0}^s \frac{(\lambda \tau)^i}{i!}; j = 0, 1, 2, \dots, s. \quad 3.44$$

La probabilidad de stock 0 dado el nivel deseado s es:

$$Q_s(0) = P(0) \quad 3.45$$

El costo por unidad de tiempo debido a quiebres es $\lambda L p(s)$. El número esperado de unidades en stock es:

$$\sum_{j=1}^s j Q_s(j) = s - [1 - p(s)] \lambda \tau \quad 3.46$$

De aquí, el costo total esperado por unidad de tiempo en estado estacionario, dado el nivel de inventario deseado s es:

$$c(s) = H[s - (1 - p(s))\lambda\tau] + \lambda L p(s) \quad 3.47$$

Dado que se asume que todas las demandas que no son satisfechas por el inventario se responden con solicitudes de emergencia, es posible omitir de la última ecuación todo costo de compra asociado con reabastecimiento, porque estos términos dependerán solo del número de

demandas que lleguen y no de la variable de decisión s [17]. Eliminando entonces el termino constante $-H\lambda\tau$. El problema se transforma entonces en minimizar la función

$$\begin{aligned} \min c(s) &= Hs - p(s)\lambda\tau \left[H + \frac{L}{\tau} \right] \\ s &= 0,1,2 \dots \end{aligned} \quad 3.48$$

Se demuestra en [17] que $c(s)$ tiene un único mínimo relativo s^* y que para valores suficientemente grandes de $\lambda\tau$, tiene la formula aproximada:

$$s^* = \lambda\tau + \alpha\sqrt{\lambda\tau} \quad 3.49$$

Donde:

$$\alpha = \left[2 \log \frac{\alpha(1 + L/(H\tau))^{1/2}}{\sqrt{2\pi}} \right] \quad 3.50$$

Aunque α es un término implícito, se le puede determinar sustituyendo con un aproximado:

$$\alpha = [2 \log(1 + L/(H\tau))]^{1/2} \quad 3.51$$

Con la formula aproximada, s^* depende solo de $\lambda\tau$ y $L/(H\tau)$. El termino $\alpha\sqrt{\lambda\tau}$ actúa como un inventario de seguridad. Es interesante ver la sensibilidad de los resultados del modelo frente a τ , que tiene que ver con el tiempo de despacho (Lead Time).

Las variables de entrada para este modelo son, en consecuencia:

- La tasa λ y la media τ
- Los costos L y H

3.2.4.7.2 Componentes con demanda intermitente

Uno de los elementos que caracteriza una demanda intermitente, es que pueden existir períodos extensos durante los cuales no existe solicitud alguna, para luego pasar a períodos puntuales donde el nivel de requerimientos se eleva bruscamente. Tal es el caso de ciertos componentes o equipos, particularmente aquellos cuyo valor es elevado.

El método de Croston es bastante utilizado para lidiar con este tipo de situaciones y han surgido diversas variaciones del mismo, buscando mejorar la precisión de sus predicciones. El método tiene dos pasos fundamentales para trabajar la demanda histórica [18] [19], los cuales son

- Tomar todos aquellos períodos donde el número de solicitudes sean no nulas y sobre esta nueva serie, realizar una suavización exponencial para estimar la demanda media.
- Considerando lo anterior, realizar nuevamente una suavización exponencial, esta vez sobre la serie que se forma al considerar los tiempos entre períodos de demanda no nula Modelar los periodos entre demandas)

Sean:

- $Y(t)$ la estimación del tamaño medio de las demandas no nulas
- $P(t)$ la estimación del intervalo medio entre demandas no nulas.
- Q el intervalo de tiempo (entero) desde la última demanda no nula.
- $X(t)$, la demanda en el período t
- α un factor de suavizado, típicamente entre 0 y 1.
- $X^{\wedge}(t)$ la predicción de la demanda en el período t
- β un factor de suavizado, típicamente entre 0 y 1
- t_n periodo donde ocurre la última demanda
- t_{n-1} periodo donde ocurre la demanda anterior
- $(t_n - t_{n-1})$ intervalo entre demandas
- X_n demanda en el período n
- T número de períodos
- N número de ocasiones con demandas , $N \leq T$

La construcción de la serie de Croston funciona como se muestra en las ecuaciones 3.52 a 3.58

Si $X(t) = 0$, entonces:

$$Y(t) = Y(t - 1) \quad 3.52$$

$$P(t) = P(t - 1) \quad 3.53$$

$$Q = Q + 1 \quad 3.54$$

Si $X(t) \neq 0$, entonces:

$$Y(t) = \alpha X(t) + (1 - \alpha)Y(t - 1) \quad 3.55$$

$$P(t) = \beta Q + (1 - \beta)P(t - 1) \quad 3.56$$

$$Q = 1 \quad 3.57$$

Con esta serie de datos construida, la demanda media por intervalo de tiempo se estima como:

$$M(t) = \frac{Y(t)}{P(t)}$$

3.58

A diferencia de los modelos anteriormente presentados, el modelo de Croston y sus modificaciones requieren directamente el historial de demandas (en los otros se requiere la distribución de la demanda o los parámetros que la caracterizan), junto con los parámetros de suavización los cuales deben estar entre 0 y 1. De estos parámetros depende el grado de ajuste del modelo.

Las variables de entrada del modelo son:

- El historial completo de pedidos del repuesto o componente
- La variable de suavización α
- La variable de suavización β

4 Desarrollo y Resultados

El desarrollo del trabajo contempla la comparación de datos de demanda real contra los posibles resultados entregados por los modelos a implementar, descritos en 3.2.3.3. Dado que dichos modelos tienen ciertos requerimientos que deben ser verificados previamente, es necesario procesar previamente la información suministrada y seleccionar aquellos datos que sean efectivamente útiles para el estudio.

A continuación, se describen las características de la información recopilada, como fue procesada para luego ser incorporada a los modelos

4.1 Descripción de la información recopilada.

Los datos obtenidos corresponden a los movimientos de bodega (solicitudes de repuestos y servicios) de una flota de camiones de transporte de mineral no metálico, para el período 2013-2014 provistos por BSM. Las características de dicha flota son, en general:

- Marca: Mercedes Benz
- Modelos: Actross 3348 y Actross 3350
- Flota: 47 camiones
- Motor: V8 16 litros (3350) V6 13 litros (3348)
- Transmisión: Automática G330 Powershift
- Carga Máxima: 90 toneladas
- Configuración: 8x4 doble batea
- Circuito 20 kilómetros, sinuoso, con pendientes de hasta 30°.
- Faena: labores de transporte de mineral no metálico (sal) en las cercanías de Iquique.
- La flota cuenta con equipos de diversa antigüedad.
- Disponibilidad Pactada: 85%

La base de datos suministrada cuenta con la siguiente información:

- Fechas de emisión y recepción de los pedidos
- Identificación de los equipos asociados a cada pedido.
- Costo unitario de los repuestos utilizados
- Categorización de criticidad de los pedidos según la condición de operación (normal, urgente, etc.)
- Detalle del pedido
- Cantidades solicitadas por pedido
- Proveedores
- Personal de compras involucrado.

Con tal información, es posible estimar las frecuencias de los pedidos y los de demora en la entrega, con los siguientes supuestos y consideraciones:

- La emisión de un pedido es inmediata, es decir, el tiempo entre la ocurrencia de la falla y la solicitud del repuesto es despreciable.
- Cada pedido no tiene asociada necesariamente una orden de trabajo o alguna información similar que permita establecer inequívocamente la correlación entre la emisión de un pedido específico y la falla que lo origina.
- Por lo anterior, no es posible calcular directamente los tiempos de reparación asociados a cada falla o solicitud.
- Existe la probabilidad de que las fechas indicadas no sean exactamente las de ocurrencia de los eventos, en particular la recepción de repuestos, por desfases en los procesos administrativos de BSM.
- No es posible establecer la correlación entre una solicitud de un repuesto y la solicitud de reparación de un mismo elemento (de forma de consolidar ambos casos como un tipo de falla), puesto que no existe completa uniformidad en las glosas utilizadas en los pedidos.

4.1.1 Caracterización de los pedidos

De acuerdo a la información entregada es posible, de forma preliminar, categorizar el nivel de criticidad de los pedidos (no de los repuestos) de la forma que se describe en la Ilustración 4-1

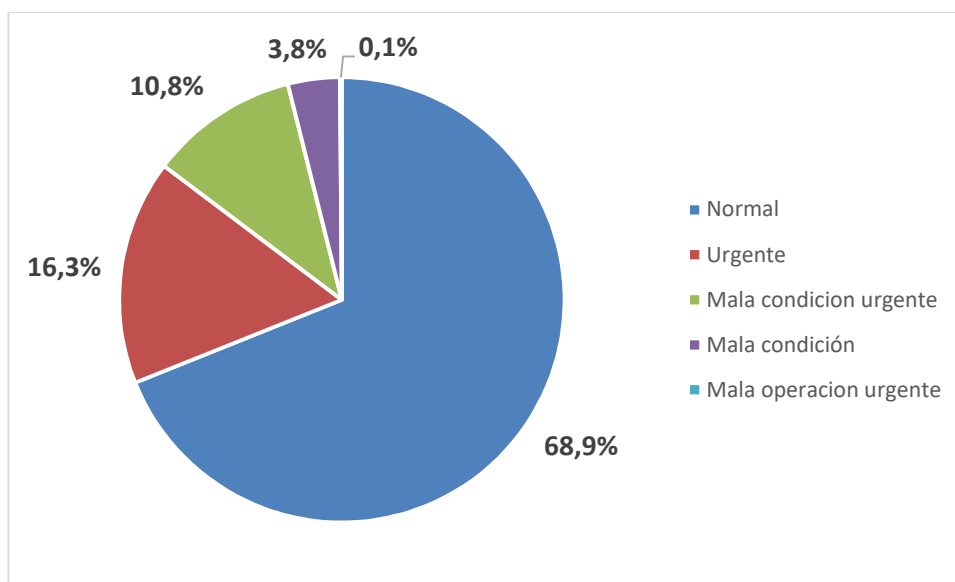


Ilustración 4-1 Categorización de los pedidos, de acuerdo a BSM. Elaboración propia

De la información se desprende que aproximadamente el 85% de las solicitudes tiene el carácter urgente y tan sólo el 10% puede considerarse normal. Ante la consulta a los encargados, atribuyen este fenómeno a las condiciones agresivas de funcionamiento de los equipos (sobrecarga, pendientes agudas). En segundo orden, existe la posibilidad una mala categorización de las solicitudes por parte del personal de faena.

Del universo total de solicitudes, el 84% corresponde a repuestos, neumáticos o reparaciones (servicios de reparación específicos encomendados a terceros fuera de la faena), según se aprecia en la Ilustración 4-2. Esto es coincidente con una faena con condición agresiva, tal como indicaran

los encargados, donde la mayoría de los costos están asociados a mantenimiento correctivo más que a preventivo (los costos preventivos se asocian principalmente a filtros, aceites, etc.). El ítem más importante es el de repuestos, con un 42% de los costos totales. Se considera entonces que es en esta cuenta donde se encuentran las mayores posibilidades de mejora y además, el mayor volumen de información disponible por lo que será dicha cuenta la que habrá de usarse como base para encontrar candidatos a utilizar en los modelos seleccionados.

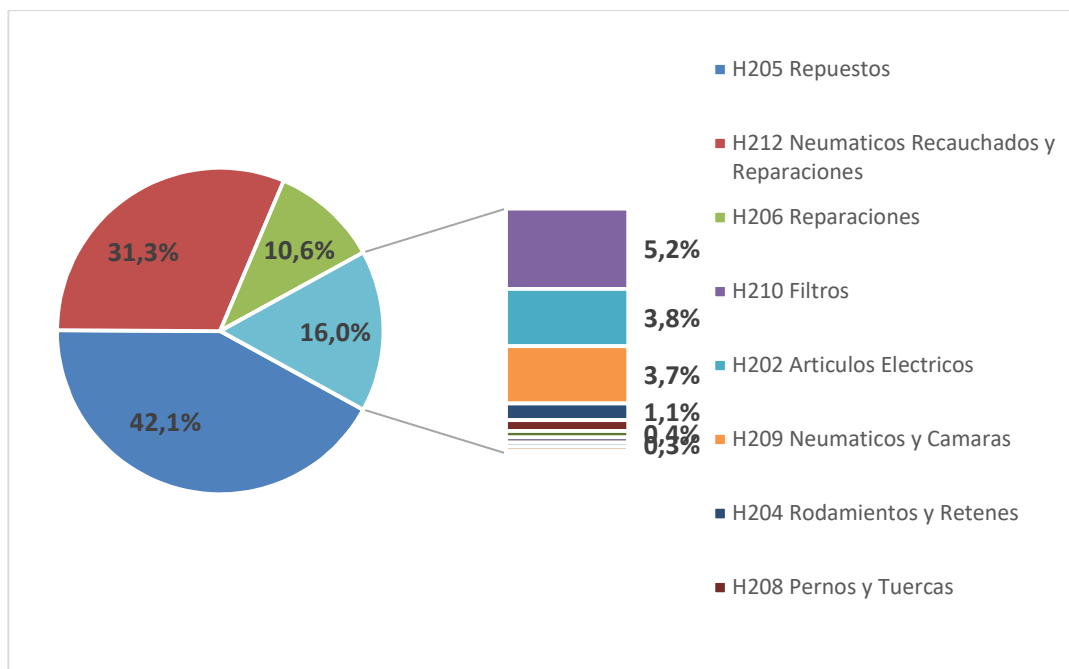


Ilustración 4-2: Tipos de solicitudes, de acuerdo a la información suministrada por la faena. Elaboración propia

4.1.2 Análisis de Pareto

Para acotar la cantidad de pedidos a estudiar con un sentido de priorización, se decide realizar un análisis de Pareto sobre las solicitudes asociadas a la cuenta de Reparaciones (H205 en la base de datos), de forma tal de establecer de forma preliminar un grupo crítico de elementos, tomando como parámetro de evaluación el costo asociado a los repuestos.

Previo a ello, se realizó un trabajo de “limpieza de la información”, dado que se detectó que en muchos casos, existía doble creación de elementos en la base, dadas ciertas diferencias de escritura en las glosas de los pedidos (por ejemplo, *manguera flexible de 1x3* vs *manguera flexible de 1x3m* vs *manguera flexible de 1x3 M*). Además, se detectó la presencia de solicitudes de elementos para equipos que no pertenecían a la flota definida para el estudio (camionetas, cargadores, tracto camiones marca Volvo). Tales elementos fueron eliminados de la base, dejando como resultado un conjunto de 997 elementos de un universo total de 1945 repuestos solicitados, en un período de 24 meses.

Como resultado del análisis (Ilustración 4-3), es posible afirmar que de los 997 elementos, 168 de ellos (es decir, un 17% aproximadamente del total) abarcan prácticamente el 80% de los costos, según se aprecia en la Ilustración 4-3. Para efectos de la priorización, a este grupo se le considerará preliminarmente como “críticos”

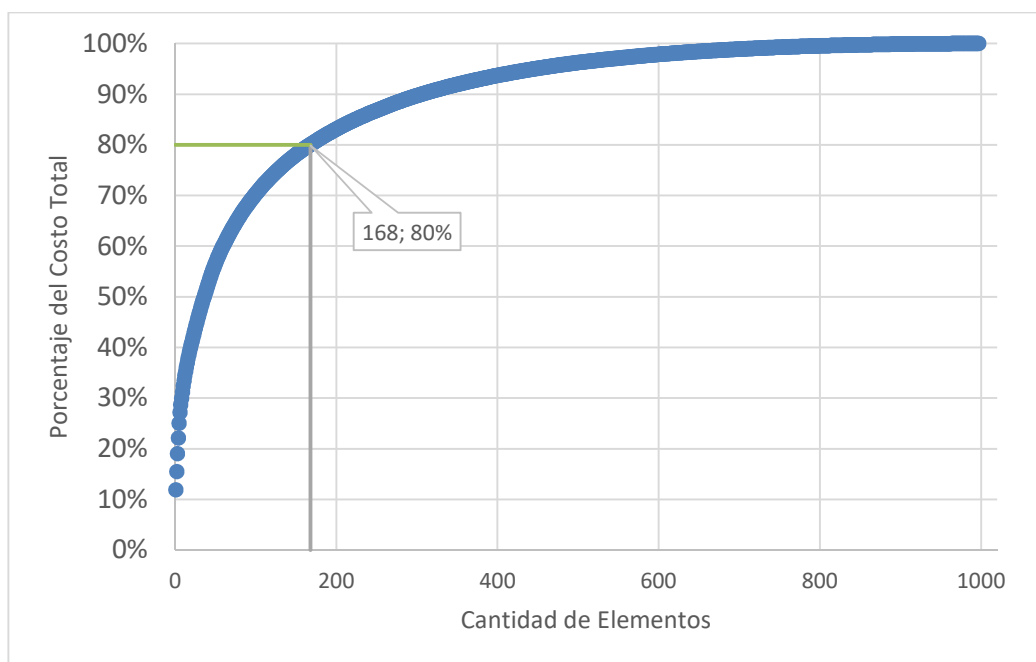


Ilustración 4-3: Análisis de Pareto sobre los gastos en Repuestos, el 17% de ellos abarca el 80% del total de los costos. Fuente: elaboración propia a partir de la BDD suministrada

4.1.3 Diagrama de Nelson-Aalen de la flota en estudio

En consideración a la diferencia de edades (horas de operación) de los equipos de la flota, se realiza un diagrama de Nelson – Aalen para determinar si existen comportamientos disímiles entre ellos en términos de su tasa de falla (asumiendo 1 falla = pedido) y si existen fenómenos exógenos detectables en las curvas de comportamiento. Como base para su construcción, se utiliza la suma acumulada de pedidos asociados a cada camión y la fecha en la cual fueron efectuados, con la metodología mencionada en 3.2.3.2. Para individualizar cada equipo, se le ha asignado una sigla del tipo “CN-XXXX”, siendo las X un código numérico aportado por BSM.

Considerando el diagrama resultante que se aprecia en la Ilustración 4-4, es posible distinguir tres “zonas” de posibles comportamientos disímiles en la flota con base en las pendientes observadas y su situación temporal. Luego de una serie de consultas y mayor investigación se pudo concluir que dicha diferencia se debe a que existen tres sub grupos de equipos en la flota: aquellos en cuya operación inicia antes de enero de 2013 (Grupo I), aquellos que ingresan a operación en enero de 2013 (Grupo II) y aquellos que entran entre enero y junio de 2014 (Grupo III):

- El primer grupo (Grupo I) corresponde a camiones que ingresan a la faena con una configuración estándar de fábrica: en vista de los resultados obtenidos y los problemas operacionales de los equipos (sucesivas fallas de motor y caja de cambio), dichos equipos fueron modificados agregándose dos nuevos sistemas de frenos y compensación para la carga, de forma tal de mejorar el desempeño en las bajadas en pendiente a plena carga.

- El segundo grupo (desde ahora, Grupo II) corresponde a camiones que ingresan a operación con las modificaciones realizadas al grupo I ya incorporadas, con miras a obtener un mejor desempeño
- El tercer grupo (Grupo III), corresponde a camiones con una configuración completamente distinta a los Grupos I y II, pues pasan de la configuración bitrén a batea simple.

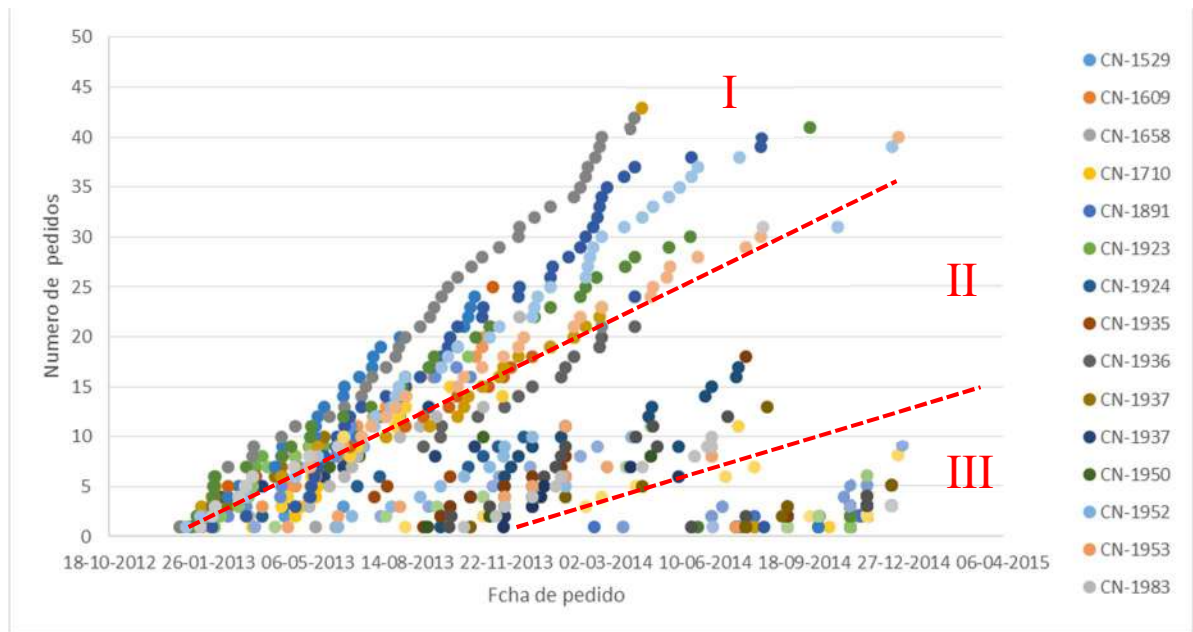


Ilustración 4-4: Diagrama de Nelson Aalen con base en los pedidos de repuestos. Elaboración propia a partir de datos suministrados

Considerando que los equipos del Grupo III tienen una configuración y comportamiento distintos a los observados para los Grupos I y II (corroborado con la faena), no se les considerará en lo restante del estudio, pues coincidentemente el volumen de información que aportan es muy baja y dispersa pues, al tratarse de equipos nuevos, presentan pocas fallas comparados a los otros dos grupos. Además, los repuestos que este grupo requiere no son los mismos, según indica la faena.

El DNA individualizado del Grupo I (Ilustración 4-5), permite identificar un cambio brusco en la curvatura de las pendientes en torno a Abril de 2014, esto coincide con el ingreso a la operación del 100% del grupo 2. Una posibilidad es que los equipos del Grupo I hayan tenido en este lapso mayor tiempo disponible para realizar reparaciones postergadas, aumentando la cantidad de pedidos, o también que se hayan generado una mayor cantidad de fallas operacionales por errores de los operadores al trabajar simultáneamente con máquinas de edades distintas. Sin embargo, cualquiera sea el motivo, Marzo de 2014 corresponde a un punto de inflexión del comportamiento de las maquinas del grupo en cuestión.

El DNA individualizado del grupo II presenta una pendiente más elevada respecto al grupo I, pero a la vez menos denso. Una de las posibles causas es que los pedidos tienden a asentarse a partir de mayo del 2014, probablemente por el ajuste de los equipos al requerimiento de faena. El Diagrama puede apreciarse en la Ilustración 4-6

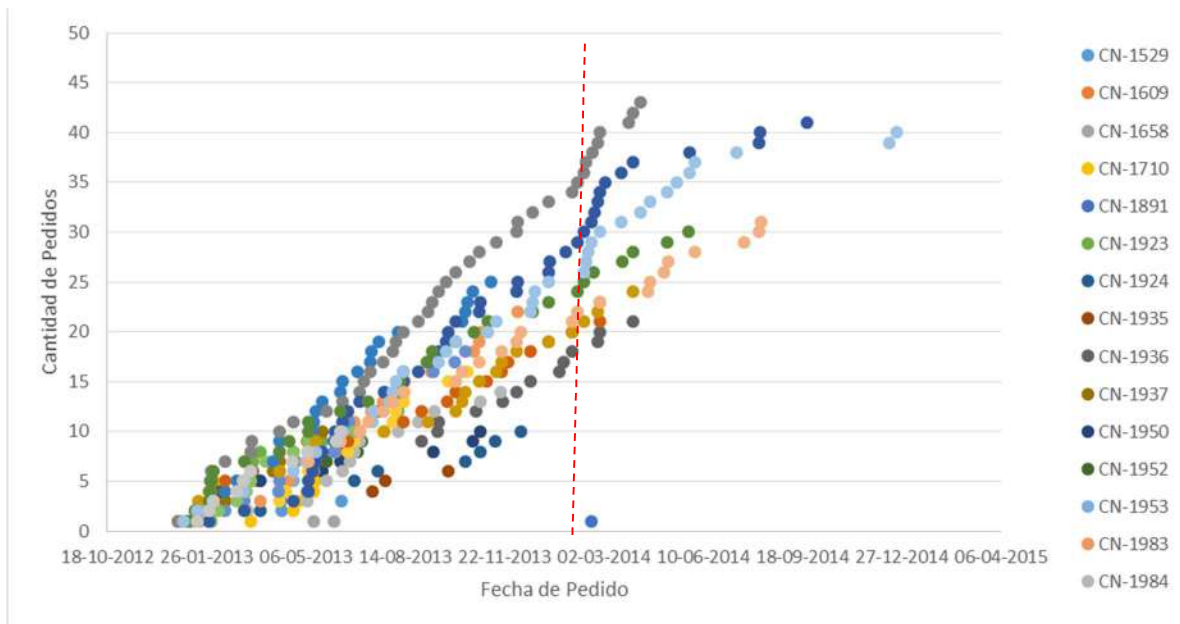


Ilustración 4-5: Diagrama de Nelson Aalen, Grupo I. Elaboración propia a partir de los datos suministrados

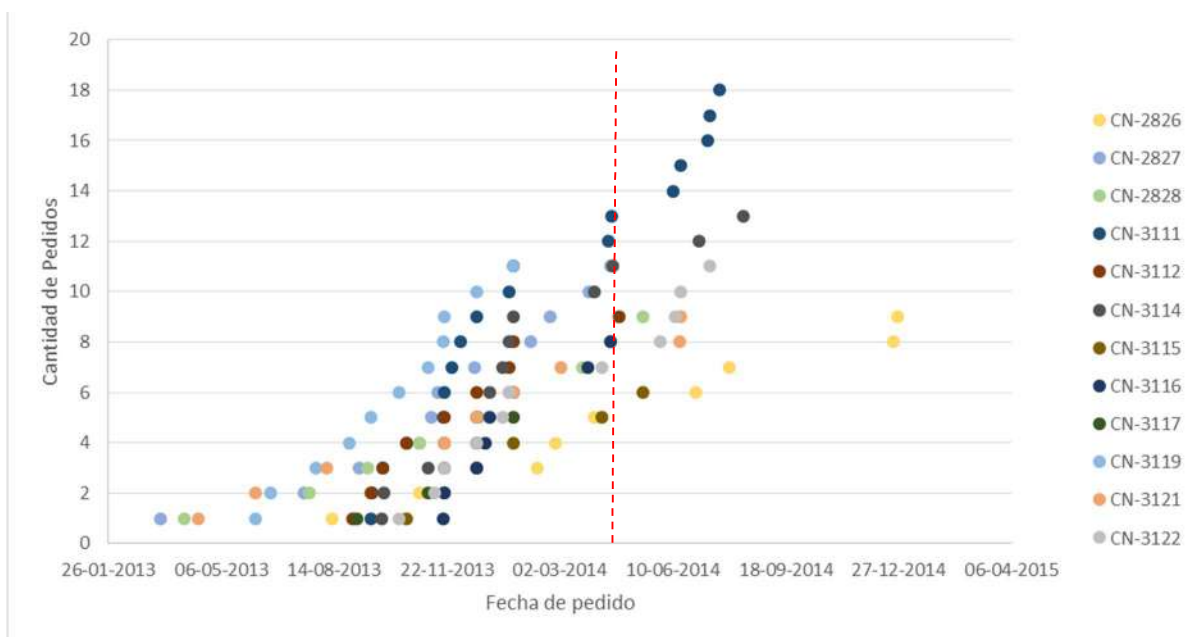


Ilustración 4-6 Diagrama de Nelson Aalen, Grupo II. Elaboración propia a partir de los datos suministrados

Considerando estos espacios de tiempo, es correcto intentar realizar el análisis de forma similar, pero esta vez, por componente, dado que al realizar el análisis por equipo existe la probabilidad de que distintos modos de falla se encuentren superpuestos.

4.1.4 Diagrama de Nelson-Aalen modificado de los sistemas

Para realizar el análisis, primero se asocia cada repuesto a un sistema primario del equipo, en concordancia con las sugerencias de los mantenedores de faena y las pautas de mantenimiento de los equipos. Dichos sistemas son se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Sistemas identificados en los equipos.

Nº	Nombre
1	Motor
2	Transmisión
3	Periféricos
4	Hidráulico
5	Frenos
6	Árbol de transmisión
7	Refrigeración
8	Estructura
9	Eléctrico
10	Neumático (aire)

Fuente: Elaboración propia en base a pautas de mantenimiento

Una vez realizada esta asociación se procede a elaborar los DNAM de los sistemas, según las premisas indicadas en 3.2.3.2.2, con las siguientes salvedades.

- Al no contar exactamente con el tiempo fuera de servicio de los equipos por cada intervención, se utiliza en la dimensión del tiempo (diámetro de las burbujas) *el tiempo de reposición (Lead Time)* del pedido. Si bien no es exactamente el mismo, es un componente importante. Es decir, a falta de mayor información, se asume que el tiempo fuera de servicio es muy parecido al Lead Time.
- Debido a que no es posible saber con precisión si el pedido fue o no planificado, se asume la misma equivalencia con respecto a la categorización de “urgente” y “normal” atribuida a los pedidos. Es decir, se asume que un pedido catalogado “urgente” corresponde a una intervención *no planificada*.
- El hecho de que si el pedido requiere o no que el equipo continúe operativo, se asocia al sistema involucrado: por ejemplo, el cambio de un repuesto del sistema Motor (por ejemplo un cigüeñal) necesariamente requiere la salida de operación del camión. La solicitud de cambio de un espejo retrovisor (definido como perteneciente al sistema de Periféricos), no necesariamente constituye una salida de operación del equipo.

Conviene notar que la perspectiva utilizada permite evaluar los requerimientos desde el punto de vista de la bodega, más que del equipo mantenedor de taller.

4.1.4.1 Diagramas de Nelson-Aalen modificado, Grupo I

Los DNAM modificados, por sistema, del Grupo I son los siguientes:



Ilustración 4-7: DNAM Motor, Grupo I. Elaboración Propia

Es posible apreciar en la Ilustración 4-7 un período de aumento significativo en la demora de las entregas de los pedidos entre septiembre del 2013 y noviembre del mismo año, precedidas de diversos pedidos no planificados y un leve cambio en la tendencia de la curva entre febrero y marzo del 2014, esto último concordante con los resultados del DNA de la sección 3.2.3.2.1. Se aprecia que, en vista de que el tiempo de demora en la entrega corresponde al diámetro de las burbujas, si éste es mayor que el tiempo entre pedidos.

Es necesario destacar también que existen burbujas superpuestas: esto se produce pues en el gráfico se encuentran consideradas todas las demandas de la flota asociadas al mismo sistema, lo que no ocurre en el modelo original. Una consecuencia de aquello es que mediante un análisis exhaustivo de estos casos, es posible identificar en que períodos se afectó directamente la disponibilidad del contrato, al existir más de un equipo detenido por falta de repuestos. Tal es el caso que se aprecia en agosto del 2013, donde al menos 5 equipos se encontraban simultáneamente fuera de servicio, cuando por contrato BSM tenía un compromiso contractual de no tener más de 3 equipos fuera de ruta de forma simultánea lo que seguramente, significó multas de parte de la empresa mandante

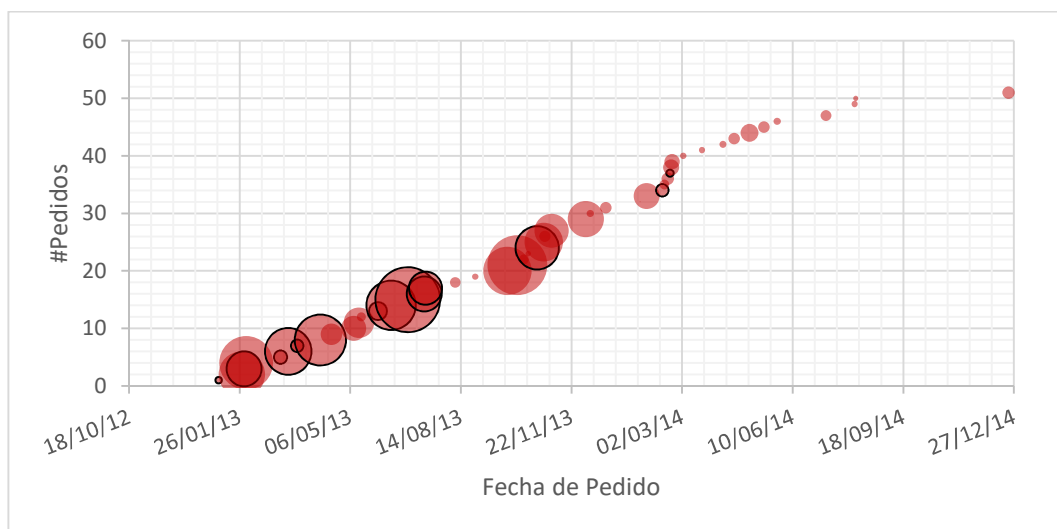


Ilustración 4-8 DNAM Transmisión Grupo I. Elaboración Propia

Nuevamente, según muestra la Ilustración 4-8, existe un marcado cambio en la tendencia a partir de marzo de 2014. También se muestra un cambio importante en los tiempos de reposición: en una revisión profunda del historial, esto va de la mano con una disminución de los pedidos asociados a piezas mayores de la caja de transmisión¹¹. Coincide también con que la totalidad de la flota que constituye el Grupo II se encuentra para esa fecha en operación (marzo 2014). Nuevamente, además, se aprecia superposición de fallas (pedidos) no planificados que significan detención en agosto del 2013: esto puede tener relación con que algunas fallas de sistemas distintos pueden estar relacionadas o ser descubiertas durante la reparación de alguna de ellas (mantenimiento oportunista), lo que ocurre por ejemplo con las fallas de motor y transmisión.

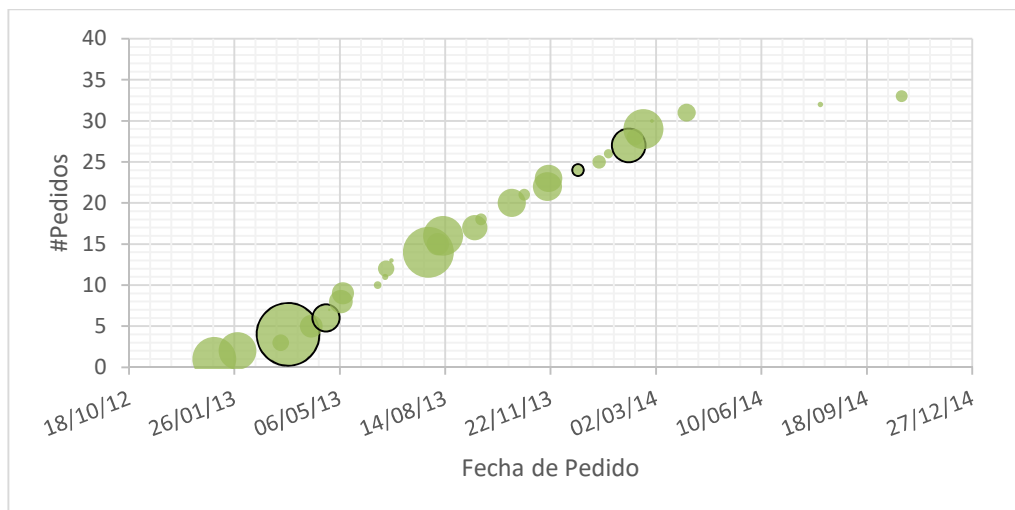


Ilustración 4-9 DNAM Elementos Periféricos Grupo I. Elaboración Propia

Pese a la falta información hacia el final del período, se repite nuevamente el cambio de tendencia apreciado en otros sistemas según se aprecia en la Ilustración 4-9. La estabilidad en el tiempo de reposición da cuenta también de lo regular de los pedidos, que en su mayoría son repuestos de fácil acceso en el mercado local, no así como los componentes mayores.



Ilustración 4-10 DNAM Sistema Hidráulico Grupo I. Elaboración Propia

¹¹ Algunos de estos repuestos fueron conseguidos en desarmaduras lo que aumentó su tiempo de reemplazo, priorizando el costo Ref: Mantenimiento de faena.

El diagrama obtenido en la Ilustración 4-10 es consistente con los resultados del sistema motor y transmisión, cambiando la tendencia a partir de marzo del 2014. Del mismo modo el tiempo de reposición es mucho más alto a fines del 2103 que a partir del segundo trimestre del 2014. Se observa nuevamente superposición de burbujas en agosto del 2013, lo que ya nos da un indicio de una tendencia, al haber múltiples componentes en múltiples equipos comprometidos del al mismo tiempo. Puede incluso deberse a siniestros o fallas operacionales no relacionadas con la condición mecánica de los equipos.

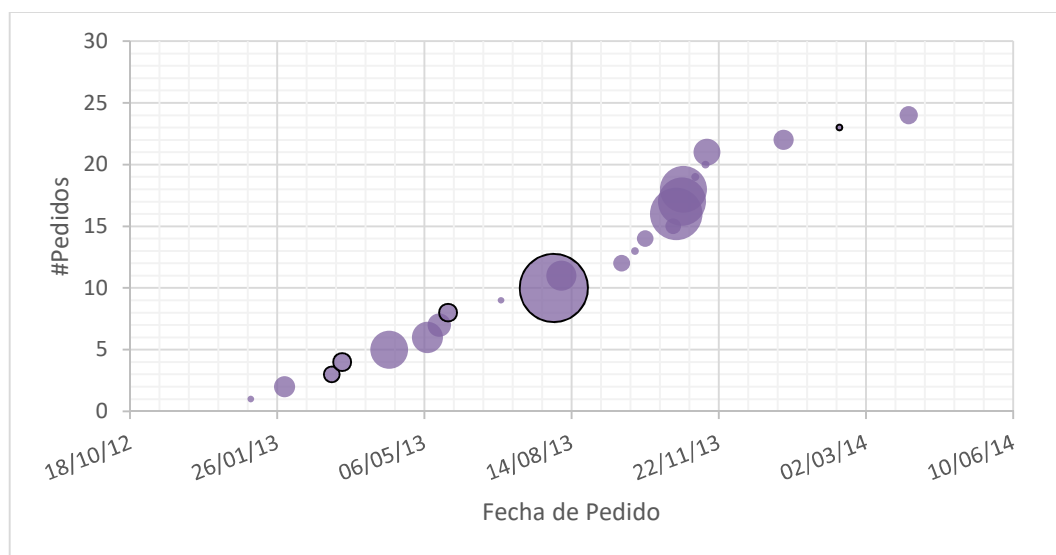


Ilustración 4-11 DNAM Sistema Frenos Grupo I. Elaboración Propia

En este caso, se aprecia un cambio en la curvatura hacia fines del año 2013, según se muestra en la Ilustración 4-11. La densa zona de noviembre de 2013, podría indicar un período de fallas o siniestros recurrentes a nivel de flota, particularmente por los sistemas involucrados (motor, transmisión, frenos, hidráulico), sin embargo, sin el apoyo de órdenes de trabajo, no es posible corroborar a ciencia cierta dicha hipótesis.

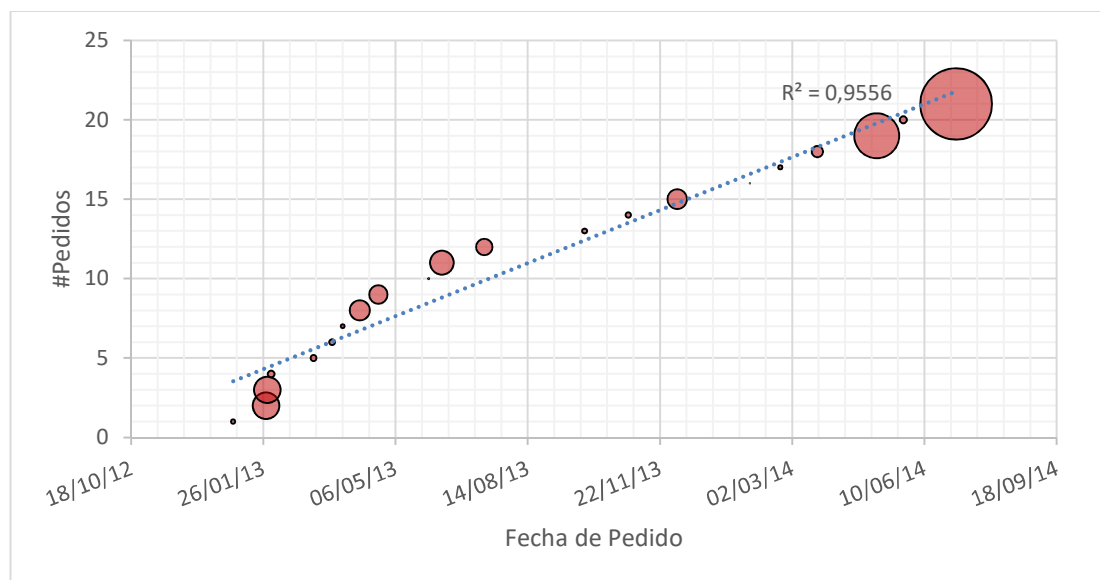


Ilustración 4-12 DNAM Árbol de Transmisión, Grupo I. Elaboración Propia

De acuerdo a la Ilustración 4-12, podría existir un sutil cambio de tendencia a partir de noviembre, sin embargo, la curva es prácticamente lineal. Destaca sin embargo el aumento en los tiempos de reposición hacia finales del 2014¹².

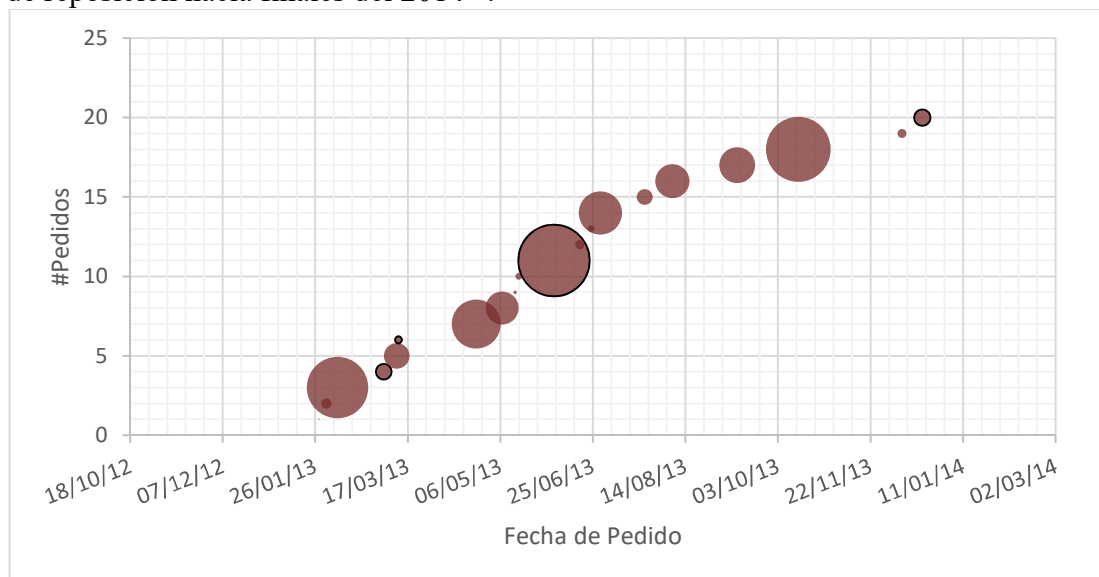


Ilustración 4-13 DNAM Refrigeración, Grupo I. Elaboración Propia

La tendencia de las solicitudes es prácticamente lineal y no se extienden más allá del primer trimestre del año 2014, como se aprecia en la Ilustración 4-13. Existe una gran variabilidad en los tiempos de demora: en revisión de la base, es consistente con la variabilidad en los proveedores de insumos.

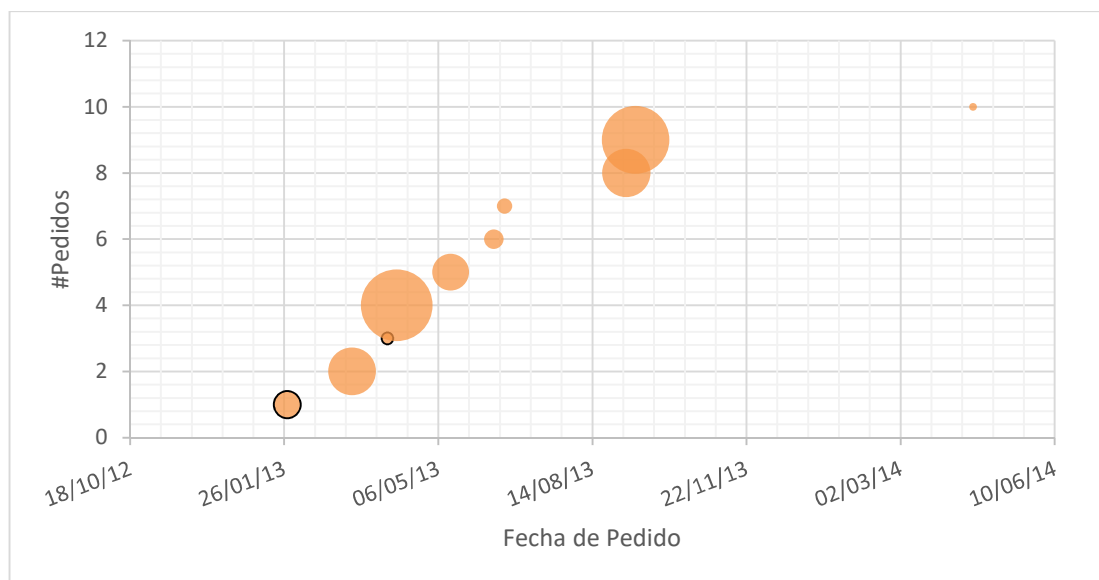


Ilustración 4-14 DNAM Estructura, Grupo I. Elaboración Propia

La cantidad de pedidos, mostrados en la Ilustración 4-14 es relativamente menor a la de otros sistemas como para extraer conclusiones profundas. Si es posible afirmar que los sistemas “menores” tienen una tendencia familiar, no produciéndose gran volumen de pedidos durante el 2014

¹² Ante la consulta, tal demora se debió a un asunto puntual administrativo pues el equipo se encontraba ya fuera de servicio.

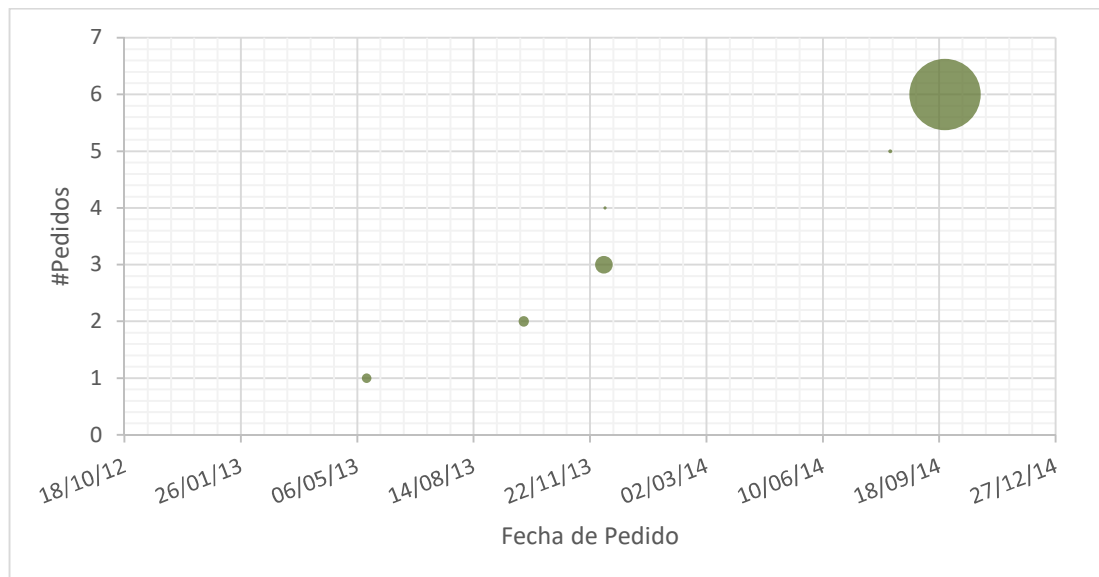


Ilustración 4-15 DNAM Sistema eléctrico, Grupo I. Elaboración Propia

Los datos mostrados en la Ilustración 4-15 son demasiado escasos como para extraer grandes conclusiones. El personal de faena indica que el sistema eléctrico de los camiones falla muy poco y que los insumos se compran en grandes volúmenes, no siempre asociados a un camión, lo que puede explicar la falta de información de pedidos asociados a los equipos del Grupo I

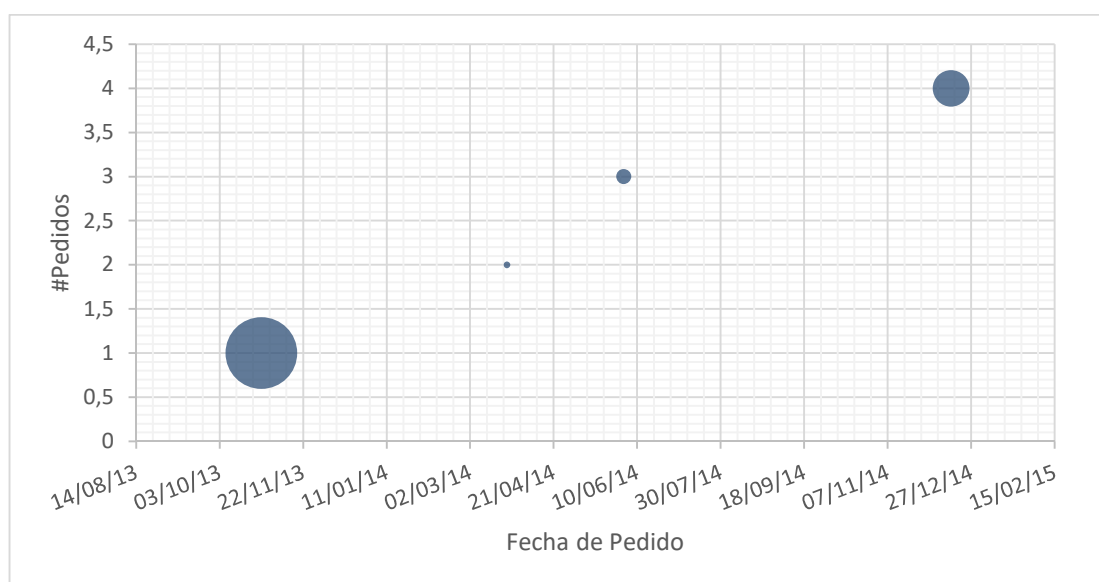


Ilustración 4-16 DNAM Sistema neumático, Grupo I. Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la Ilustración 4-16, las fallas del sistema neumático son casi inexistentes, en el supuesto 1 falla = 1 pedido.

4.1.4.2 Diagramas de Nelson-Aalen modificado, Grupo II

Los DNAM modificados, por sistema, del Grupo II son los siguientes:

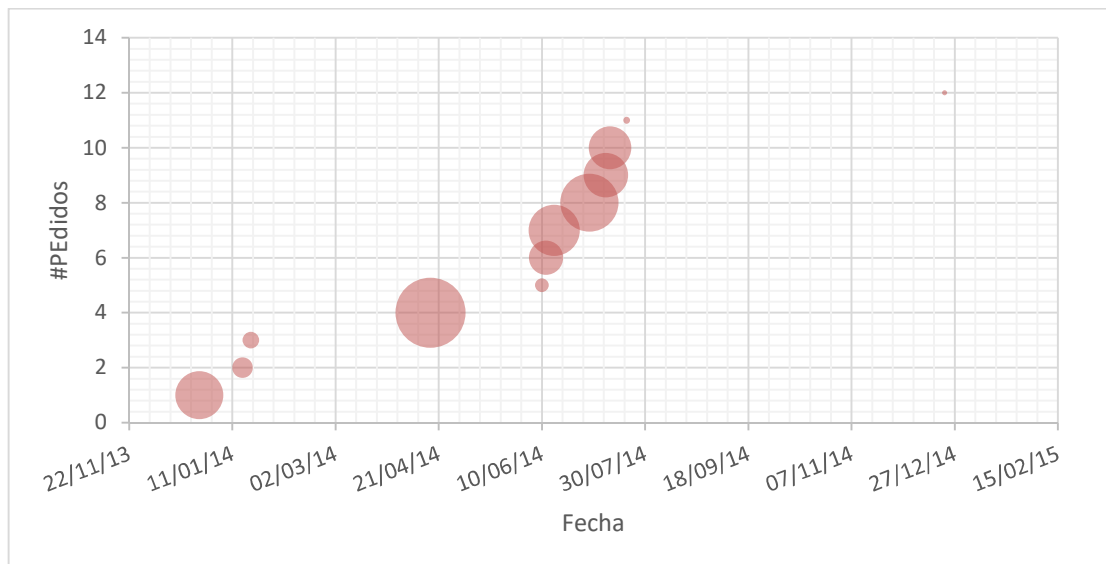


Ilustración 4-17: DNAM Motor, Grupo II. Elaboración Propia

Es posible apreciar en la Ilustración 4-17 cierta linealidad en el comportamiento de los pedidos hasta fines de Junio de 2014, lo que cambia radicalmente a partir de Julio, lo que concuerda con la entrada en operación del 100% de la flota del Grupo III.

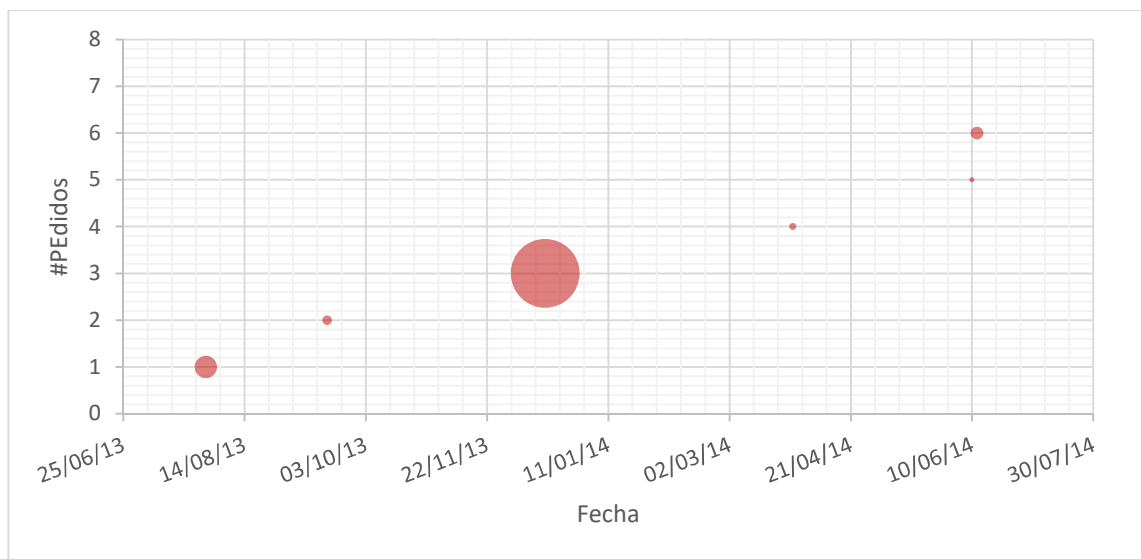


Ilustración 4-18 DNAM Transmisión Grupo II. Elaboración Propia

Según muestra la Ilustración 4-34, la curva es prácticamente lineal. Puede guardar relación con una mayor adecuación de los equipos al funcionamiento de la faena, al poseer modificaciones específicas para la operación desde fábrica. Esto es consistente con el hecho de no evidenciar pedidos urgentes, generalmente asociados a maquinas fuera de servicio.

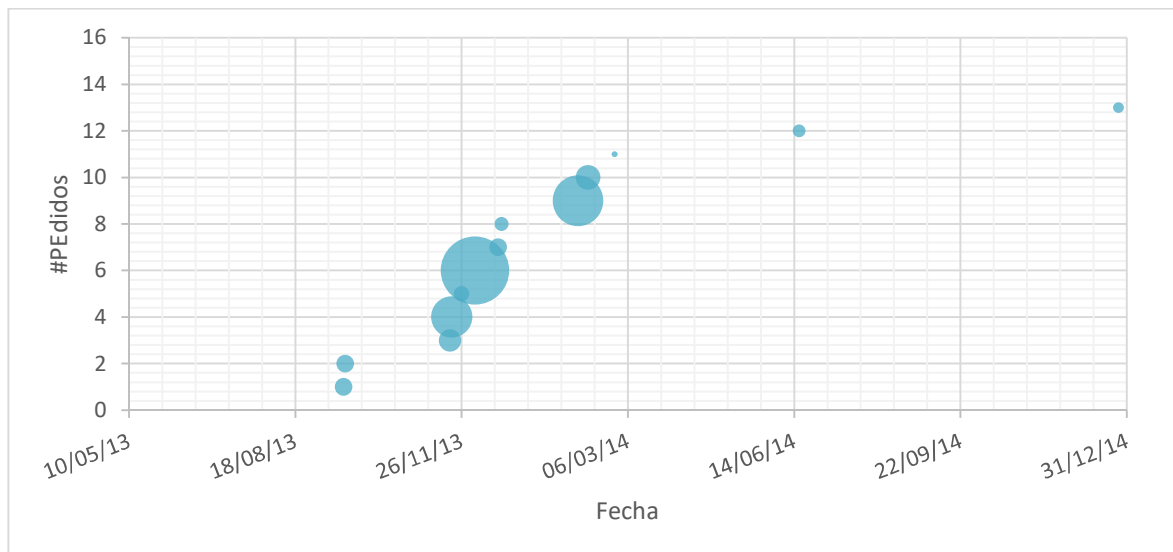


Ilustración 4-19 DNAM Elementos Periféricos Grupo II. Elaboración Propia

Pese a la falta información hacia el final del período, se aprecia en la Ilustración 4-38 un cambio en la tendencia a partir de Junio de 2014. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con el Grupo I, se ve una mayor variabilidad en los tiempos de reposición de los repuestos.

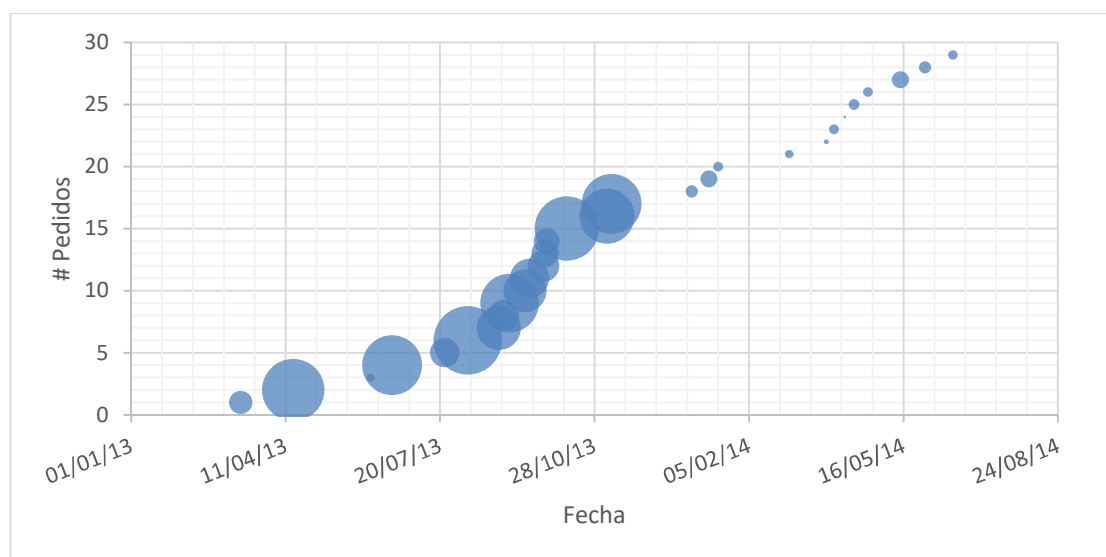


Ilustración 4-20 DNAM Sistema Hidráulico Grupo II. Elaboración Propia

El diagrama obtenido en la Ilustración 4-20 es el que concentra mayor cantidad de información para el grupo. Lo más notorio es el cambio en los tiempos de reposición a partir del año 2014, que van de la mano con un cambio en la pendiente de la curva. Según fue posible averiguar, se logró, en dicho período un acuerdo comercial con un proveedor local de repuestos, lo que es consistente con lo observado.

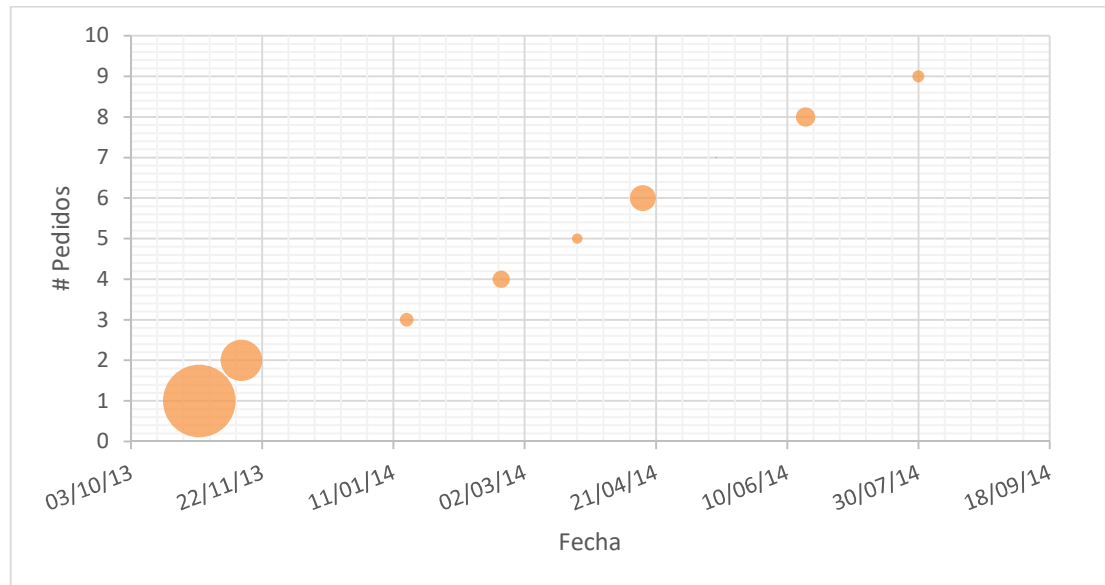


Ilustración 4-21 DNAM Sistema Frenos Grupo II. Elaboración Propia

En este caso, la Ilustración 4-21 muestra un comportamiento prácticamente invariante en los pedidos, en términos de demora como de frecuencia. Nuevamente, tiene sentido con la modificación de fábrica de los equipos, que tienen incorporados 5 sistemas de frenado antes de entrar en operación¹³.

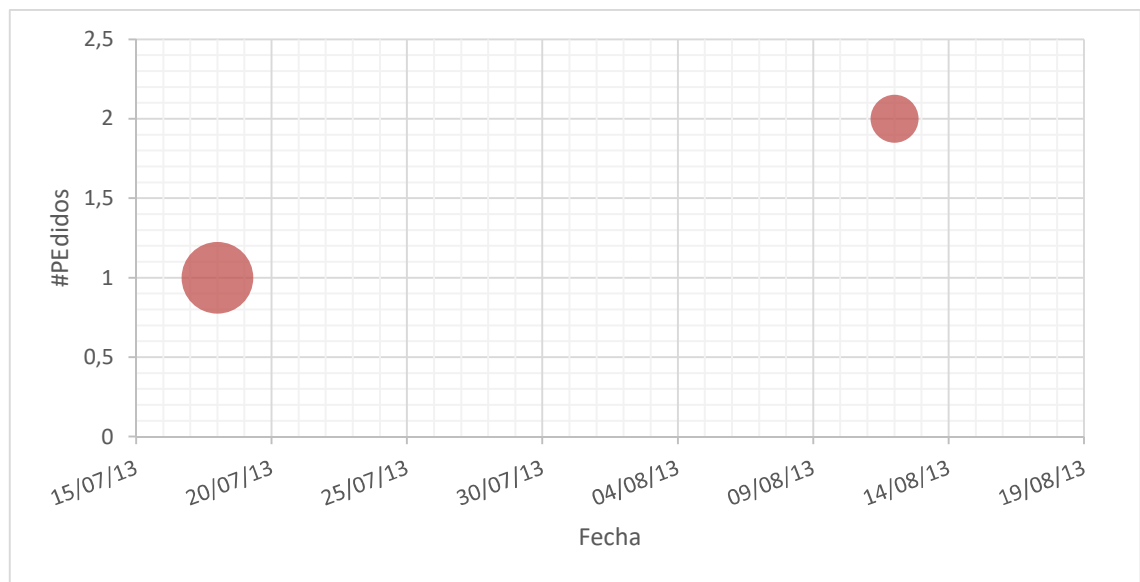


Ilustración 4-22 DNAM Árbol de Transmisión, Grupo II. Elaboración Propia

La información en la Ilustración 4-22 habla del comportamiento adecuado de los equipos en la nueva configuración, puesto que son muy pocos los pedidos asociados al ítem en el período.

¹³ Normalmente, este tipo de equipos tienen cuatro sistemas de frenado: el freno de servicio (pedal, hidráulico o neumático), el freno de motor (gases de escape reinyectados a la cámara de combustión), la transmisión (reducción de velocidad forzosa por disminución de marcha) y el freno de mano. A esto se le agrega un ralentizador electromagnético (Telma; frenado mediante la generación de corrientes de Foucault) al árbol de transmisión.

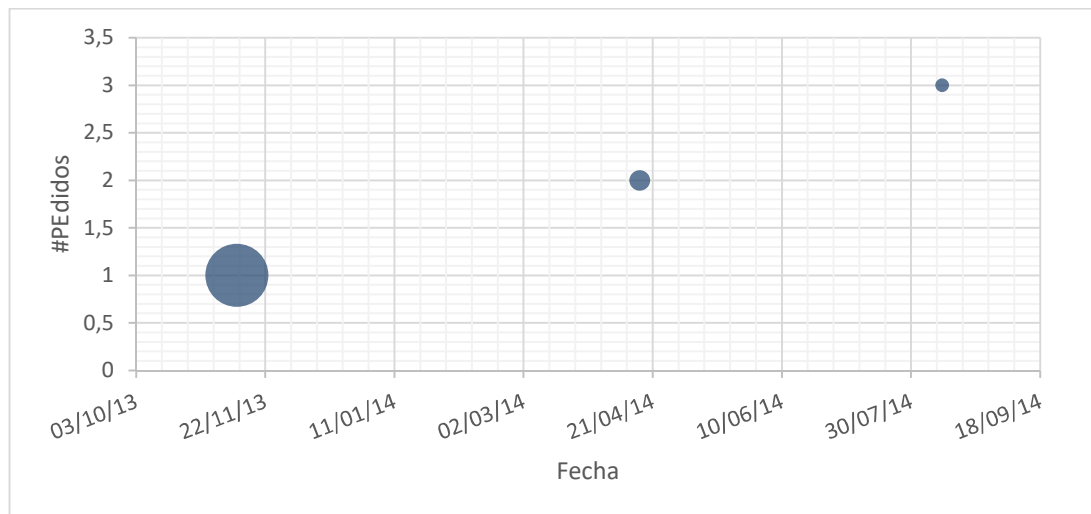


Ilustración 4-23 DNAM Refrigeración, Grupo II. Elaboración Propia

La tendencia de las solicitudes es prácticamente lineal. La Ilustración 4-23 muestra solo un caso puntual de tiempo de demora mayor, por lo que considera a priori una excepción.

1. Estructura

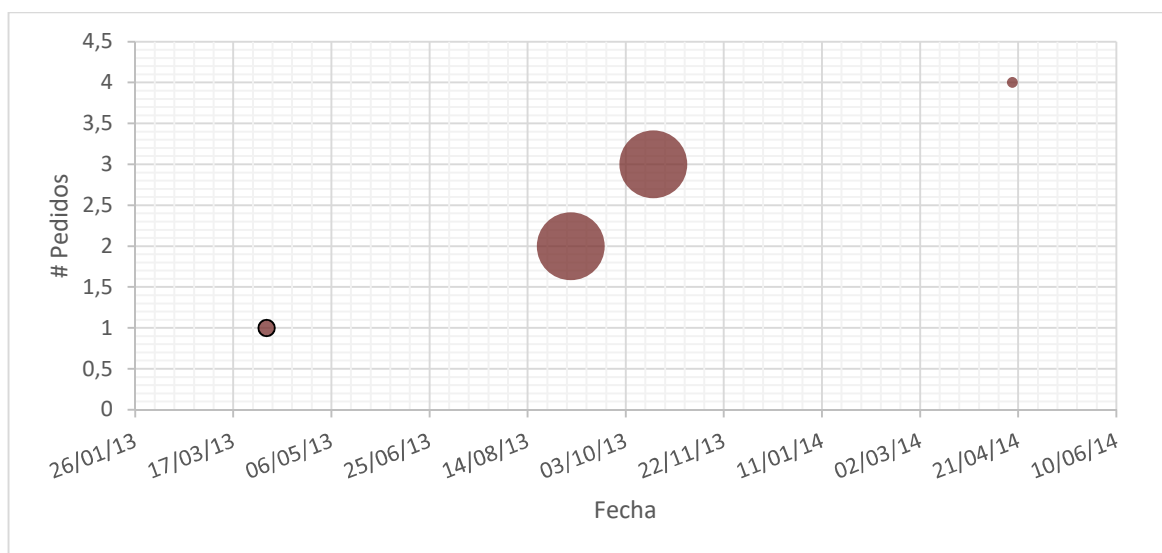


Ilustración 4-24 DNAM Estructura, Grupo II. Elaboración Propia

La cantidad de pedidos, mostrados en la Ilustración 4-24 nos muestra consistencia en la respuesta de los equipos en la configuración implementada. Luego de un año de servicio, la tasa de demandas es prácticamente invariable, pese a los dos eventos de demora en la entrega de pedidos a fines de 2013, también apreciados en el Grupo I

No se informan pedidos asociados al sistema eléctrico para los equipos del Grupo II y se informa solo un pedido asociado al sistema Neumático para los equipos del Grupo II, por lo que no tiene sentido realizar un análisis gráfico para dichos conjuntos.

4.1.5 Diagramas de Dispersión

Para lograr determinar el grupo de repuestos que podrán ser evaluados según los modelos, de acuerdo a su criticidad, es útil realizar el análisis de los componentes utilizando diagramas de dispersión.

Dados los resultados mostrados en los DNA y DNAM, es posible acotar los tiempos de estudio para ambos grupos de maquinarias, considerando el comportamiento de sus componentes mayores. En el caso del Grupo I, resulta conveniente acotar el estudio hasta marzo de 2014, mientras que para el grupo II, hasta Junio del mismo año, considerando para ambos el inicio en enero del año 2013. Esto responde básicamente a los cambios en las tendencias de las curvas observadas, que son acorde a eventos puntuales en la historia de la faena, a saber, la entrada a la operación del 100% de los equipos de los grupos II y III. Con ello en mente, se elaboran diagramas de dispersión de tiempo y costo de acuerdo a lo explicado en 3.2.3.1 con una serie de consideraciones, similares a las utilizadas en 4.1.4:

- Se utiliza, en vez de modos de falla, los sistemas que agrupan los pedidos definidos en la Tabla 4-1 y desarrollados en 4.1.4.
- La frecuencia utilizada es la frecuencia calculada de los pedidos realizados en los períodos acotados para cada grupo.
- El tiempo asociado a la no disponibilidad, es el *lead time* de los pedidos. Se considera a este valor como representativo del MTTR de las fallas.
- El costo considerado es el costo de adquisición de los repuestos asociados a cada sistema en los períodos considerados.

4.1.5.1 Diagramas de Dispersión Grupo I

Tomando en consideración las premisas mencionadas en 4.1.5, se construye la tabla de datos que permitirá construir los diagramas de dispersión. Los datos se encuentran en la Tabla 4-2

El diagrama de Jack Knife en 3D resultante considerando los 10 sistemas y los 3 ejes definidos, puede ser apreciado en la Ilustración 4-25. En dicho diagrama, es posible ver que los sistemas Motor (1), Transmisión (2), Periféricos (3) e Hidráulico (4) parecieran ser los más críticos. Esto puede verse con más claridad en las proyecciones 2D del Diagrama

Tabla 4-2 Valores medios estimados, Grupo I.

#	Sistema	Demanda Media	Tiempo Indisponibilidad por Reposición	Costo Medio
		(demandas/mes)	(mes/intervención)	(CLP\$/mes)
1	Motor	39,432	0,001	\$ 1.937.173
2	Transmisión	6,681	0,009	\$ 3.121.167
3	Periféricos	6,747	0,009	\$ 390.015
4	Hidráulico	10,480	0,003	\$ 378.680
5	Frenos	6,943	0,004	\$ 177.874
6	Árbol de transmisión	1,376	0,046	\$ 473.070
7	Refrigeración	2,620	0,019	\$ 419.329
8	Estructura	1,441	0,031	\$ 353.976
9	Eléctrico	0,328	0,087	\$ 36.964
10	neumático	0,131	0,405	\$ 44.412
	Promedio	7,618	0,061	\$ 733.266

Fuente: Elaboración propia

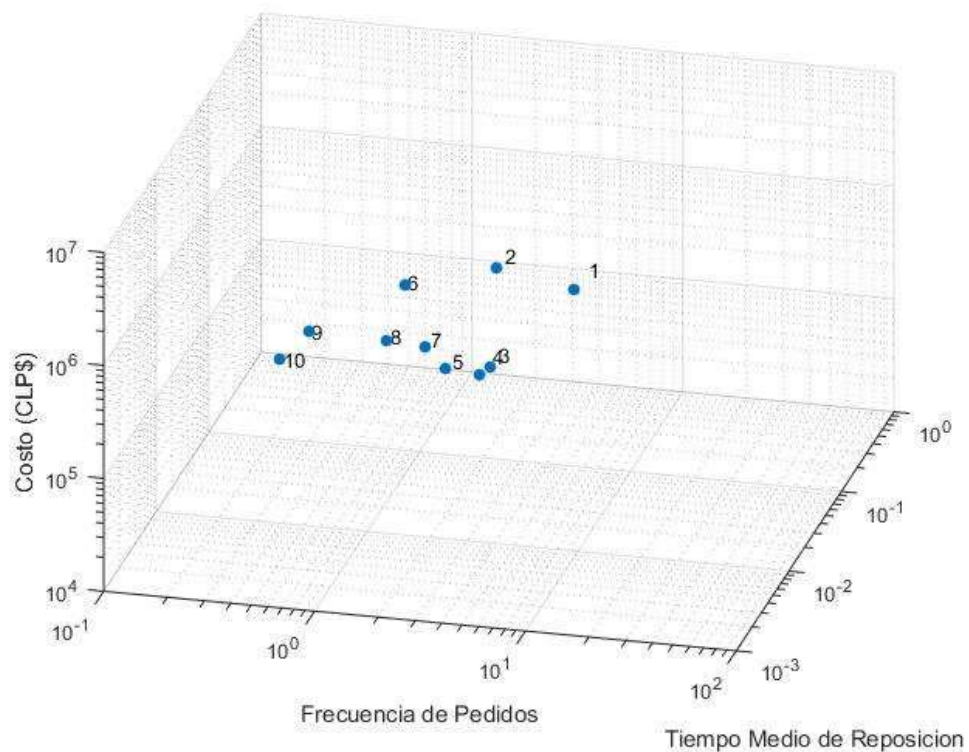


Ilustración 4-25 Diagrama de J-K 3D para el Grupo I. Elaboración propia

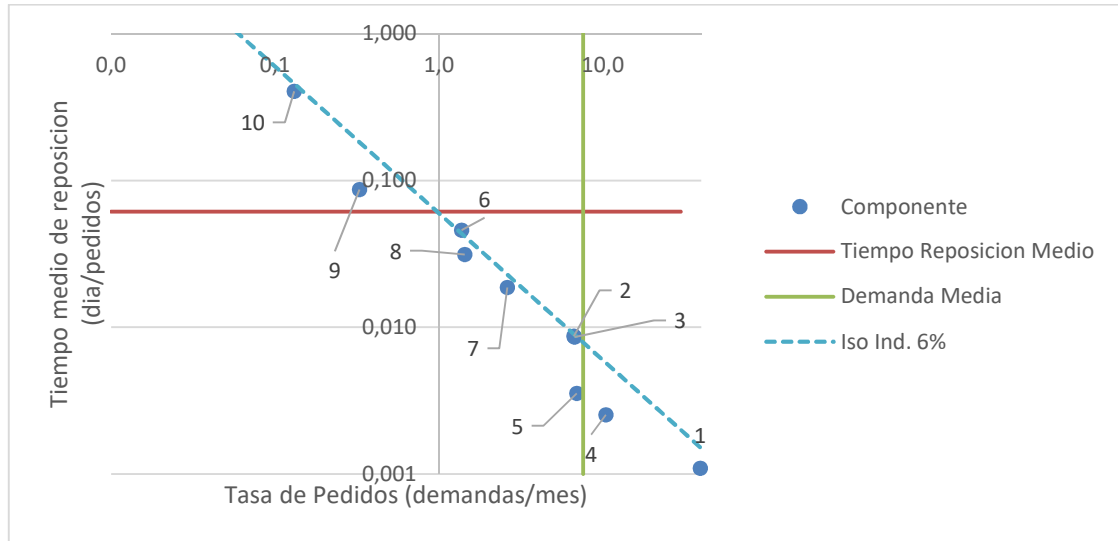


Ilustración 4-26: Diagrama de dispersión de tiempo, Grupo I. Elaboración propia.

Si consideramos una priorización temporal, es decir lo que afecta la disponibilidad del elemento en bodega según su frecuencia de pedido y la demora en la entrega, los sistemas 1 y 4 superan la media de pedidos, seguidos de cerca por los sistemas 2,3 y 5, cercanos en su mayoría a la Iso indisponibilidad media. Sin embargo, destaca el caso del sistema 10, por su alta indisponibilidad (5%) por demora en la entrega, pese a su baja de frecuencia de pedido, tal como se aprecia en la Ilustración 4-26

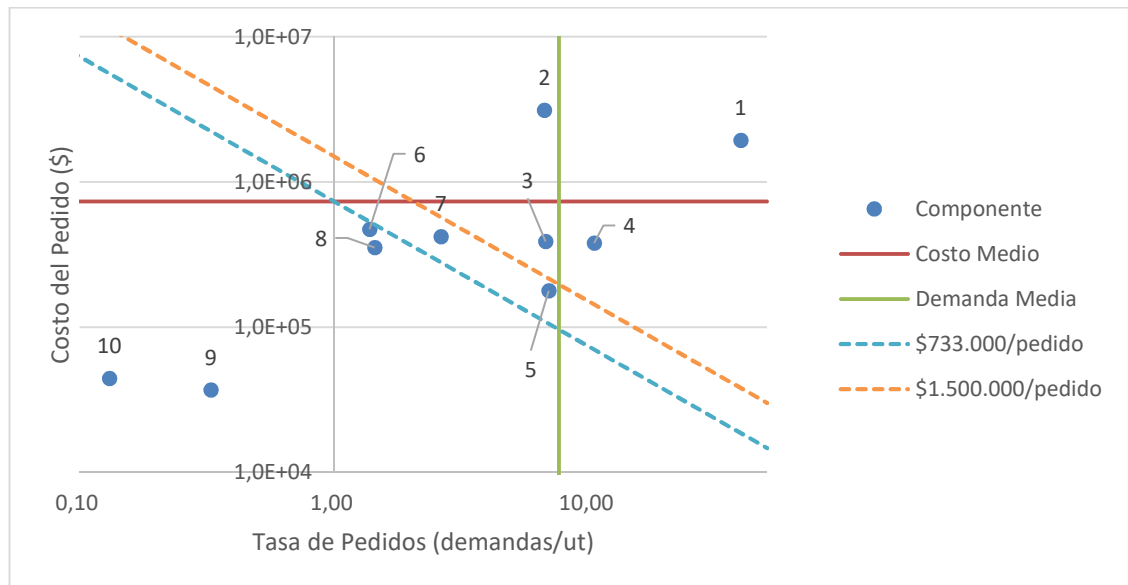


Ilustración 4-27: Diagrama de dispersión de costo, Grupo I. Elaboración propia.

Sin embargo, al realizar una vista considerando los costos, el sistema 10 pierde prioridad al ser un sistema de bajo costo relativo e infrecuente. Los sistemas 1, 2,3 y 4 superan la curva de iso costo de los CLP\$1.500.000 (muy lejos de la curva de iso costo media de CLP\$733.000), superan o están cercanos a la media de demanda como se aprecia en la Ilustración 4-27. De este dichos 4 sistemas serán considerados como críticos para el Grupo I y de allí que se ajusten a los requerimientos de los modelos.

4.1.5.2 Diagramas de Dispersión Grupo II

Nuevamente, se construye la tabla para realizar el análisis. Los resultados se presentan en la Tabla 4-7. Se excluye de esta tabla el sistema eléctrico por no existir pedidos asociados en el período.

Tabla 4-3 Valores medios estimados, Grupo II.

#	Sistema	Demanda	Tiempo Indisponibilidad por Reposición	Costo
		(demandas/mes)	(mes/intervención)	(CLP\$/mes)
1	Motor	7,720	0,001	\$ 39.834
2	Transmisión	0,339	0,247	\$ 304.292
3	Periféricos	3,115	0,013	\$ 68.718
4	Hidráulico	13,883	0,002	\$ 203.354
5	Frenos	0,880	0,042	\$ 57.592
6	Árbol de transmisión	0,203	0,682	\$ 349.938
7	Refrigeración	0,203	0,291	\$ 80.208
8	Estructura	0,406	0,105	\$ 113.824
10	neumático	0,745	0,058	\$ 23.874
	Promedio	3,055	0,160	\$ 137.959

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de Jack Knife en 3D resultante considerando los 10 sistemas y los 3 ejes definidos, puede ser apreciado en la Ilustración 4-28. En dicho diagrama, es posible ver que los sistemas Motor (1), Periféricos (3), Hidráulico (4) y Frenos (5) parecieran ser los más críticos. Esto puede verse con más claridad en las proyecciones 2D del Diagrama

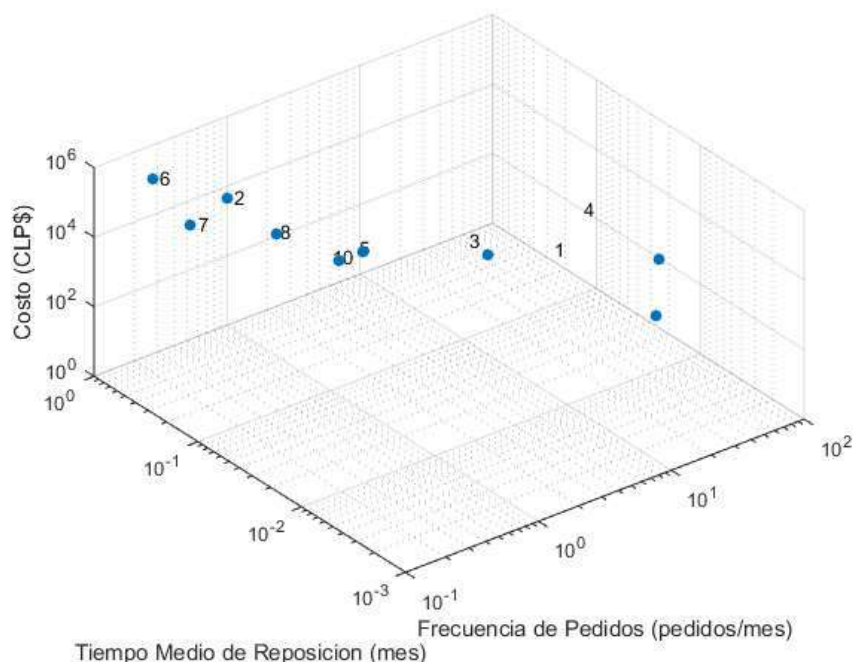


Ilustración 4-28: Diagrama de J-K 3D para el Grupo II. Elaboración propia

Si consideramos una priorización temporal, los sistemas 1 y 4 superan la media de pedidos, seguidos de cerca por el sistema 3, todos ellos generando una indisponibilidad inferior a la media%. Sin embargo, destaca el caso de los sistemas 2,6 y 7, por su alta indisponibilidad por demora en la entrega, pese a su baja de frecuencia de pedido, tal como se aprecia en la Ilustración 4-29

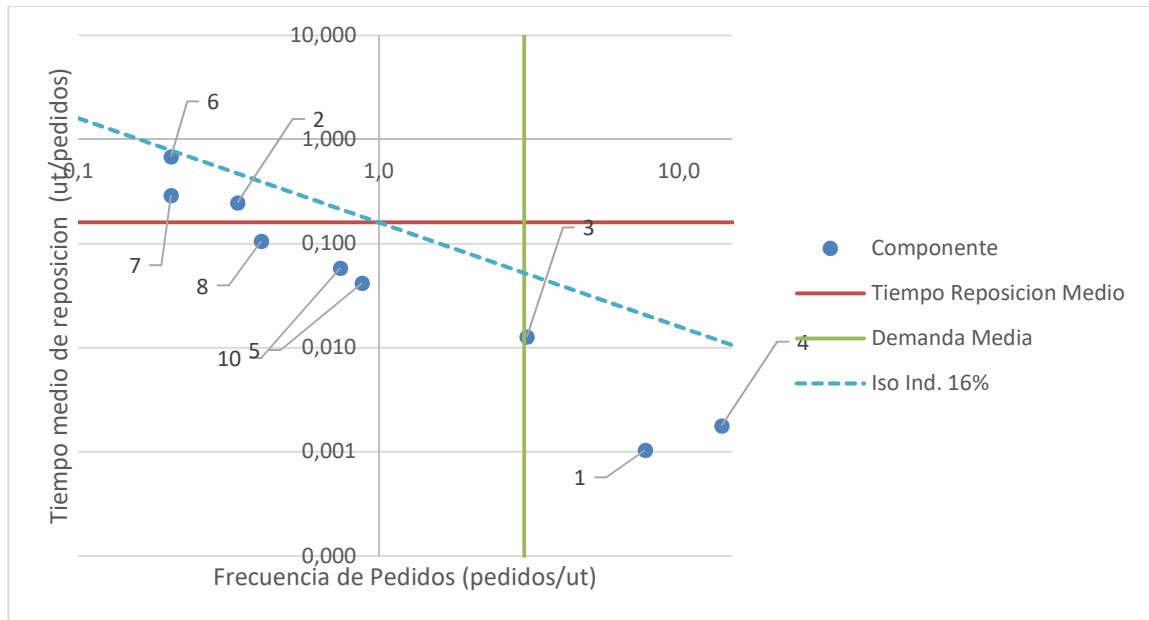


Ilustración 4-29: Diagrama de dispersión de tiempo, Grupo II. Elaboración propia.

Sin embargo, al realizar una vista considerando los costos, los sistemas 1,3 y 4 superan la curva de iso- costo media de CLP\$138.000 superan o están cercanos a la media de demanda como se aprecia en la Ilustración 4-30, por lo que dichos 3 sistemas serán considerados como críticos para el Grupo II y de allí se seleccionarán repuestos que se ajusten a los requerimientos de los modelos.

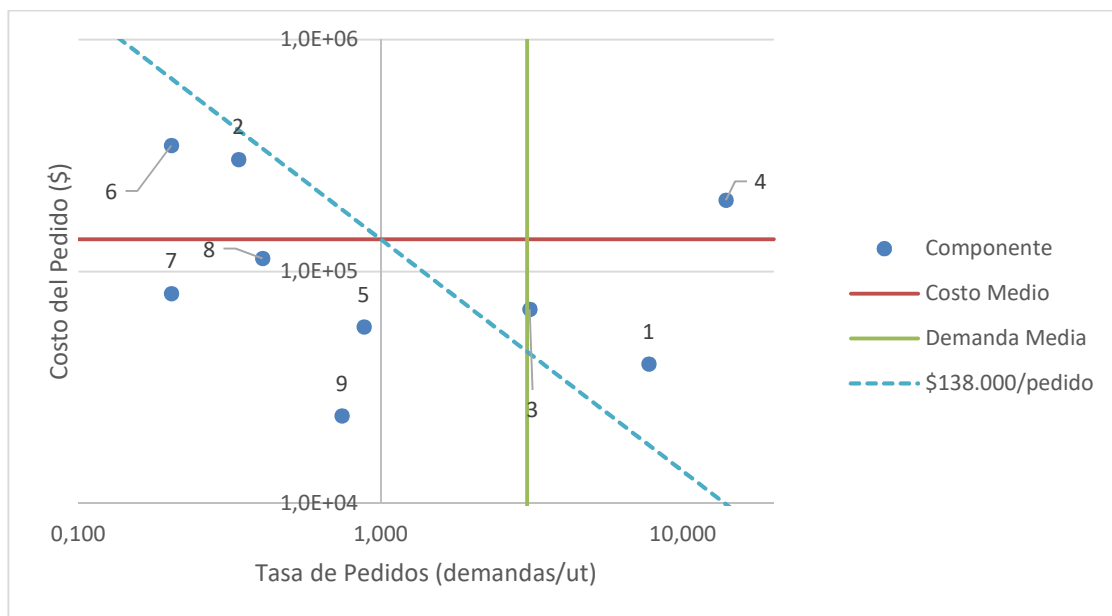


Ilustración 4-30: Diagrama de dispersión de costo, Grupo II. Elaboración propia.

4.1.6 Selección de repuestos críticos

La selección de repuestos críticos se realiza utilizando tablas de gravedad trabajadas con el personal de la faena. Su fin es discriminar rápidamente aquellos repuestos que pudiesen, en cada sistema, ser más representativos o que en caso de ser intervenidos, se pudiese lograr un efecto mayor en la optimización de recursos.

Se elaboran tablas en función de tres criterios: tiempo de reposición (lead time), frecuencia de pedido y costo del repuesto. Los valores de criticidad se presentan en la Tabla 4-4, Tabla 4-5y Tabla 4-6

Tabla 4-4: Índice de gravedad por tiempo de reposición

Índice	Tiempo (días)
5	≥ 30
4	≤ 30
3	≤ 15
2	≤ 7
1	≤ 1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5: Índice de gravedad por frecuencia de pedido.

Índice	Frecuencia
1	$\geq c/6$ meses
2	$\leq c/6$ meses
3	$\leq c/3$ meses
4	$\leq c/1$ mes
5	$\leq c/1$ semana

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-6: Índice de gravedad por Costo Unitario del repuesto.

Índice	Costo U.
5	\$ 2.000.000
4	\$ 1.000.000
3	\$ 500.000
2	\$ 250.000
1	\$ 50.000

Fuente: Elaboración propia

El nivel de criticidad vendrá dado por la multiplicación del índice asignado para cada elemento estudiado, perteneciente a los sistemas críticos definidos en 4.1.5

4.1.6.1 Repuestos Críticos- Grupo 1

Los repuestos críticos seleccionados por sistema y su criticidad se presentan desde la Tabla 4-7 hasta la Tabla 4-13.

Tabla 4-7 Repuestos Críticos Motor, Grupo 1.

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Motor	Turbo k27502	60	5	4	3
	Tubo lubricación turbo a5421801220	40	5	4	2
	Tubo flexible a9425010582	40	5	4	2
	Viscoso ventilador a0002008422	36	4	3	3
	Juego rep. culata compresor a5411300620	32	4	4	2
	Carter distribución a5410103033	30	5	2	3
	Turbo 803270m	30	5	2	3
	Tubo de escape a9424902719	30	5	3	2
	Chapaleta a5421400363	30	5	3	2
	tubo lubricación turbo izq. a5421801120	30	5	3	2
	Tubo flexible a9415011282	30	5	3	2
	Juego de cables de motor qxvk63	25	5	1	5
	Fijador múltiple de escape a403142021291	25	5	5	1
	Válvula (g) derivadora	24	4	3	2
	Retardador voith r115h	20	4	1	5
	Múltiple escape 309253300	20	5	1	4
	Carter filtro aceite a5411881904	20	5	1	4
	Tubo escape a9424904019	20	5	2	2
	Kit reparación retardador 15300187310	20	5	2	2
	Soporte goma a9412418813	20	5	2	2
	Manguera intercooler a0030940882	20	5	2	2
	Cañería turbo 6240518280	20	5	2	2
	Empaquetadura (g) a5410100921:elri	20	5	4	1
	Tubería aceite a5411801422	20	5	4	1
	Empaquetadura escape a5411420380	20	4	5	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8 Repuestos Críticos Transmisión, Grupo 1.

Sistema	Detalle	Indice	Gravedad por tiempo de Reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Transmisión	Caja de cambio G240-16	50	5	2	5
	Kit embrague a007250440494	48	4	3	4
	Carter de cambio A9452608412	30	3	2	5
	Árbol prim. Caja camb. a3892628301	30	5	2	3
	Piñón rueda dentada a9452625617	30	5	3	2
	Anillo sincronización a9452625434	30	5	3	2
	Cono sincronización a9472601945	30	5	3	2
	Cono sincronizador a9472600545	30	5	3	2
	Servo embrague a000254124791	24	4	3	2
	Transmisor A016542161701	24	4	3	2
	Caja de mariposa a5421403253	20	5	1	4
	Varillaje a9418200441	20	5	2	2
	Cono sincronizador a9472603045	20	5	2	2
	Bomba aceite caja cambio a389260069011	20	5	2	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-9 Repuestos Críticos Elementos Periféricos, Grupo 1. Elaboración Propia

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de Reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Periféricos	Brazo limpiaparabrisas a9418200744	32	4	4	2
	Parabrisas 21148267	30	5	2	3
	Porta patente a94388503267354	24	4	3	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10 Repuestos Críticos Sist. Hidráulico, Grupo 1. Elaboración Propia

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de Reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Hidráulico	Bomba lev. hidráulica 200nf150s 4pernos	36	4	3	3
	Bomba hidráulica levante 200fzh150ss	27	3	3	3
	Mts. Flexible (g) de 3/4 x 3 m	20	5	4	1
	Válvula (g) comando hidráulico	18	3	2	3
	Mts. Flexible (g) de 1 x 3 m	16	4	4	1
	Mts. Flexible (g) de 3/8 x 0.90 ml	16	4	4	1

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.2 Repuestos Críticos- Grupo 2

Los repuestos críticos seleccionados por sistema se presentan desde la Tabla 4-11 a la Tabla 4-13.

Tabla 4-11 Repuestos Críticos Motor, Grupo II.

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Motor	Retardador freno 9304300395	25	5	1	5
	Retardador voith r115h	20	4	1	5
	Fijador múltiple de escape a403142021291	16	4	4	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-12 Repuestos Críticos Elementos Periféricos, Grupo II.

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de Reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Periféricos	Tapa para deposito ad-blue A004704405003	16	4	2	2
	Cuña 5008458	15	5	3	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-13 Repuestos Críticos Sist. Hidráulico, Grupo II.

Sistema	Detalle	Índice	Gravedad por tiempo de Reposición	Gravedad por Frecuencia de pedido	Gravedad por Costo
Hidráulico	Mts. Flexible (g) de 1 x 3 m	32	4	4	2
	Mts. Flexible (g) de 1 x 1.40	16	4	4	1
	Mts. Flexible (g) de 3/8 x 0.90 ml	16	4	4	1

Fuente: Elaboración propia

4.2 Desarrollo e implementación de modelos de gestión de repuestos

Los modelos seleccionados en 3.2.4 fueron programados en código MATLAB, considerando en el código de cada uno, una aleatoriedad triangular en torno a los parámetros definidos originalmente como constantes. Para tal efecto, se obtienen 1000 valores en torno al parámetro ingresado, asumiendo tal valor como la media de la distribución triangular, con límites inferiores e inferiores de un 20% más o menos de la media, respectivamente. Dichos valores se incorporan a los diferentes modelos y se obtienen resultados según cada uno

Se comparan entonces los resultados con los obtenidos mediante cálculo directo en EXCEL, para evaluar si existe alguna diferencia o error en el cálculo.

4.2.1 Demanda con demora en los pedidos

El modelo entrega como resultado la probabilidad de quiebre de inventario, asumiendo que la demanda sigue una distribución de Poisson, cuyas variables de entrada se describen en 3.2.4.1

Para modelación y ensayo, se usaron ciertos parámetros obtenidos de bibliografía como casos comunes [2] y como para referencia en los resultados. En la interfaz, dichos parámetros serán solicitados al usuario, junto con un valor pesimista y un valor optimista para el *lead time*. Dichos extremos permitirán elaborar la distribución triangular designada para incorporar incertidumbre en los resultados.

4.2.1.1 Validación contra herramienta de cálculo

Usando como parámetros de referencia $\lambda=5$, $qa=6$ y $Td=1$ y de acuerdo a la ecuación 3.3 se obtienen los resultados mostrados en la Ilustración 4-31. Para este caso, se considera como parámetro incierto Td (*lead time*), generando 1000 valores en torno a este, de estos datos se acota el 95% de los resultados entre los percentiles 2,5 y 97,5, para generar el espacio probable de solución del problema considerando variabilidad de Td .

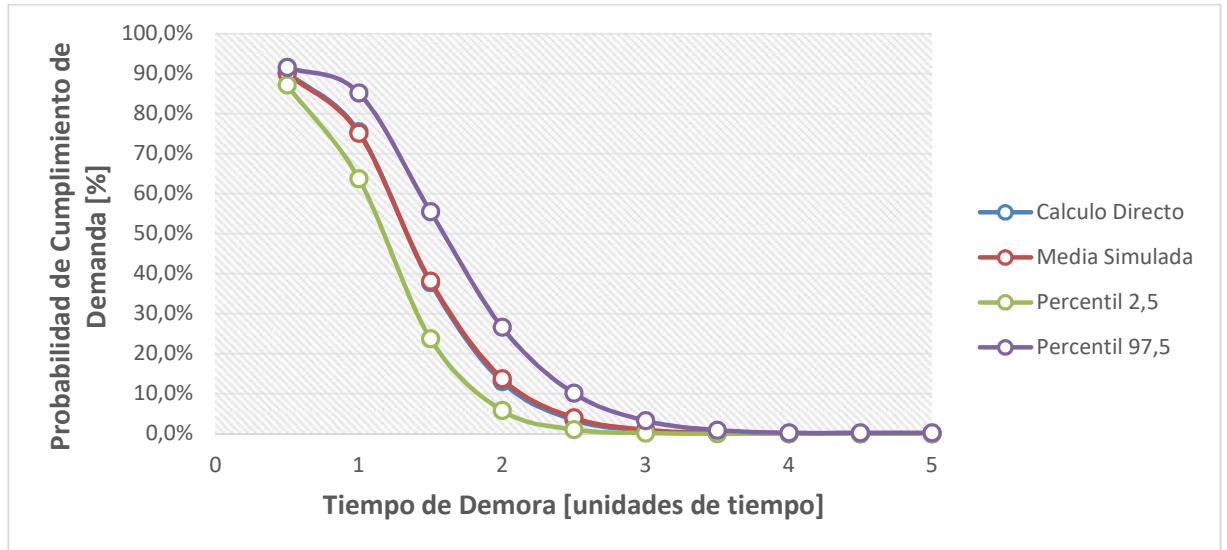


Ilustración 4-31: Modelo de Demanda con demora en los pedidos con $\lambda=5$, $q_a=6$ y $T_d=1$. Fuente: Elaboración propia

Es posible apreciar que los datos obtenidos mediante la simulación, asumiendo una distribución triangular para T_d , se ajustan bastante con el cálculo directo obtenido en Excel. Es de esperar que al contrarrestar el modelo con datos reales la situación sea la misma y los límites establecidos por los percentiles representen las cotas inferiores y superiores de la curva real.

4.2.1.2 Análisis de sensibilidad

Se presenta en la Ilustración 4-32 la respuesta del modelo implementado ante la variación del parámetro T_d , considerando el rango de variación $[0.5 ; 2]$ y una distribución normal, con los restantes parámetros iguales a los presentados en 4.2.1.1. Se acota la curva de solución óptima con las curvas de los percentiles 2,5 y 97,5 respectivamente. Es posible apreciar que la probabilidad de responder a la demanda aumenta a menor tiempo de demora para un mismo nivel de alerta, hasta alcanzar una cota máxima. La cota inferior se mantiene bajo la solución óptima, considerando que un aumento en la demora necesariamente disminuye la probabilidad de contar con un repuesto cuando se le necesite.

Similar caso ocurre considerando una distribución triangular, según se aprecia en la Ilustración 4-33

Ambas ilustraciones muestran además que existe una relación directa entre el aumento de nivel de alerta y la probabilidad de responder a la demanda ante un mismo tiempo de demora, lo que responde a la lógica.

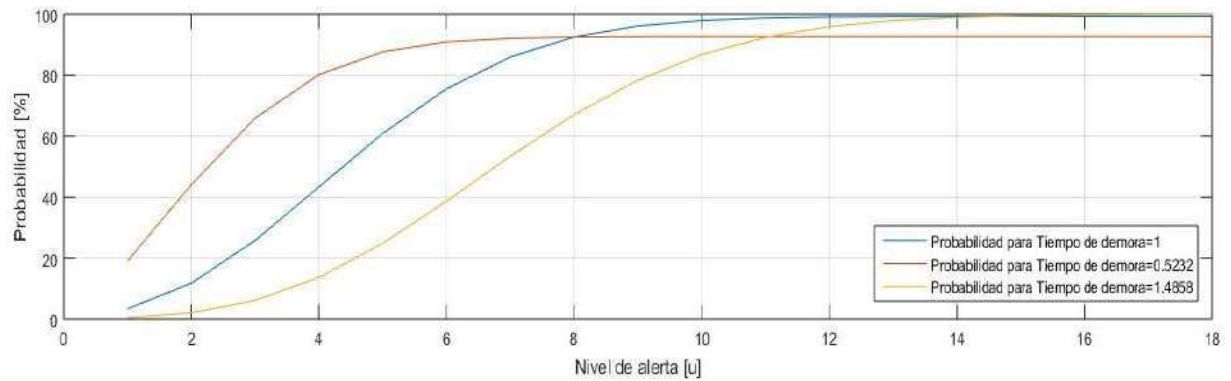


Ilustración 4-32 Análisis de Sensibilidad respecto del tiempo de demora. Elaboración propia

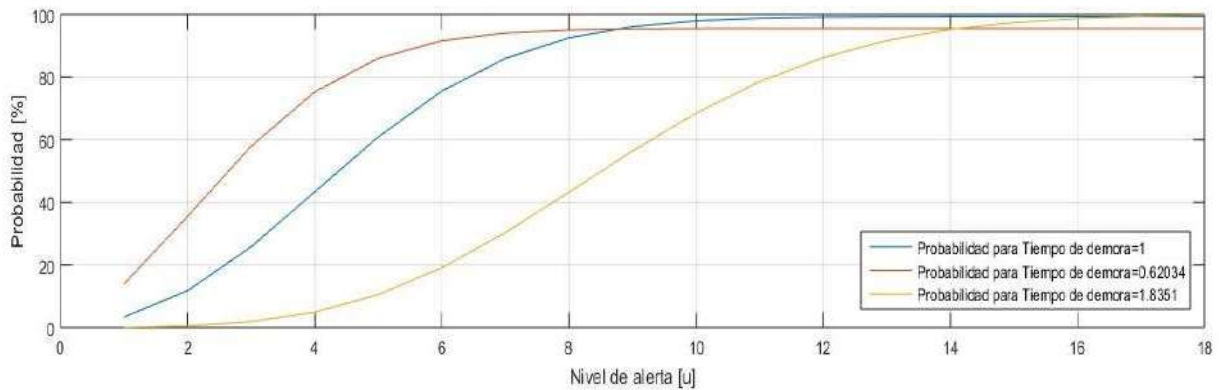


Ilustración 4-33 Análisis de Sensibilidad respecto del tiempo de demora. Elaboración propia

4.2.2 Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

El modelo a continuación representa situaciones donde un mismo insumo puede ser requerido de forma isocronal (un overhaul) y de manera variable en intervenciones preventivas, lo que es típico de elementos como mangueras o correas.

4.2.2.1 Validación contra herramienta de cálculo

Las ecuaciones mostradas en 3.2.4.2 permiten, con los parámetros referencia mostrados en la Tabla 4-14, desarrollar los resultados que se muestran en la Ilustración 4-34

Tabla 4-14: Parámetros de referencia para cálculo en modelo de demanda compuesta

Variable	Notación	Valor	Unidades
Tasa media de fallas	Lc	50	fallas/ut
Precio Unitario	pu	20	um
Tasa de descuento	i	0,15	
Costo de realizar un pedido	Cad	100	um
Periodos entre overhaul	to	2	ut
Repuestos requeridos por overhaul	qo	10	unidades
Repuestos requeridos por intervención preventiva	qv	1	unidades

Fuente: Pascual [2]

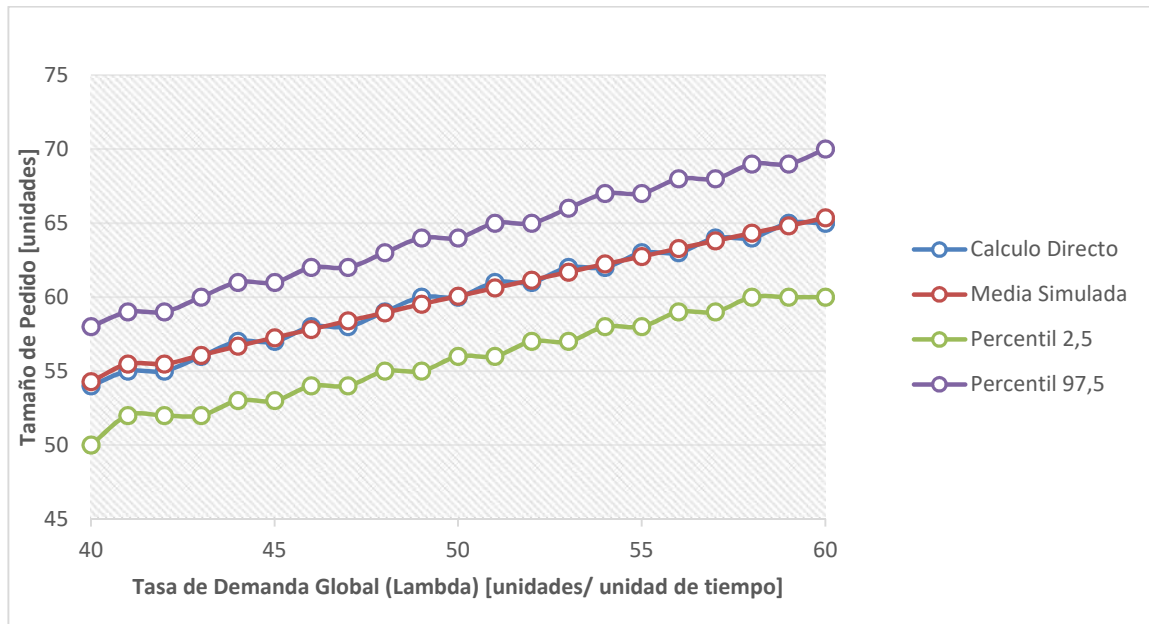


Ilustración 4-34 Modelo con demanda compuesta. Fuente: elaboración propia

En este caso, se realiza la simulación sobre la tasa media de fallas (λ), de forma de generar incertidumbre particularmente sobre las intervenciones no planificadas. Nuevamente, es posible apreciar que los datos obtenidos, se ajustan con el cálculo directo obtenido en Excel para distintos λ .

4.2.2.2 Análisis de sensibilidad

Considerando el caso de una variación a la demanda de acuerdo a una distribución normal, en el rango [45, 55] la curva de solución se ve acotada siempre por los límites establecidos por los costos calculados utilizando los límites de la incertidumbre, manteniendo un comportamiento claramente creciente luego del óptimo.

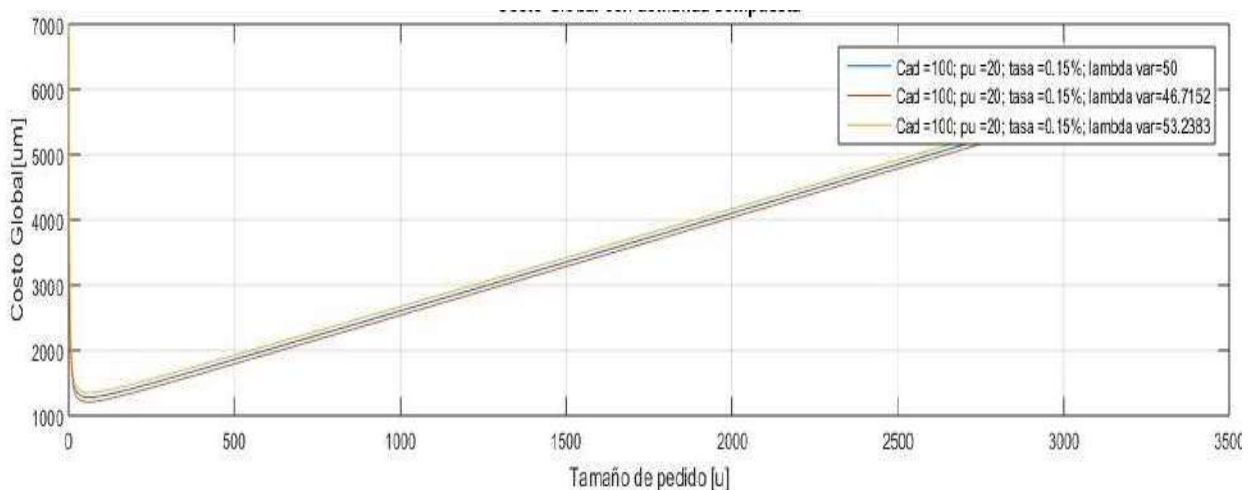


Ilustración 4-35 Costo con demanda compuesta. Sensibilidad a la variación en la demanda

Si se disminuye invierte la predominancia del costo de adquisición frente al precio unitario en un orden de magnitud, la curva mantiene su forma pero el óptimo y el costo global se ven claramente afectados, respondiendo al efecto de la conveniencia entre comprar con mayor

frecuencia y el tamaño de lote requerido, como se aprecia en la Ilustración 4-36 ($Cad/pu \approx 0.5$) y en la Ilustración 4-37 ($Cad/pu \approx 0.05$)

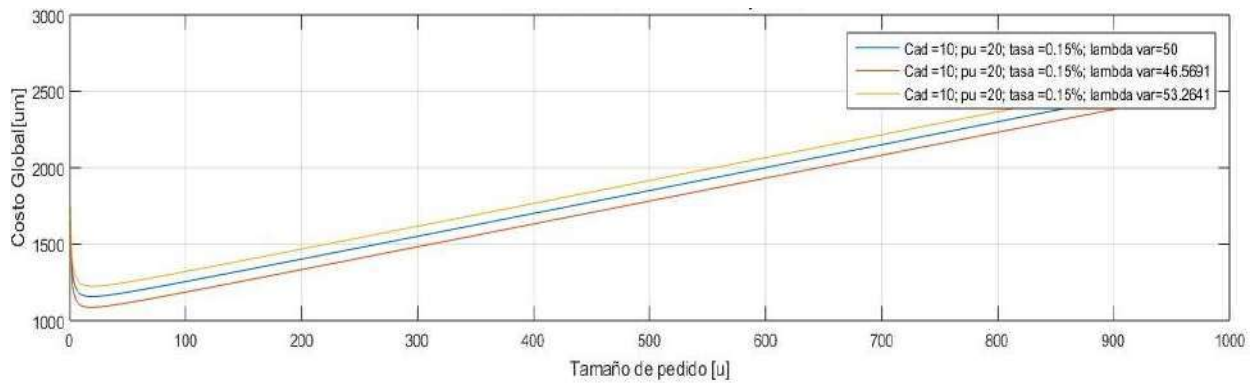


Ilustración 4-36: Costo con demanda compuesta. Sensibilidad a la variación en el costo de adquisición

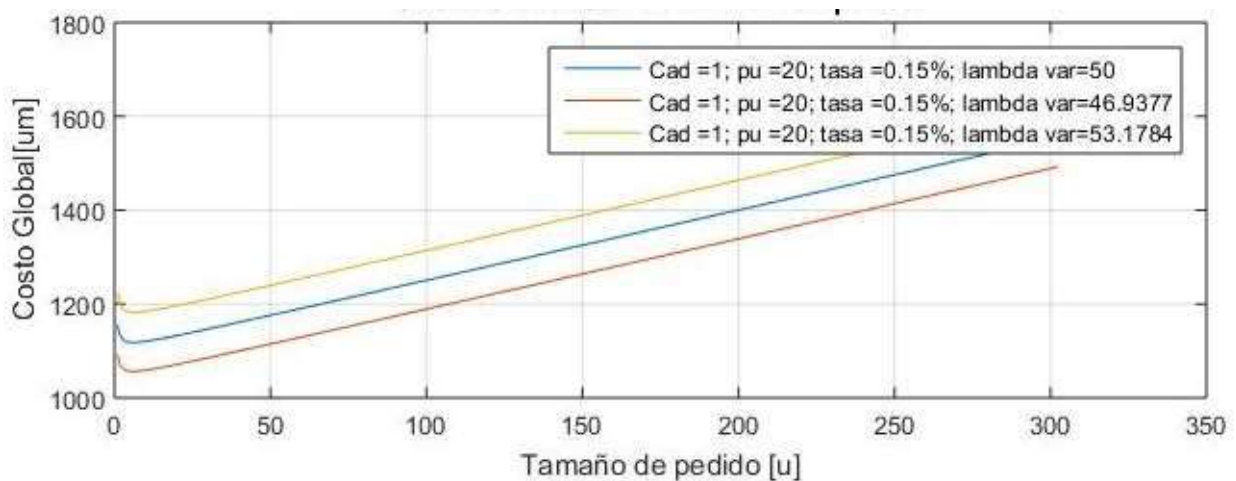


Ilustración 4-37 Costo con demanda compuesta. Sensibilidad a la variación en el costo de adquisición

4.2.3 Minimización del costo global con costo de falla

En este caso, se exploran dos posibles situaciones, el caso en que los repuestos son o no consumidos al momento de llegar a la bodega luego del tiempo de reposición de acuerdo a las ecuaciones mostradas en 3.2.4.3. Con esto es posible estimar el tamaño del lote de pedido necesario y de ello, desprender la frecuencia de pedido de acuerdo a las relaciones de Wilson [2].

4.2.3.1 Validación contra herramienta de cálculo

Los resultados de acuerdo a los parámetros mostrados en la Tabla 4-15 se aprecian en la Ilustración 4-38 y en la Ilustración 4-39.

Tabla 4-15: Parámetros referenciales para modelo de mínimo costo global con costo de falla

Variable	Notación	Valor	Unidad
Costo de adquisición	Cad	2	um
tasa de demanda	lambda	20	fallas/ut

Precio Unitario	pu	2	um
Tasa de descuento	tau	0,15	
Costo de Falla	Cf	2	um

Fuente: Pascual [2]

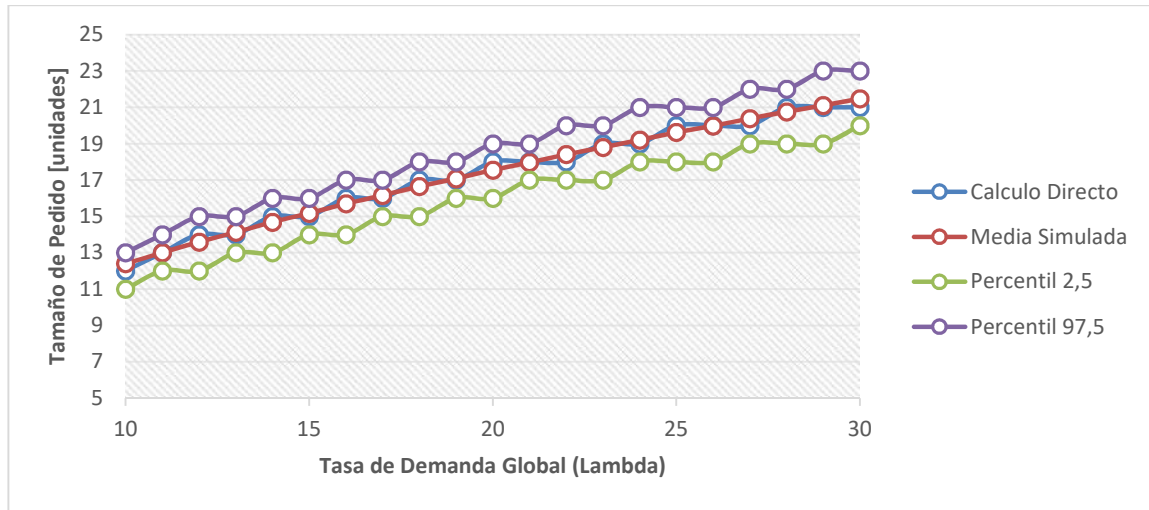


Ilustración 4-38: Minimización con costo de falla- Repuestos consumidos al llegar. Fuente: elaboración propia

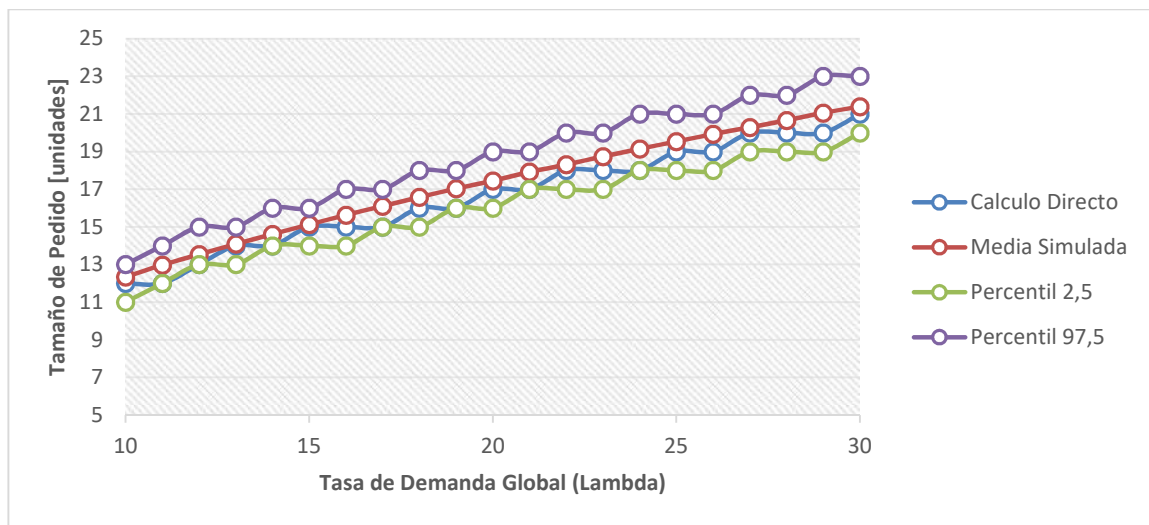


Ilustración 4-39: Minimización con costo de falla- Repuestos no consumidos al llegar. Fuente: elaboración propia

En ambos casos, las curvas se ajustan en términos de la media de los datos modelados por simulación y lo calculado en Excel, generando incertidumbre en torno a λ .

4.2.3.2 Análisis de sensibilidad

Considerando tanto el caso de consumo inmediato como posterior al arribo de los repuestos, con una distribución normal para el parámetro lambda, el costo se comporta de forma creciente respecto del tamaño de pedido y casi lineal a partir del óptimo, tal como se aprecia en la Ilustración 4-40 y en la Ilustración 4-41. En el centro de ambas imágenes se presenta la curva que describen los valores iniciales seleccionados. La variación generada en la demanda genera curvas simétricas

respecto de la original, las cuales reflejan un aumento o disminución del costo según aumente o disminuya la demanda.

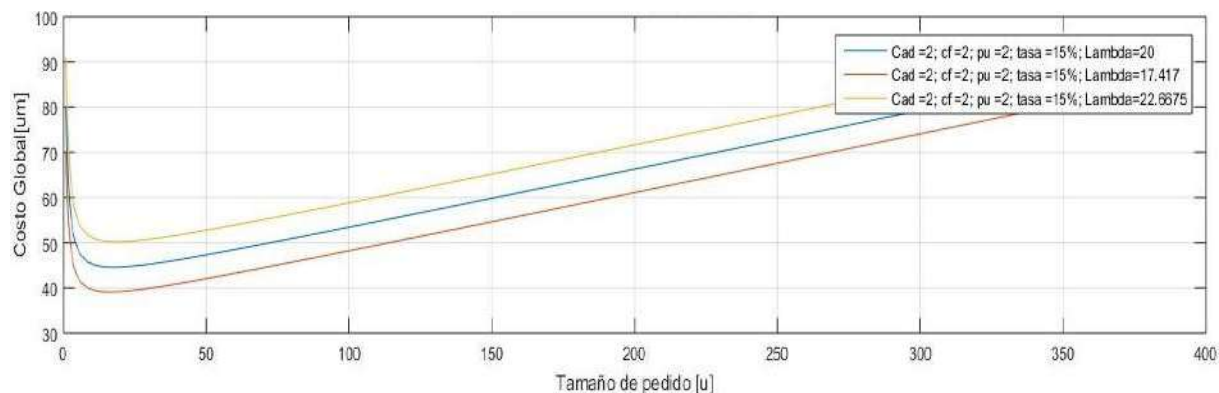


Ilustración 4-40: Curva de costo con falla, repuestos son consumidos al llegar. Elaboración propia.

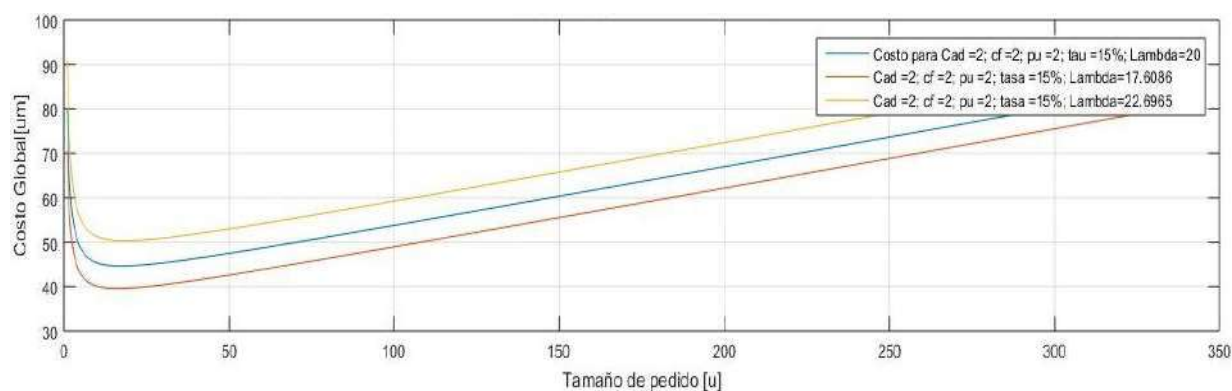


Ilustración 4-41: Curva de costo con falla, repuestos no son consumidos al llegar. Elaboración propia.

La curva no pareciese ser muy sensible a cambios en el costo de falla. Un aumento de orden de magnitud del mismo genera curvas similares a lo presentado en la en la Ilustración 4-40 y en la Ilustración 4-41, tal como se aprecia en la Ilustración 4-42. El modelo refleja que en esta circunstancia, es mucho más conveniente realizar compras frecuentes que esperar la falla del elemento, lo que se comprueba al invertir la relación de magnitud entre el precio unitario y el costo de falla en la Ilustración 4-43, un aumento de dicho precio disminuye de inmediato el tamaño del lote pedido.

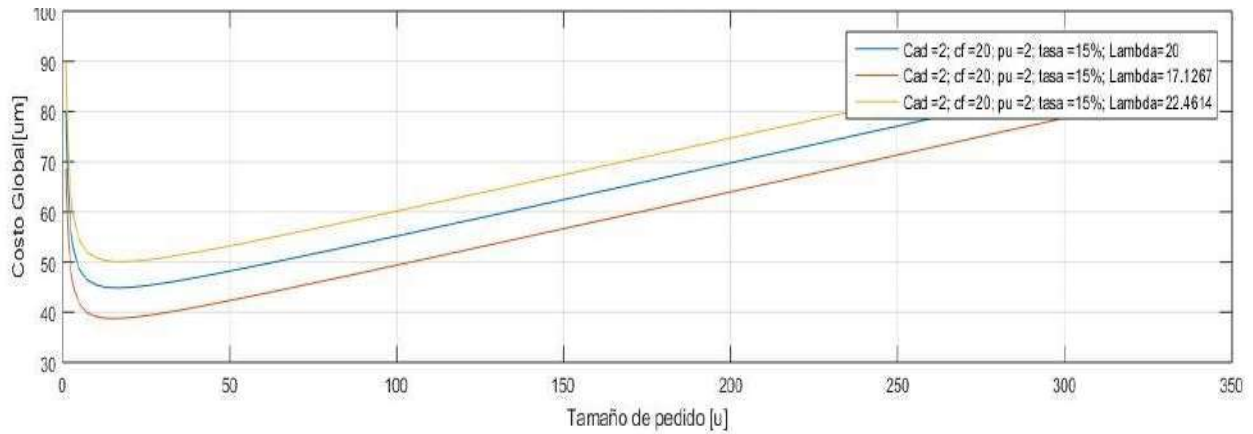


Ilustración 4-42: Curva de costo con falla, repuestos son consumidos al llegar, sensibilidad al costo de falla. Elaboración propia.

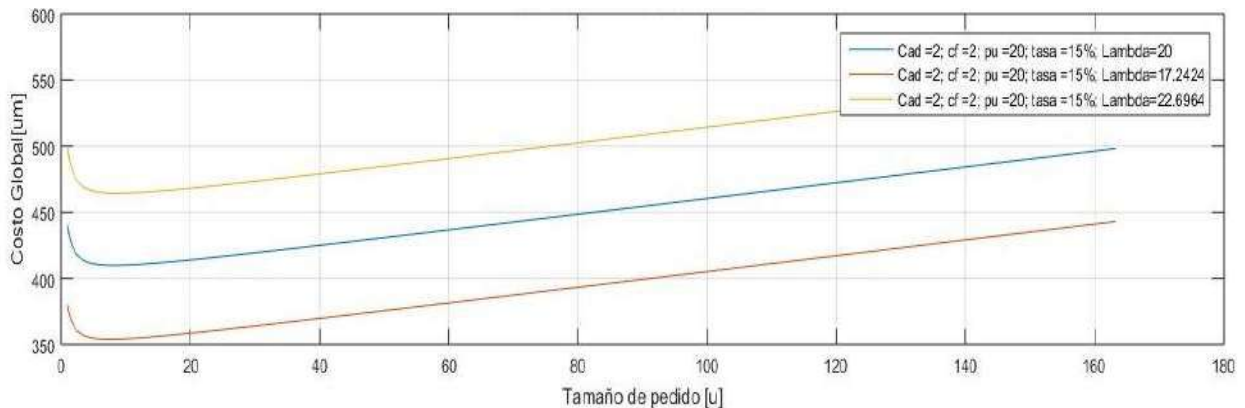


Ilustración 4-43: Curva de costo con falla, repuestos son consumidos al llegar, sensibilidad al precio unitario. Elaboración propia.

El costo de adquisición, en cambio aumenta el tamaño del pedido (y el costo global), en respuesta a la necesidad observada por el modelo de comprar lo menos frecuentemente posible dado el aumento de este ítem, como se aprecia en la Ilustración 4-44. Junto con ello, las cotas se ajustan mucho más a la curva de frecuencia original, mostrando la insensibilidad de este costo a la frecuencia de pedido

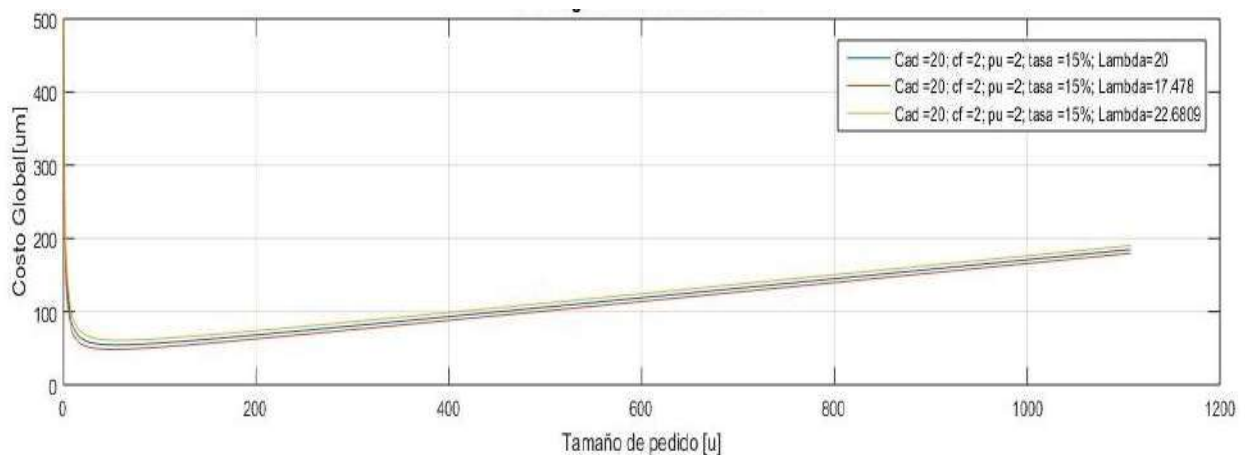


Ilustración 4-44 Curva de costo con falla, repuestos son consumidos al llegar, sensibilidad al costo de realización de un pedido (adquisición). Elaboración propia

4.2.4 Compras agrupadas

El modelo de compras agrupadas es más complejo que los anteriores, puesto que requiere para su desarrollo una optimización no lineal mixta, puesto que de las n variables a optimizar para minimizar el costo global, $n-1$ son *enteros* positivos mientras que una de ellas es un *real* positivo. Para tal efecto, se utiliza el método de algoritmos genéticos para convergencia a la solución. Además, dicha solución depende del conjunto de variables iniciales escogidas, por lo que es probable que el óptimo encontrado se trate de un óptimo local.

Para efectos de graficar los resultados, se ha escogido un conjunto de 4 elementos comprados simultáneamente, con los siguientes parámetros de cálculo referenciales (Tabla 4-16)

Tabla 4-16 Parámetros de referencia para modelo de compras agrupadas

Variable	Notación	Unidades	Valor			
Costo de generar un pedido	Cad	um/orden	500			
Tasa de descuento	tau	adim	0,15			
Elemento	i	Unidad	1	2	3	4
Costo de adquisición individual	Cad,i	um/orden	300	50	100	200
Tasa de demanda	L,i	u/ut	1	1	6	1
Costo de almacenamiento por unidad de tiempo	Ca,i	um/ut/u	50	50	50	50

Fuente: Pascual [2]

4.2.4.1 Validación contra herramienta de cálculo

Dada la cantidad de variables involucradas y las dimensiones de optimización del problema, se muestra en este caso la función objetivo minimizada que engloba todas ellas. La relación de coherencia frente al resultado obtenido en Excel, con una oscilación en torno la tasa de demanda λ persiste al igual que en los caso anteriores y debiese ser válido con datos reales.

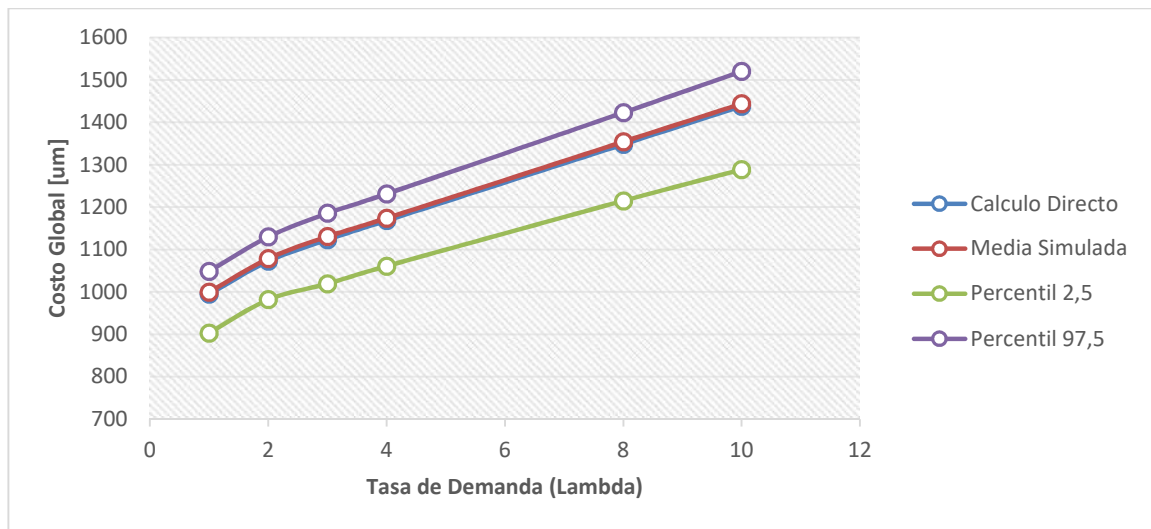


Ilustración 4-45: Costo Global con compras agrupadas en función de la tasa de demanda. Fuente: elaboración propia

4.2.4.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se complejiza al tratarse de un problema de optimización multivariado. Para efectos de análisis, se considera inicialmente una oscilación de la demanda del tercer elemento del ejemplo en la Tabla 4-16 en el rango [3; 7] y los percentiles resultantes, considerando una distribución normal. El resultado se aprecia en la Ilustración 4-46, la curva tiene una forma convexa que evidencia la presencia de un mínimo. Sin importar el número de componentes a utilizar, la situación debiese mantenerse.

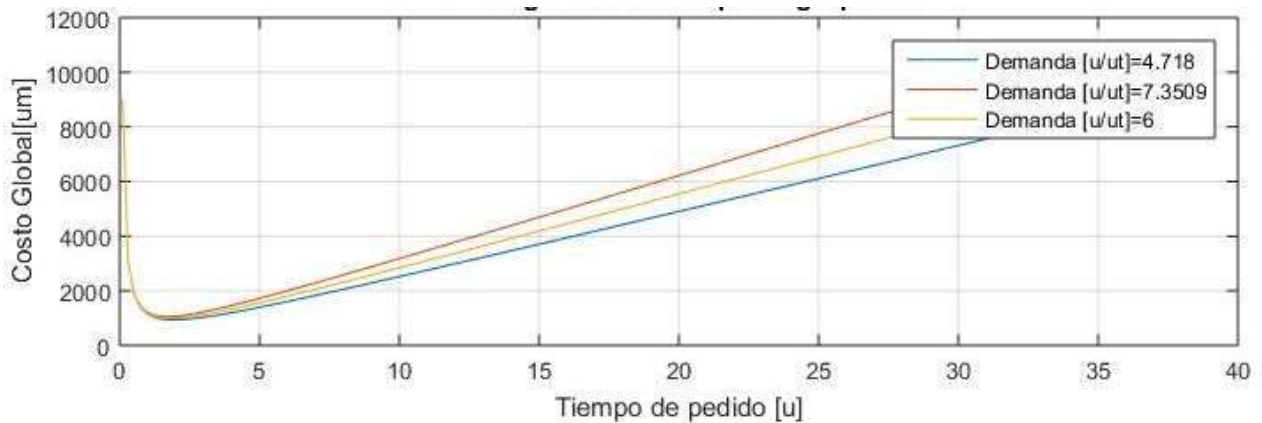
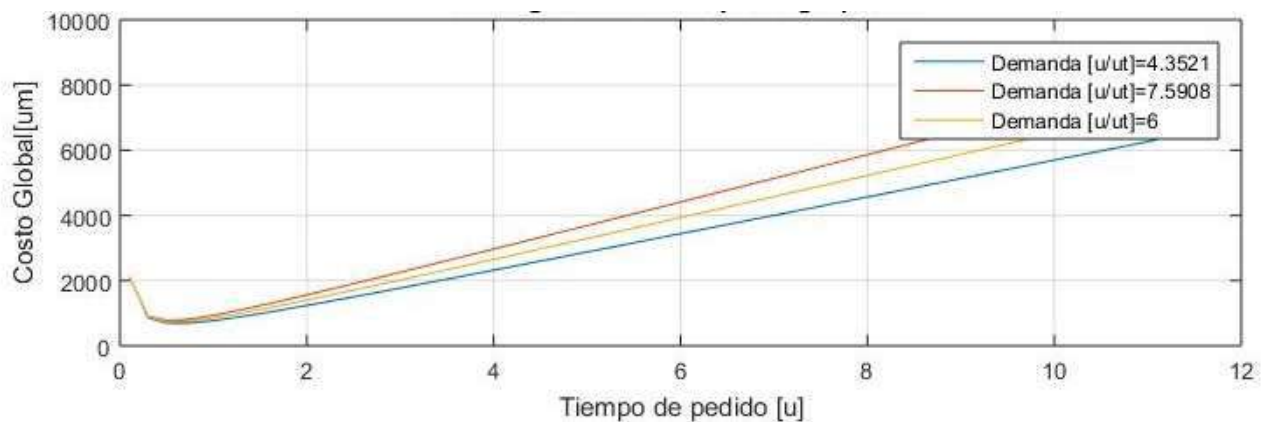


Ilustración 4-46: Compras agrupadas, costo global respecto del tiempo de pedido, sensibilidad al cambio en la demanda. Elaboración propia

La respuesta al cambio de otras variables en términos de sensibilidad, el mayor cambio en la curva conjunta se aprecia respecto del costo de adquisición, disminuyendo en un orden de magnitud este costo, la curva tiende a acercarse a la linealidad. En términos de la optimización, el mayor efecto se ve en los períodos de reposición conjunta de cada elemento, pasado los k_i de los calculados según la ecuación 3.29 de $[2;1;1;2]$ a $[6;3;2;5]$



4.2.5 Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación

4.2.5.1 Validación contra herramienta de cálculo

Para revisar los resultados, se contrastan las respuestas del programa frente a la literatura [2] y el cálculo directo de la solución en base a Excel. Se consideran las siguientes variables de entrada para el ensayo (Tabla 4-17)

Tabla 4-17 Parámetros de evaluación de modelo de cooperación

Parámetro	Valor
Disponibilidad global requerida	0.99
Disponibilidad local requerida	0.75
Cantidad de bodegas	4
Unidades por bodega	80, 240, 240, 100
Tiempo de reparación (Tat)	21 días
Tiempo entre intervenciones (Tbur _{ct})	730 días

Fuente: Pascual [2]

Se obtienen los siguientes valores resultantes, según muestra la Tabla 4-18

Tabla 4-18 Valores resultantes del cálculo según literatura (lit), la aplicación (app) y el directo (xls)

Bodega	n_u	k			Disp Local			Disp Global		
		Lit.	App.	xls	Lit.	App.	xls	Lit.	App.	xls
A	80	4	4	4	0,799	0,917	0,917	0,993	0,996	0,996
B	240	12	11	11	0,903	0,951	0,951	0,993	0,996	0,996
C	240	10	11	11	0,84	0,951	0,951	0,993	0,996	0,996
D	100	5	5	5	0,836	0,928	0,928	0,993	0,996	0,996
Total	660	31	31	31	0,845	0,9366	0,937	0,993	0,996	0,996

Fuente: Pascual [2] y cálculos propios

Llama la atención la diferencia entre las disponibilidades obtenidas por la aplicación y el cálculo directo frente a la bibliografía, sin embargo, esto corresponde a un error en la construcción en las tablas de probabilidades de la referencia, probablemente esto mismo genera la diferencia en la distribución de las unidades. De todas maneras, los resultados obtenidos son buenos. La comprobación definitiva podrá darse al enfrentar el modelo a situaciones reales.

4.2.5.2 Análisis de sensibilidad

Al igual que en 4.2.4, se trata de un problema de optimización multivariado, por lo que la sensibilidad se evaluara en función de un indicador resultante global, como lo es la disponibilidad global obtenida. Para mostrar los resultados, el programa genera una tabla en archivo Excel, el cual puede ser visualizado en el directorio donde está alojado el Script principal.

Considerando una oscilación del tiempo entre intervenciones no deseadas en el rango [700; 770] con una distribución triangular, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 4-19):

Tabla 4-19: Resultados de la optimización, sensibilidad a la oscilación del tiempo entre intervenciones. Elaboración propia.

Tiempo entre intervenciones no deseadas [ut]	Base Nº	# Elementos	Conf Local [%]	Conf Global [%]
730	1	4	91,61	99,31
	2	8	91,97	
	3	3	90,29	
	4	10	90,81	
	5	5	92,80	
710,02	1	4	90,83	99,01
	2	7	85,51	
	3	3	89,53	
	4	10	89,54	
	5	5	92,03	
760,1	1	4	92,64	99,41
	2	8	92,40	
	3	3	91,30	
	4	10	92,56	
	5	5	93,81	

La variación obtenida es muy sutil, pero afecta principalmente las disponibilidades locales: a menor tiempo entre intervenciones no deseadas, menor es la confiabilidad obtenida por base asociada.

Tabla 4-20: Resultados de la optimización, sensibilidad a la oscilación del tiempo entre intervenciones. Elaboración propia.

Tiempo entre intervenciones no deseadas [ut]	Base Nº	# Elementos	Conf Local [%]	Conf Global [%]
730	1	7	90,47	99,2
	2	14	89,67	
	3	6	93,83	
	4	18	89,30	
	5	8	87,16	
705,2	1	7	89,00	99,0
	2	14	87,36	
	3	5	86,96	
	4	17	87,11	
	5	8	86,63	
761,6	1	7	92,05	99,3
	2	14	92,03	
	3	6	94,07	
	4	19	91,29	
	5	9	92,75	

La variación del tiempo medio de reparación, tiene una influencia principalmente en la disponibilidad local obtenida. Por ejemplo, duplicando dicho tiempo (para el caso del ejemplo, $T_{at}= 42$) se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4-20. La disponibilidad global permanece relativamente estable respecto del caso base.

4.2.6 Modelo para componentes a fallo seguro

4.2.6.1 Validación contra herramienta de cálculo

En este caso, el algoritmo considera distribuciones de probabilidad de vida de los componentes de tipo Weibull, con parámetros $\beta= 0.2$ y $\eta= 200$, para ambos componentes. El resto de los valores considerados son presentados en la Tabla 4-21

Tabla 4-21 Parámetros de evaluación de modelo de redundancia

Parámetro	Unidad	Valor
CP1	um	20.000
CP2	um	20.000
COe	um	1.000
Con	um	400
Le	días	42
Ln	días	60
Kh2	um	80
Kr1	um	700
Kr2	um	700
A		0.999

Fuente: Rongbing Hu y Jun Xie [16]

Los resultados obtenidos se comparan directamente con los de la publicación de referencia. Los parámetros de la simulación de algoritmo genético son

- Probabilidad de Cruce 0.85.
- Probabilidad de mutación 0.1
- Tamaño de población 50
- Generaciones Máximas 60

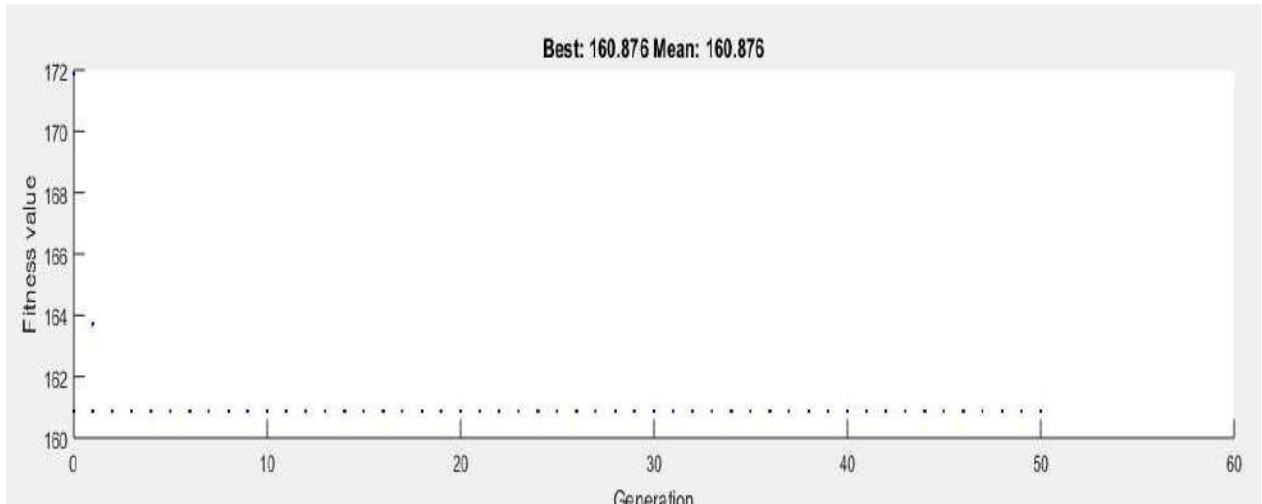


Ilustración 4-47: Resultados de simulación para equipos en redundancia. Elaboración propia

Los resultados obtenidos mediante algoritmo genético son consistentes con los obtenidos en la literatura, es decir un costo óptimo de 160.876 um cada 370 unidades de tiempo, sin embargo, se obtuvo la misma solución óptima para 938 unidades de tiempo: esto ocurrió al modificar los límites para el tiempo donde el algoritmo genético podía generar puntos de solución. Al disminuir progresivamente el límite superior para T, se logró la convergencia a T= 370.

El tiempo de cálculo requerido para esta optimización en MATLAB, replicando las de la bibliografía tomó un tiempo cercano a los 3300 segundos, excesivo si se considera montar este servicio en una aplicación web.

4.2.6.2 Análisis de sensibilidad

A pesar de los resultados obtenidos para la función objetivo (costo) y el valor del tiempo en el óptimo, otros resultados, como la disponibilidad obtenida tenía sutiles diferencias respecto de la bibliografía de referencia. Al graficar la función de costo se aprecia lo siguiente (Ilustración 4-48).

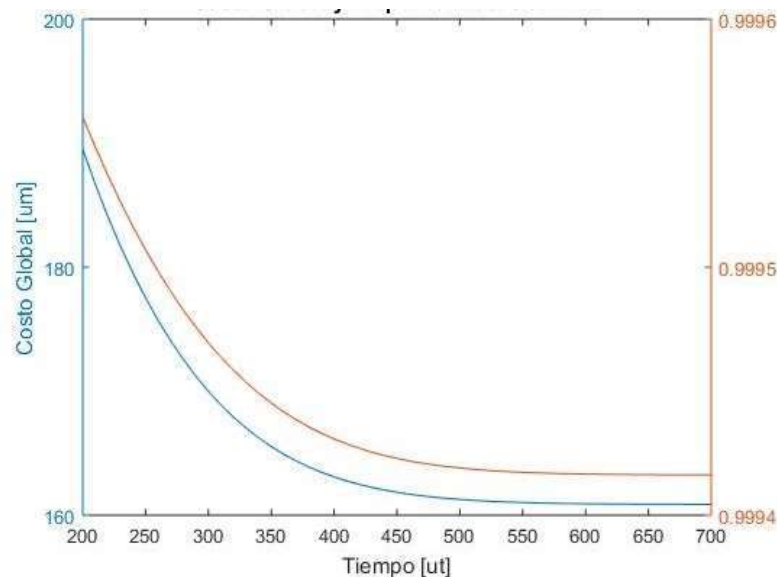


Ilustración 4-48 Costo Global y Disponibilidad Obtenida. Elaboración propia.

Esto muestra que lógicamente, mientras mayor sea el límite para T entregado al algoritmo para resolver, éste tenderá a quedarse en el extremo, pues un costo de almacenamiento de 80, el costo de almacenar en un periodo de por ejemplo, 370 unidades de tiempo será mayor a la compra de un equipo nuevo (29.600 [um] almacenar vs 20.000 [um] de la compra), por ende, conviene siempre dejar que el equipo falle y solicitar la compra de uno nuevo, pues no es rentable mantenerlo en inventario y el intervalo de reemplazo programado tiende a alejarse lo más posible.

Ahora bien si se cambia el costo de almacenamiento a 8 um/ut, el grafico cambia a lo que sigue (Ilustración 4-49)

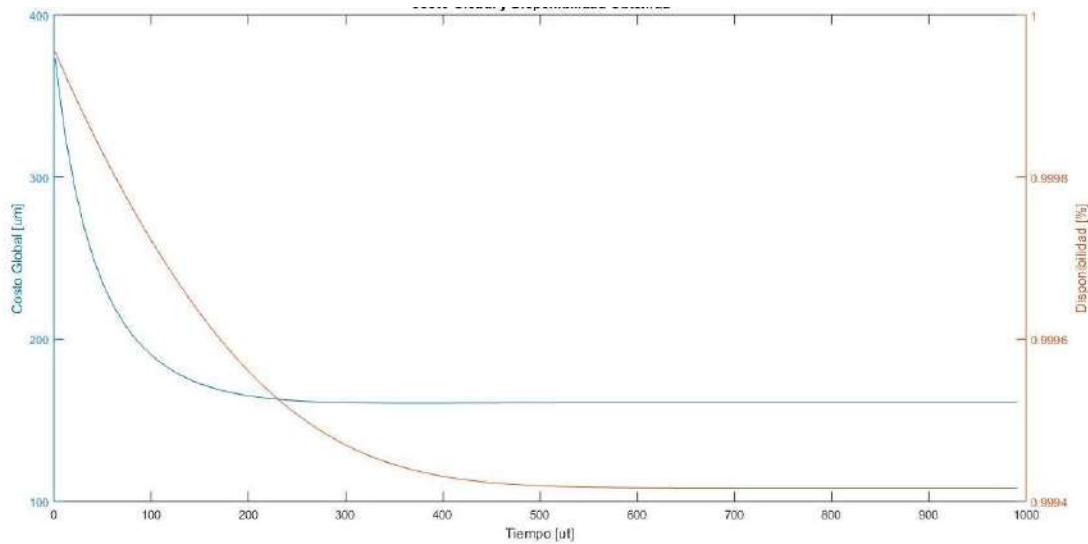


Ilustración 4-49 Costo global y disponibilidad obtenida, costo de almacenamiento 8 [um]. Elaboración propia

Pareciera ser plano, pero efectivamente hay un mínimo en las 370 unidades de tiempo, lo que indica el paper. Si gráficamente se centra el grafico en torno a este óptimo se distingue el mínimo de la función

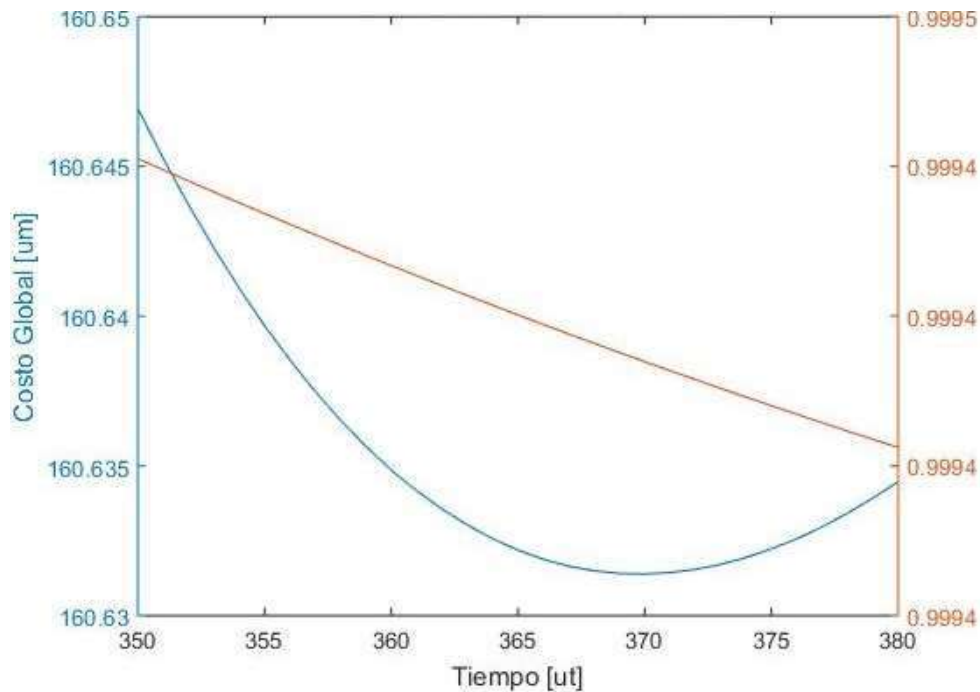


Ilustración 4-50: Costo global y disponibilidad obtenida, costo de almacenamiento 8 [um] (centrado en el óptimo). Elaboración propia

Las diferencias del cálculo directo frente a la publicación desaparecen por completo al utilizar este valor para el costo de almacenamiento. Es posible concluir a partir de ello dos cosas: la primera, que la publicación tiene un error respecto de la constante publicada y que, para obtener los resultados que se indican, el costo de almacenamiento de la segunda unidad debe ser 8 unidades y no 80 y en segundo lugar, que la curva es particularmente sensible a este componente del costo global. Otros resultado se muestra en la Ilustración 4-51. En ella, se puede comprobar que a medida que el costo de almacenamiento disminuye, la relación entre el costo de reposición y el almacenamiento se va compensando, acentuando la curva en el óptimo.

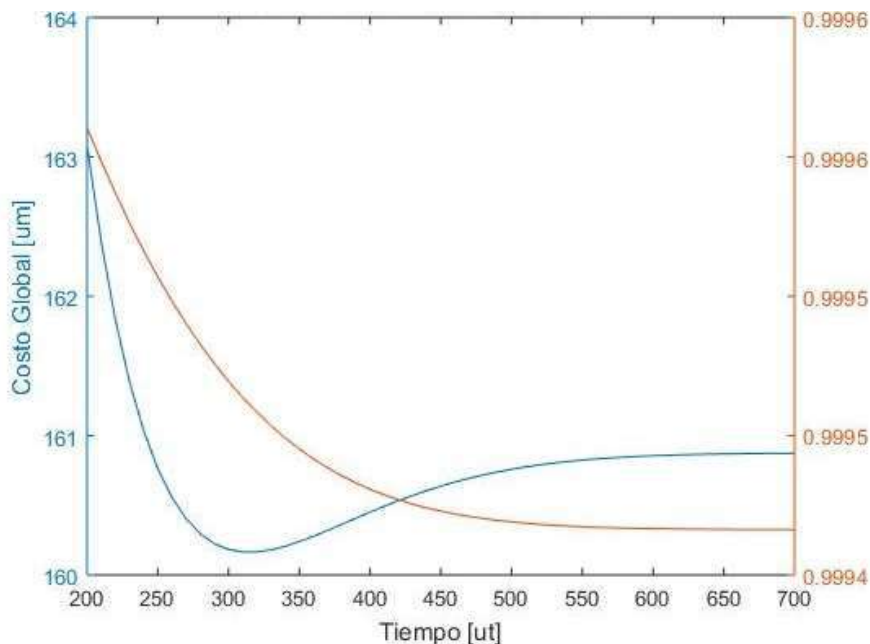


Ilustración 4-51: Costo global y disponibilidad obtenida, costo de almacenamiento 2 [um] (centrado en el óptimo). Elaboración propia

4.2.7 Inventario de componentes críticos de baja demanda

4.2.7.1 Demanda Aleatoria

El modelo considera que la demanda sigue una distribución de Poisson. En este caso, se considera incorporar aleatoriedad al tiempo de entrega T , para efectos de simulación. Los parámetros utilizados como referencia se muestran en la Tabla 4-22

Tabla 4-22: Parámetros para el modelo de demanda aleatoria

Variable	Notación	Valor	Unidades
Tasa de demanda	λ	30	u/ut
Tiempo de entrega	T	1	ut
Costo de almacenamiento	H	1	um/ut
Costo de falla	L	10000	um

Fuente: Smith [17]

4.2.7.1.1 Validación contra herramienta de cálculo

Los resultados en la Ilustración 4-52. Allí se muestra el nivel de inventario requerido en función del tiempo de entrega del repuesto.

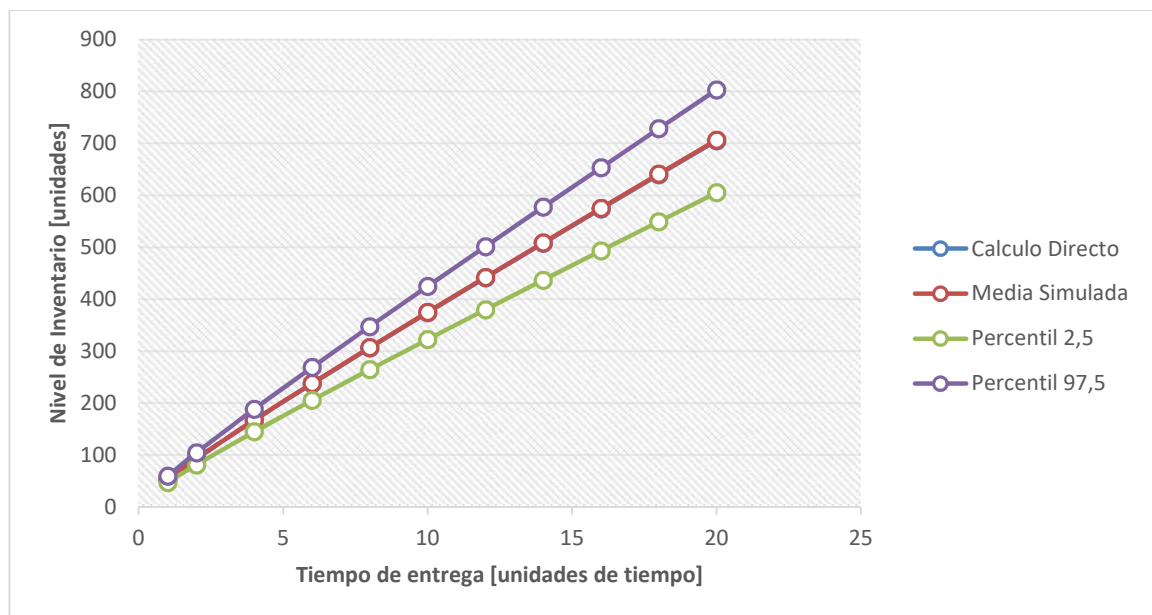


Ilustración 4-52: Resultados del modelo de Demanda aleatoria. Fuente: elaboración propia.

Si bien es cierto las curvas se ajustan en la media, la dispersión de los datos aumenta junto con el tiempo de entrega. Esto es probable consecuencia del aumento de la incertidumbre asociada al mayor nivel de retraso. Otra consecuencia es el aumento directo del nivel de inventario requerido.'

4.2.7.1.2 Análisis de sensibilidad

Considerando una variación triangular en el intervalo $[0.5; 2]$ para el tiempo de demora en la entrega (τ), se obtiene el resultado de la Ilustración 4-53. Las curvas tienen una geometría similar, pero se ven influenciados por la variación en el tiempo de espera (τ): a menor sea este, menor es el nivel de inventario requerido, pues el modelo reconoce que la probabilidad de tener un quiebre disminuye por la disponibilidad próxima de repuestos.

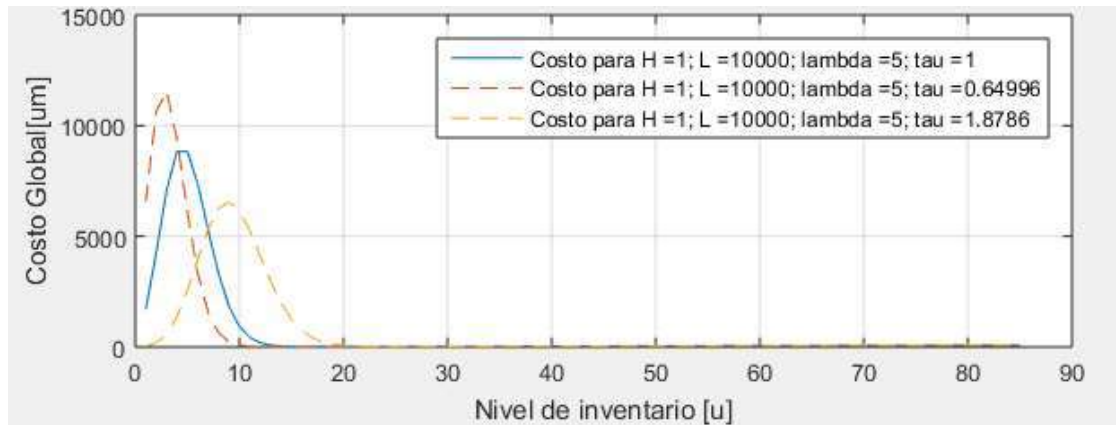


Ilustración 4-53 Costo global para demanda aleatoria, sensibilidad a la variación del tiempo de entrega. Elaboración propia

Al igual que otros casos el modelo y en consecuencia la programación, es bastante sensible a la relación existente entre el costo de penalización por falla (L) y el costo de almacenamiento (H). La variación de la curva para distintas relaciones de L/H se muestran en la Ilustración 4-54 a Ilustración 4-56

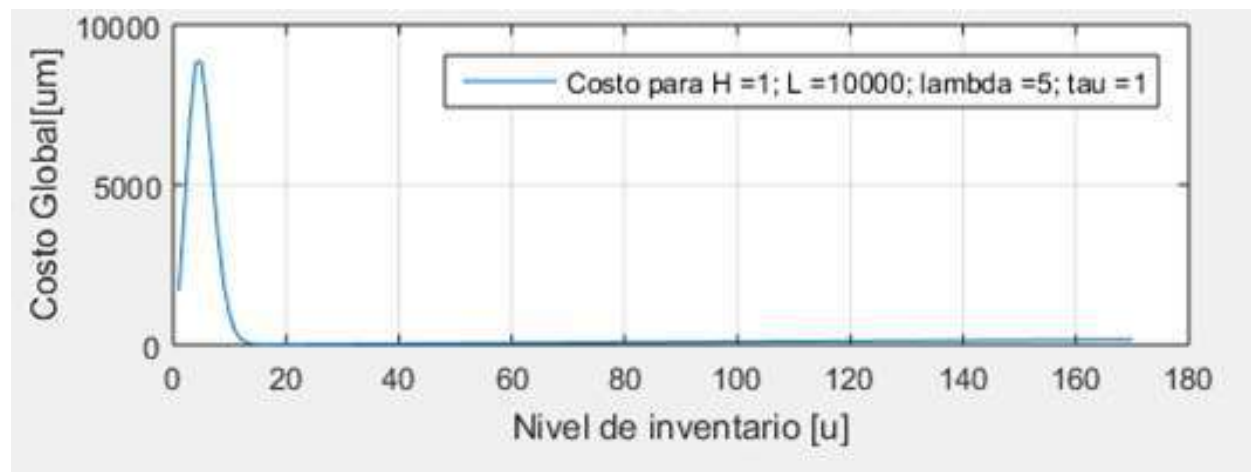


Ilustración 4-54 Costo Global con demanda aleatoria, $L/H=10.000$. Elaboración propia.

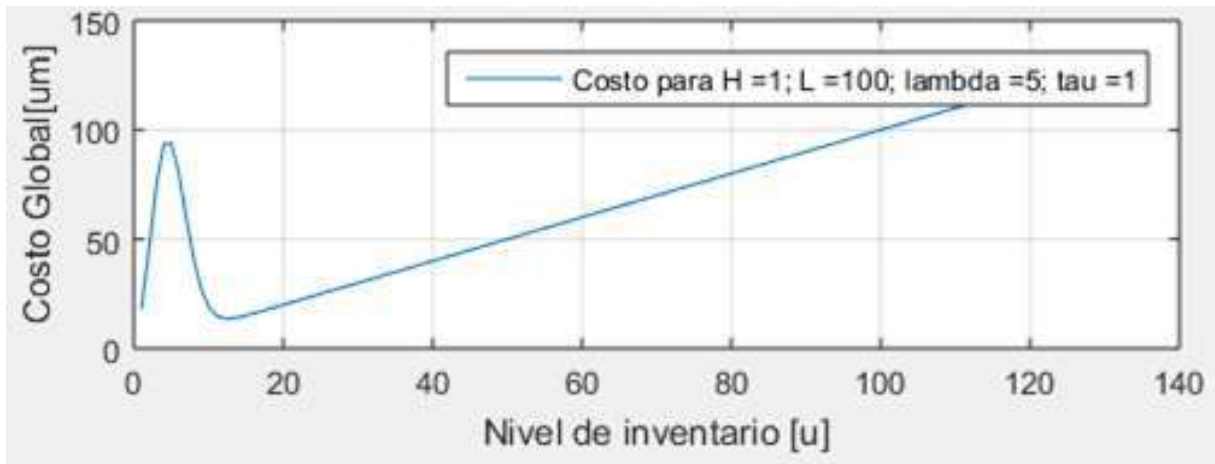


Ilustración 4-55: Costo Global con demanda aleatoria, $L/H=100$. Elaboración propia.

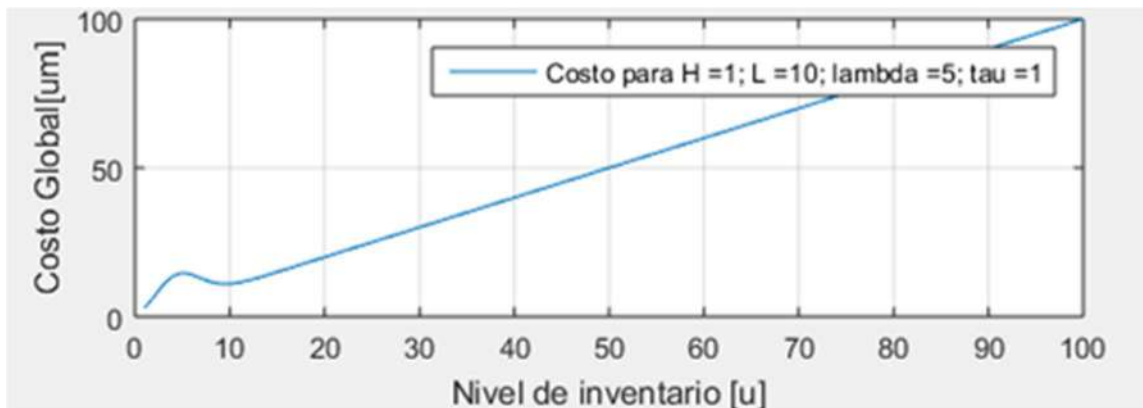


Ilustración 4-56 Costo Global con demanda aleatoria, $L/H=10$. Elaboración propia.

Si bien pareciese que existe un óptimo cada vez más cercano a cero a medida que disminuye el valor de L/H , el valor del peak de la zona cóncava esta siempre cercana a la demanda media por unidad de tiempo: el algoritmo de cálculo programado ignora todos los resultados menores a este valor, bajo la premisa de que como mínimo se debe garantizar el cubrir la demanda media. Así pues, en general, la curva de costo global tiene a la linealidad a partir del costo mencionado.

4.2.7.2 Demanda Intermitente

El modelo de Croston ajusta la demanda histórica y prevé en base a ello la demanda en el período; por tal motivo se diferencia de los modelos anteriormente presentados, ya que como variable de entrada requiere necesariamente un historial de demandas. Además de ello, el modelo es sensible al factor de suavización α y β utilizado, los cuales se encuentran típicamente entre 0 y 1. Para el ejercicio, se utiliza un valor de 0.3 y 0.2 respectivamente para dichos factores.

Los datos históricos utilizados se muestran en la tabla Tabla 4-23

Tabla 4-23: Datos de demanda histórica intermitente utilizados

Periodo	Demanda	Periodo	Demanda
1	0	13	0
2	0	14	0
3	19	15	3
4	0	16	0
5	0	17	0
6	0	18	19
7	4	19	0
8	18	20	0
9	17	21	0
10	0	22	5
11	0	23	4
12	0	24	5

Fuente: Vasumathi & Sarada [20]

4.2.7.2.1 Validación contra herramienta de cálculo

El resultado de la modelación se aprecia en la Ilustración 4-57. Allí, se aprecia que el modelo se comporta de mejor manera cuando las demandas son cercanas (en tiempo) entre sí. Es posible que se requiera perfeccionar el método para optimizar el factor de suavización y lograr una menor diferencia entre lo predicho y lo real. Una buena alternativa es considerar como función objetivo de minimización el error cuadrático medio, pues se trata de una buena herramienta de medir el error entre mediciones [20]

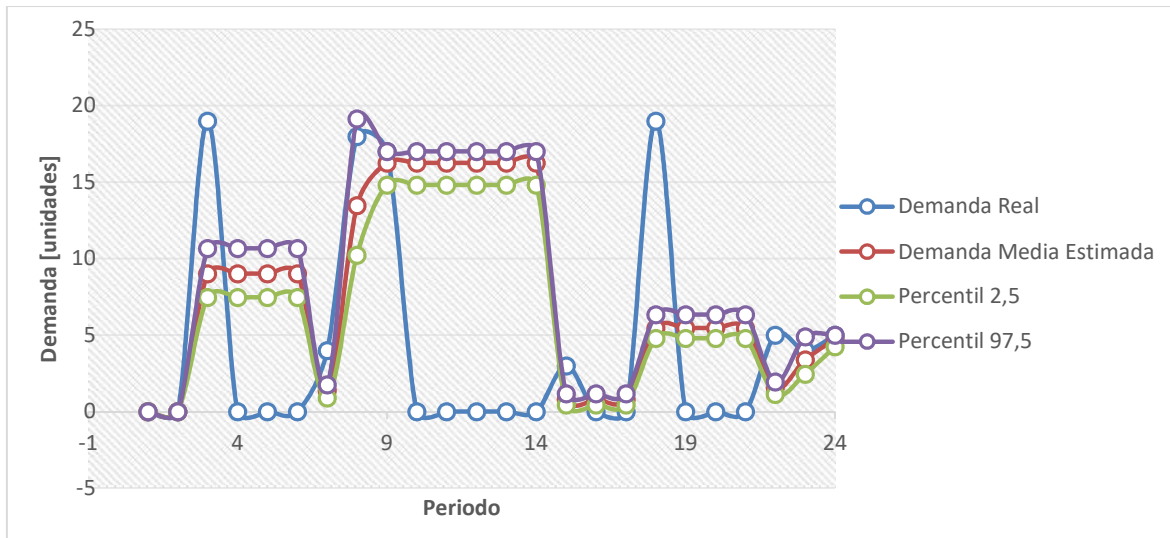


Ilustración 4-57: Resultado del modelo predictivo de Croston. Fuente: elaboración propia con un factor de suavización alfa 0.3. y beta 0.2

4.2.7.2.2 Análisis de sensibilidad

El modelo de Croston es por definición sensible a la elección de los parámetros de suavización. El modelo programado refleja dicha situación.

Se evalúa la sensibilidad del modelo ante la variación del parámetro alfa según una distribución triangular con límites [0.2; 0.7]. El grafo resultante de la suavización se muestra en la Ilustración 4-58

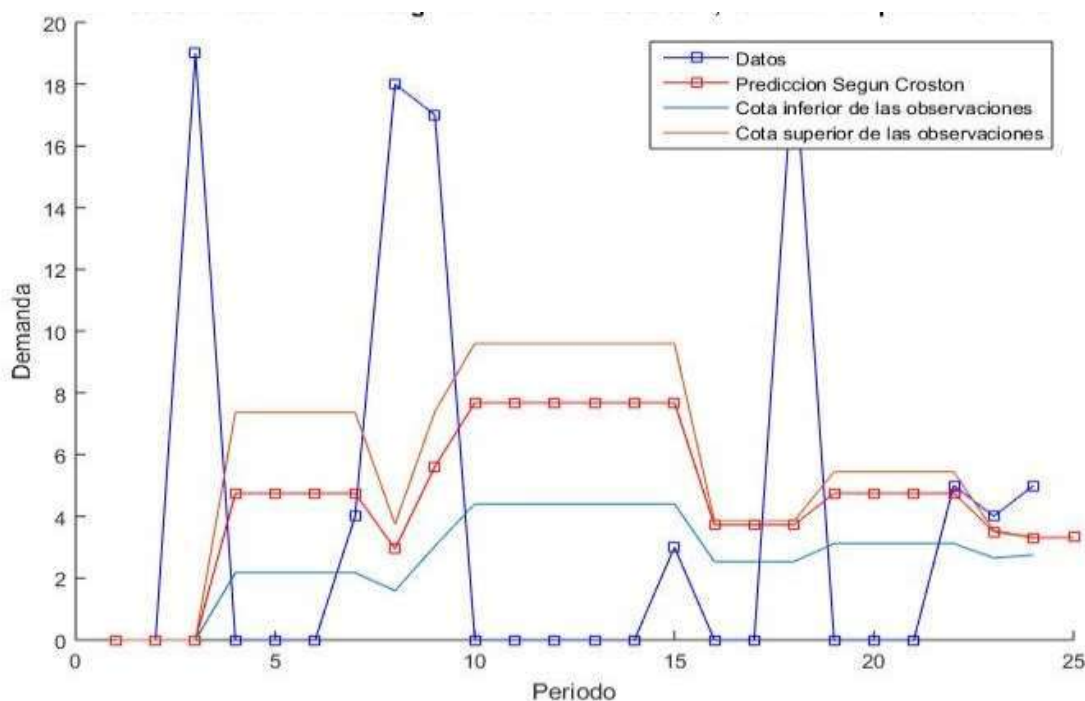


Ilustración 4-58 Modelo de Croston, sensibilidad a la variación del parámetro alfa. Elaboración propia

Mientras más cercano a 0 se encuentre el valor de alfa, la curva de predicción tiende a acercarse a un valor semi constante, moderado solo por el valor de beta y viceversa. Por el otro extremo, al acercarse a 1 el factor, la curva de predicción adopta una figura más cercana a la de los datos reales, de ahí que ambos factores actúen como moderadores de los peak de demanda.

4.3 Validación de los modelos contra casos reales.

Se consideran los repuestos seleccionados en 4.1.6 como candidatos para validar los resultados de los modelos. Según las condiciones de cada uno, se realiza la selección final y se aplica el modelo según corresponda.

4.3.1 Demanda con demora en los pedidos

Repuesto: Mts. Flexible (g) de 1 x 3 m

Grupo: 2

Periodo Marzo 2013 a junio 2014

Parámetros

Nivel de alerta	6 unidades
Frecuencia Media	6.13 unidades/mes
Demora media	0,6 meses

Se realiza un test de Chi- cuadrado en MATLAB para verificar la hipótesis de una demanda de Poisson del repuesto, obteniendo los siguientes resultados (un valor $h = 0$ considera válida la hipótesis nula de que el repuesto sigue una distribución de Poisson de Media Lambda):

```
h = 0

p = NaN

st =
    chi2stat: 15.0851
         df: 0
      edges: [-0.5000 7.5000 19.0000]
           O: [5 5]
           E: [1.4054 1.7704]
Poisson distribution
lambda = 6.13 [6.43257, 10.0676]
```

Los datos del histórico considerados son los que figuran en la tabla Tabla 4-24.

Validados los requerimientos del modelo, los resultados son los mostrados en la Tabla 4-25, donde con un nivel de alerta de 6 unidades, la confiabilidad de la bodega debiese estar en torno al 88%, con una oscilación entre un 85,31% y un 90,76%

Tabla 4-24: Datos de histórico para Mts. Flexible (g) de 1 x 3 m.

Año	Mes	Demanda	Lead time (días)	Lead time (mes)
2013	3	2,00	19	0,63
2013	4	5,00	51	1,70
2013	5	0,00	0	0,00
2013	6	8,00	39	1,31
2013	7	2,00	24	0,80
2013	8	0,00	0	0,00
2013	9	7,00	32	1,08
2013	10	16,00	37	1,23
2013	11	13,00	44	1,46
2013	12	0,00	0	0,00
2014	1	18,00	21	0,71
2014	2	0,00	0	0,00
2014	3	1,00	7	0,23
2014	4	18,00	5	0,18
2014	5	0,00	0	0,00
2014	6	8,00	0	0
	Promedio	6,13	17,51	0,6

Fuente: Elaboración propia.

Si comparamos dicha política con la demanda real, considerando un Stock inicial de 15 unidades, se obtienen los resultados de Ilustración 4-59

Tabla 4-25 Resultados para $q_a=6$, $\lambda=6,1$, elaboración propia

i	Lead Time (Td)		
	0,56	0,62	0,68
1	11,10%	8,42%	6,33%
2	30,14%	24,48%	19,60%
3	51,92%	44,88%	38,15%
4	70,60%	64,33%	57,59%
5	83,42%	79,16%	73,91%
6	90,75%	88,58%	85,31%
7	94,35%	93,72%	92,14%
8	95,89%	96,16%	95,72%
9	96,48%	97,20%	97,39%

Fuente: Elaboración propia.

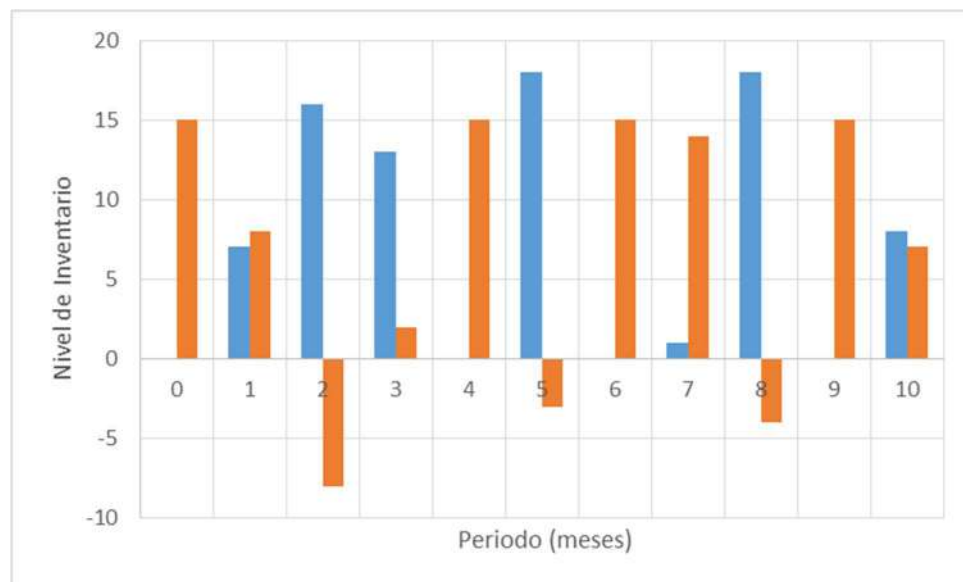


Ilustración 4-59 Comparación de datos reales contra pronóstico del modelo, Stock inicial 15 unidades

Es decir, en un total de 10 meses, hubo 3 quiebres de inventario, lo que en términos de unidades totales equivale a una confiabilidad aproximada de un 80%. El resultado es menor a lo pronosticado, pero puede responder a que el modelo no es capaz de absorber peaks de demanda muy altos, por sobre el nivel de inventario inicial. Si se aumenta el nivel de inventario inicial al máximo histórico (18 unidades) se obtiene la Ilustración 4-60

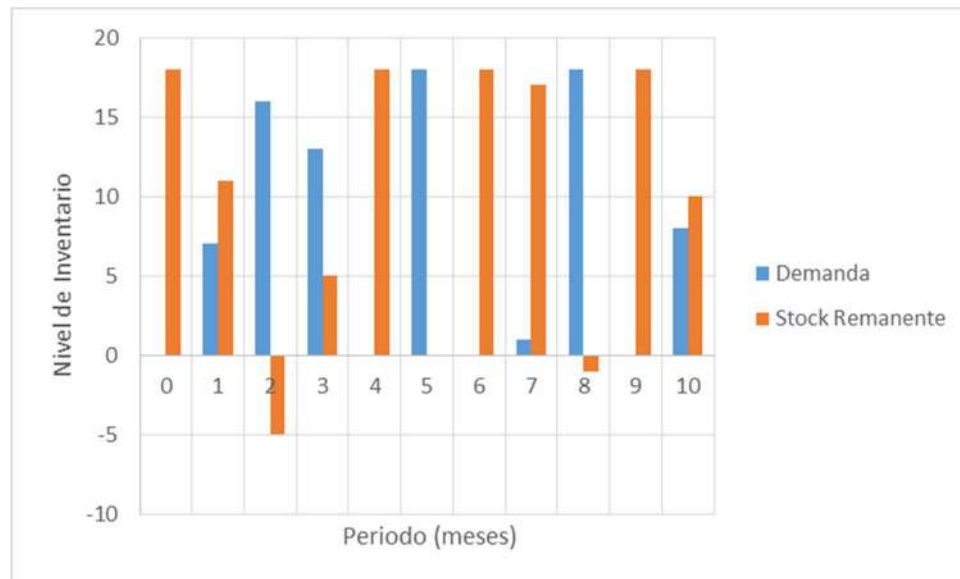


Ilustración 4-60 Comparación de datos reales contra pronóstico del modelo, Stock inicial 18 unidades

En este caso, se obtienen dos quiebres de inventario, lo que en unidades totales se traduce en un 90% de confiabilidad, más cercano a lo pronosticado por el modelo.

Con estos datos, es factible suponer que el modelo es altamente sensible al stock inicial seleccionado

4.3.2 Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

Repuesto Mts. Flexible (g) de 3/8 x 0.90 ml
 Grupo 2
 Periodo Octubre 2013 a junio 2014¹⁴

Los datos del histórico considerados son (Tabla 4-26)

Tabla 4-26 Datos de histórico para Mts. Flexible (g) de 3/8 x 0.90 ml.

Año	Mes	Demanda
2013	10	10
2013	11	9
2013	12	0
2014	1	10
2014	2	0
2014	3	4
2014	4	6
2014	5	4
2014	6	0
	Promedio	5

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ Se escoge dicho período al analizar la demanda específica del insumo.

Parámetros

Tasa media de fallas	5 fallas/mes
Precio Unitario	\$ 13.024
Tasa de descuento	15%
Costo de realizar un pedido ¹⁵	\$1.527
Periodos entre Intervenciones planificadas	3,2 mes
Repuestos requeridos por overhaul	1 unidades
Repuestos requeridos por intervención	1 unidades

Los resultados para el modelo de acuerdo a la ecuación 3.19 son

Tamaño de pedido (Q_{wi})	2 unidades
Frecuencia de pedido (T_{wi})	0,4 meses

Con dicho resultado, se obtiene la Ilustración 4-61

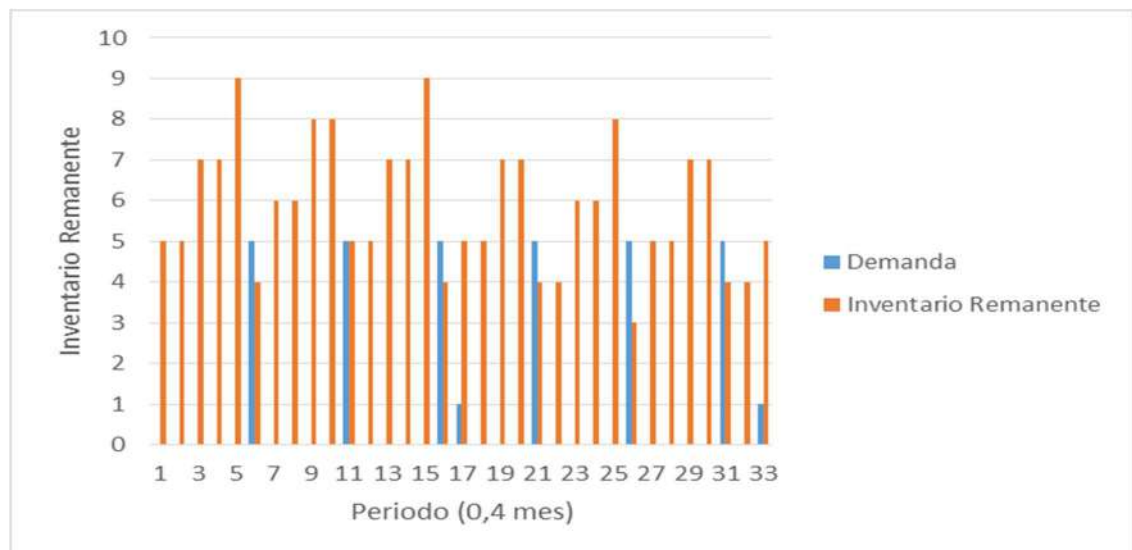


Ilustración 4-61: Comparación de datos reales contra pronóstico del modelo, Stock inicial 5 unidades

El modelo permanece en un estado de sobre inventario, sin quiebres, lo que no es perjudicial en términos de costo dado el relativo bajo valor del repuesto.

4.3.3 Minimización del costo global con costo de falla

Repuesto	Tubería aceite a5411801422
Grupo	1
Periodo	Enero 2013 a Marzo 2014
Se considera que todos los repuestos son consumidos al llegar a la bodega	

Los datos del histórico considerados son

¹⁵ Este costo se estima con base en la remuneración aproximada del comprador asignado a la faena y la cantidad de pedidos mensuales realizados en el periodo. No es posible presentar el valor de dicha remuneración en el presente trabajo.

Tabla 4-27 Datos de histórico para Tubería aceite a5411801422.

Año	Mes	Demanda
2013	1	6
2013	2	5
2013	3	-
2013	4	6
2013	5	2
2013	6	9
2013	7	3
2013	8	-
2013	9	3
2013	10	4
2013	11	-
2013	12	4
2014	1	-
2014	2	5
2014	3	-
	Promedio	3,1

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros

Costo de adquisición	\$ 1.527
Demanda media	3,1 unidades/mes
Precio unitario	\$ 34.531
Tasa de descuento	0,15
Costo de falla ¹⁶	\$26.796.000

Recurriendo a las ecuaciones 3.23 y 3.24, se obtiene que:

Tamaño de pedido (Qopt)	2 unidades
Frecuencia de pedido (Topt)	0,6 meses (19 días)

Graficando la política propuesta se obtiene la Ilustración 4-62.

El inventario sufre dos quiebres en un lapso de 7 meses, para posteriormente permanecer en un estado de sobre inventario, sin quiebres, influenciado por los peaks de consumo observados al inicio.

¹⁶ Valor estimado con base en el precio del mineral transportado por los camiones, con un 100% de disponibilidad mensual

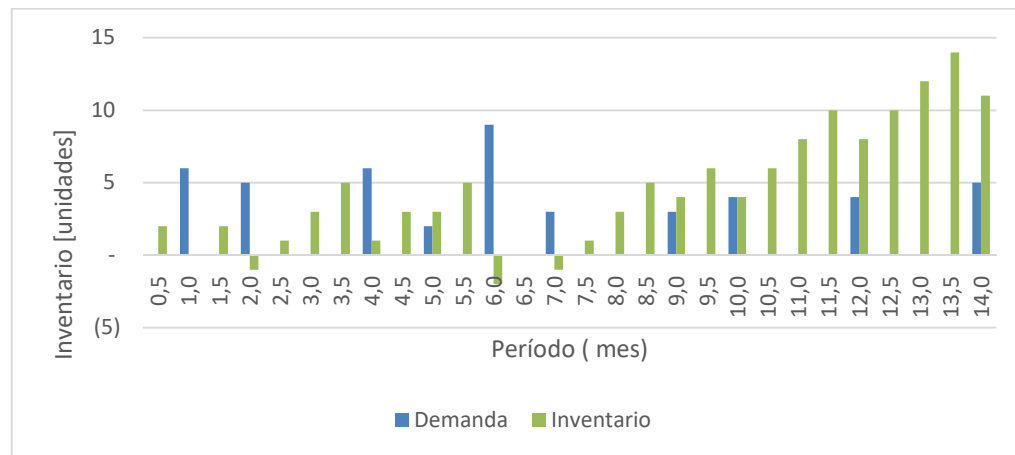


Ilustración 4-62 Comparación de datos reales contra pronóstico del modelo, Stock inicial 0 unidades

4.3.4 Compras agrupadas

Repuestos Kit embrague a007250440494
 Pinon rueda dentada a9452625617
 Bomba aceite caja cambio a389260069011
 Cono sincronizador a9472600545
 Grupo 1 y 2
 Período Enero 2013 a Mayo 2014

Los datos del histórico considerados son mostrados en la Tabla 4-28

Tabla 4-28 Datos de histórico para 4 repuestos

		Demanda			
Año	Mes	Kit embrague a007250440494	Piñón rueda dentada a9452625617	Bomba aceite caja cambio a389260069011	Cono sincronizador a9472600545
2013	1	1	-	0	-
2013	2	-	1	1	2
2013	3	1	-	0	-
2013	4	-	1	1	2
2013	5	-	-	0	-
2013	6	-	-	0	-
2013	7	1	1	1	2
2013	8	1	-	0	-
2013	9	-	-	0	-
2013	10	1	-	1	-
2013	11	-	2	1	2
2013	12	-	-	0	-
2014	1	1	1	0	2
2014	2	-	-	0	-
2014	3	-	1	0	2
	Promedio	0,4	0,5	0,3	0,8

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros

Costo Transporte ¹⁷	\$240.000
Tasa de Descuento	0,15
Cantidad de Ítems	4
Costo de Adquisición	\$1.527; \$1.527; \$1.527; \$1.527
Demanda media	0,4; 0,5; 0,3; 0,8 unidades/mes
Costo de almacenamiento	\$104.516; \$31.753; \$14.956; \$9.650
Precio Unitario	\$696.773; \$211.689; \$99.707; \$64.333

Con estos valores, se realiza la optimización considerando como restricciones que la proporción de compra de cada elemento (k_i) debe ser entera positiva y la fracción de tiempo (T) debe ser real positiva, obteniéndose los siguientes resultados de acuerdo a la ecuación 3.29

Tabla 4-29 Resultados de la optimización mixta del problema.

I	1	2	3	4
K	1	1	1	1
T(mes)	2,66			
Costo Global (\$/ mes)	\$ 184.731			

Fuente: Elaboración propia.

Es decir, el resultado de la optimización mixta indica que se deben comprar 1 unidad de cada repuesto cada 2,7 meses, de forma tal de minimizar el costo global distribuido. La situación comparativa, es decir realizar las compras sin la agrupación significaría, para cada producto, lo siguiente

Tabla 4-30 Situación de compra sin agrupación. Elaboración propia

i	1	2	3	4
Qwi (unidades)	2	3	4	7
Twi (mes)	5,0	6,4	12,0	8,8

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar a simple vista que tan solo considerando el costo de despacho individual, se genera inmediatamente un ahorro mensual, dada la frecuencia de los pedidos.

4.3.5 Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación

Para realizar el ejercicio, se solicitó información adicional, respecto de faenas de BSM en las cuales se utilizara modelos similares de camión, de forma tal de poder encontrar algún repuesto común que permitiese considerar la consolidación de bodegas. Además se incluye, para este caso, al grupo 3, para aumentar el número de unidades disponibles en el análisis. En tal situación, se consideran 3 faenas, cuyos equipos utilizan el mismo tipo de transmisión según el siguiente resumen.

¹⁷ Dato de envío terrestre promedio por unidad pallet, considerando los repuestos seleccionados. Fuente: faena.

Modelos de Camión: Mercedes Benz Actross 3351, 3344, 3336, 2636
Ubicación Faenas: Iquique, Copiapó y Los Ángeles
Unidades por faena: 47, 15, 55.
Repuesto: Caja g330 Powershift
Grupo: 1, 2, 3
Periodo enero 2013 a mayo 2014

Parámetros

Tabla 4-31 Parámetros de modelación de consolidación de pedidos

Cantidad de bases		3		
tasa de uso	eta	1	adim	<i>Ref: Mantenimiento empresa indica un uso del 100%</i>
Tiempo entre rep no Planificadas	Tbur	1,5	Mes	<i>Ref: Mantenimiento empresa indica una falla cada 6 semanas</i>
Tiempo entre rep no Planificadas proporcional	Tburg	1,5	Mes	
unidades instaladas	N_u	117	un	<i>Flota total</i>
Tiempo fuera de servicio	Tat	0,73		<i>Ref: Mantenimiento empresa indica un tiempo aproximado de reparación de 0,23 mes y la demora del repuesto promedio es de 0,50 mes</i>
Confiabilidad local solicitada	Eta_l	80%		<i>Ref: Mantenimiento empresa</i>
Confiabilidad global requerida	Eta_glob	90%		<i>Ref: Mantenimiento empresa</i>

Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros impuestos al modelo, se realiza el cálculo directo vía Excel y el modelo: los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 4-32

Tabla 4-32 Resultados obtenidos considerando consolidación de repuestos

Faena	Unidades		Stock		Confiabilidad local		Confiabilidad global	
	Ap.	XLS	Ap.	XLS	Ap.	XLS		
Iquique	47	47	27	27	83.5%	83.2%		
Copiapó	55	55	10	10	87.9%	87.7%		
Los Angeles	15	15	31	31	82.2%	82.1%		
Total Unidades	117	117	68	68			93.4%	93.3%

Fuente: Elaboración propia.

Lo apreciable en la Tabla 4-32 es que no existen mayores diferencias entre el cálculo directo y lo obtenido mediante el programa. De todas maneras, para obtener las disponibilidades requeridas, el número de unidades necesarias es alto considerando el valor unitario de cada una (\$2.100.000 aproximadamente). El ejercicio sin embargo es válido para componentes menores de la caja, que sí pudiesen compensar el costo de almacenamiento versus el costo económico de la falla. Sin embargo, considerando sólo lo planteado, pareciera ser conveniente no realizar el almacenamiento en común para el repuesto.

4.3.6 Modelo para componentes a fallo seguro

Para el estudio de caso, no se encontraron componentes en redundancia en los equipos en estudio. Se recurre sin embargo al historial de los equipos de soporte de energía de una faena de chancado en la zona de Copiapó, perteneciente a la misma empresa. Las características del equipo son:

Equipo:	Generador autónomo Cummins
Modelo:	C1100 D5
Frecuencia:	50Hz
Combustible:	Diesel
kVa:	1000
Período:	Enero 2013 a diciembre 2015
Repuesto:	Radiador

El generador cuenta con dos radiadores, el principal y el de respaldo. El radiador de respaldo inicia su uso ante la falla del principal. Las principales causas de falla informadas son roturas de mangueras o golpes provocados por piedras de la faena. El primer radiador, de fallar, siempre es reparado o reemplazado. El segundo es retirado y revisado quedando como repuesto Stand by para otro ciclo para cualquier generador de la flota. Se considera el historial conjunto de solicitud de repuesto y de reparación con terceros. Los parámetros de Weibull estimados son $\beta = 2$ y $\eta = 200$ para el primer equipo y $\beta = 2.5$ y $\eta = 250$ ¹⁸.

Los parámetros requeridos para el modelo son los que figuran en la Tabla 4-33.

Tabla 4-33 Parámetros de cálculo para radiador Generador 1000 kVa

Parámetro	Unidad	Valor
CP1	\$	300.000
CP2	\$	300.000
COe	\$	3.000
Con	\$	2.110
Le	Días	7
Ln	Días	15
Kh2	\$	2.500
Kr1	\$	22.000
Kr2	\$	22.000
A		0.95

Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por BSM

El modelo intrínsecamente simula diversos escenarios de acuerdo a la estimación del tiempo de vida de los equipos. Se utilizan los siguientes parámetros en la simulación de algoritmo genético (por defecto dentro del modelo) son los siguientes.

Numero de Variables	1 (Tiempo de recambio o revisión preventiva, T)
Restricciones	$T > 0$
Probabilidad de Cruce	0.85

¹⁸ Los parámetros son provistos por la empresa propietaria de las maquinas (BSM)

Generaciones Máximas	10^{19}
Función de selección	Roulette
Probabilidad de Mutación	0.1

El resultado entregado por MATLAB puede apreciarse en la Ilustración 4-63

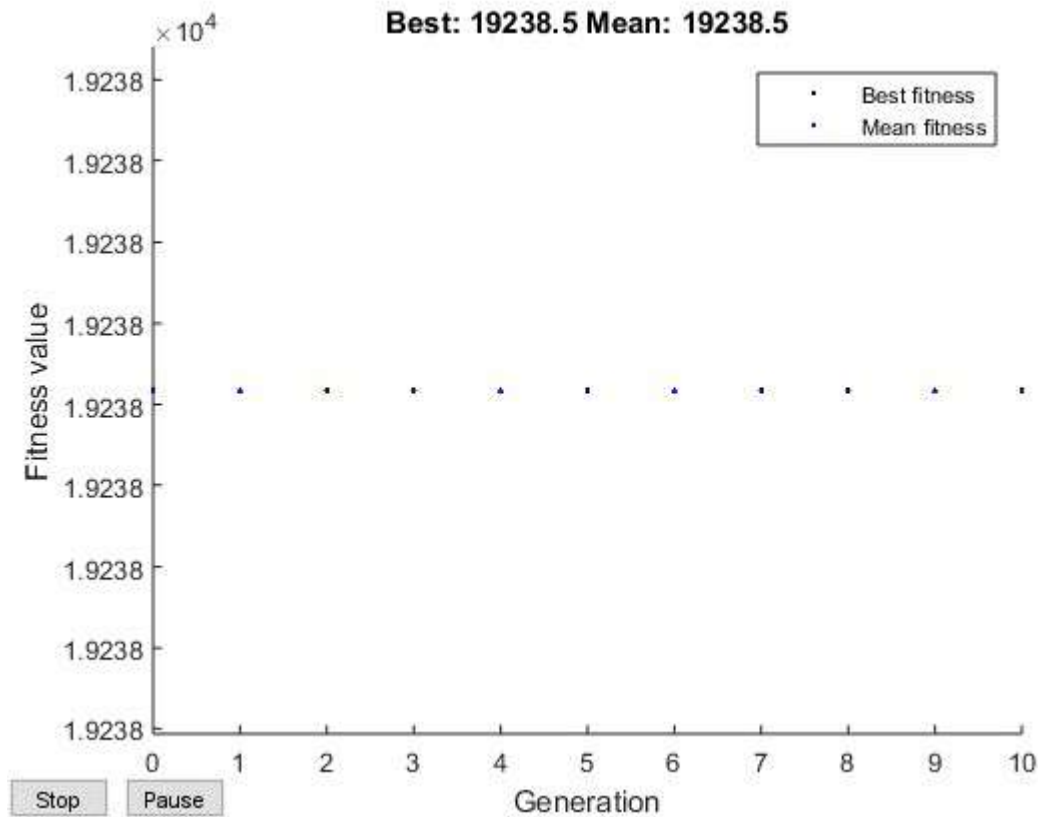


Ilustración 4-63: Resultado de la simulación de la aplicación. Elaboración propia

Se entrega entonces que el costo óptimo de la operación es \$19.238, con una revisión cada 2 días. Ahora bien, esto contrasta con los datos entregados por BSM, donde se registran cerca de 5 pedidos de repuestos en el periodo de un año. Probablemente se deba a los factores de Weibull considerados, los cuales tienen base en el historial completo de falla, mientras que las solicitudes son un universo sesgado de los requerimientos del equipo. Otro punto a favor de esta hipótesis es el hecho que el costo estimado es incluso menor que el costo residual de los equipos. El otro potencial causal es la restricción de disponibilidad impuesta (95%), quizás inalcanzable para el sistema.

4.3.7 Inventario de componentes críticos de baja demanda

4.3.7.1 Demanda Aleatoria

Repuesto Kit embrague a007250440494

¹⁹ Se disminuyen las generaciones por defecto de 60 a 10 por el tiempo de cálculo requerido (3 horas para 60 generaciones aproximadamente), ya que en todos los ensayos la convergencia se logra antes de la décima generación.

Grupo 1
 Periodo Enero 2013 a Marzo 2014

Los datos históricos considerados se despliegan en la Tabla 4-34

Tabla 4-34: Historial de demanda para Kit embrague a007250440494

Año	Mes	Demanda (unidades)
2013	1	4
2013	2	2
2013	3	4
2013	4	-
2013	5	-
2013	6	4
2013	7	4
2013	8	4
2013	9	-
2013	10	-
2013	11	3
2013	12	-
2014	1	-
2014	2	3
2014	3	-
	promedio	1,6

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros

Demanda media	lambda	1,8 unidades/mes
Lead time	tau	0,75 mes
C. Almacenamiento	H	\$ 267.960
C. falla	L	\$ 26.796.000

Se realiza un test de Chi- cuadrado en MATLAB para verificar la hipótesis de una demanda de Poisson del repuesto, obteniendo los siguientes resultados (un valor $h = 0$ considera válida la hipótesis nula de que el repuesto sigue una distribución de Poisson de Media Lambda):

```

h = 0
p = NaN

st =
    chi2stat: 3.3968
         df: 0
    edges: [-1.0000 2.5000 4.5000]
         O: [8 7]
         E: [6.3608 3.6880]

Poisson distribution
lambda = 1.86667 [1.24039, 2.69785]
```

Validados los requerimientos del modelo, el resultado de la ecuación 3.49 considera un nivel de inventario de *5 unidades*.

Considerando dicha política contra la demanda real se obtiene la Ilustración 4-64

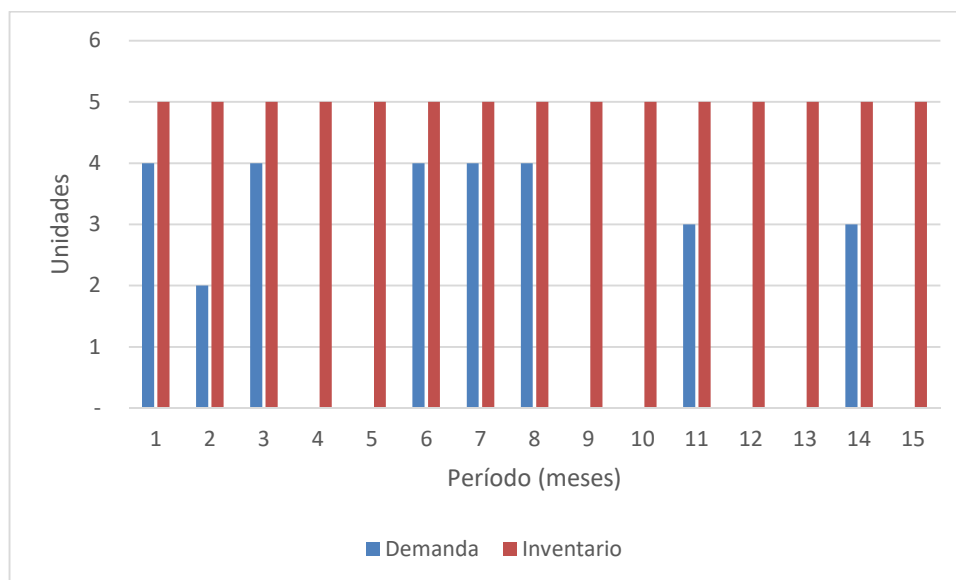


Ilustración 4-64 Comparación de datos reales contra pronóstico del modelo, Stock inicial 5 unidades. Elaboración propia

En un total de 15 meses, considerando la reposición inmediata de la baja de inventario antes del fin de cada período (el tiempo de reposición estimado es de 0,75 meses), no se presentan quiebres de inventario, respondiendo efectivamente a las necesidades de la operación.

4.3.7.2 Demanda Intermitente

Repuesto Fijador múltiple de escape a403142021291
 Grupo 1
 Periodo Enero 2013 a Mayo 2014

El historial de demandas considerado es el siguiente (Tabla 4-35)

Parámetros

Factor de suavización de tamaño de demanda (alfa) 0,3
 Factor de suavización de tiempo entre demandas (beta) 0,2

Considerando la demanda estudiada y los parámetros de la suavización exponencial, los resultados obtenidos a través del programa se muestran en la Ilustración 4-65

El modelo de Croston logrado permite suavizar la demanda de los repuestos esperada, evitando grandes oscilaciones respecto de la demanda real. El efecto inmediato es la menor incertidumbre para el planificador, pudiendo estabilizar los costos de adquisición mensual, apoyando así una probable gestión presupuestal

Tabla 4-35 Historial de demanda para Fijador múltiple de escape a403142021291

Año	Mes	Demanda
2013	1	30
2013	2	0
2013	3	0
2013	4	0
2013	5	12
2013	6	0
2013	7	20
2013	8	0
2013	9	42
2013	10	0
2013	11	0
2013	12	0
2014	1	16
2014	2	0
2014	3	0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados.

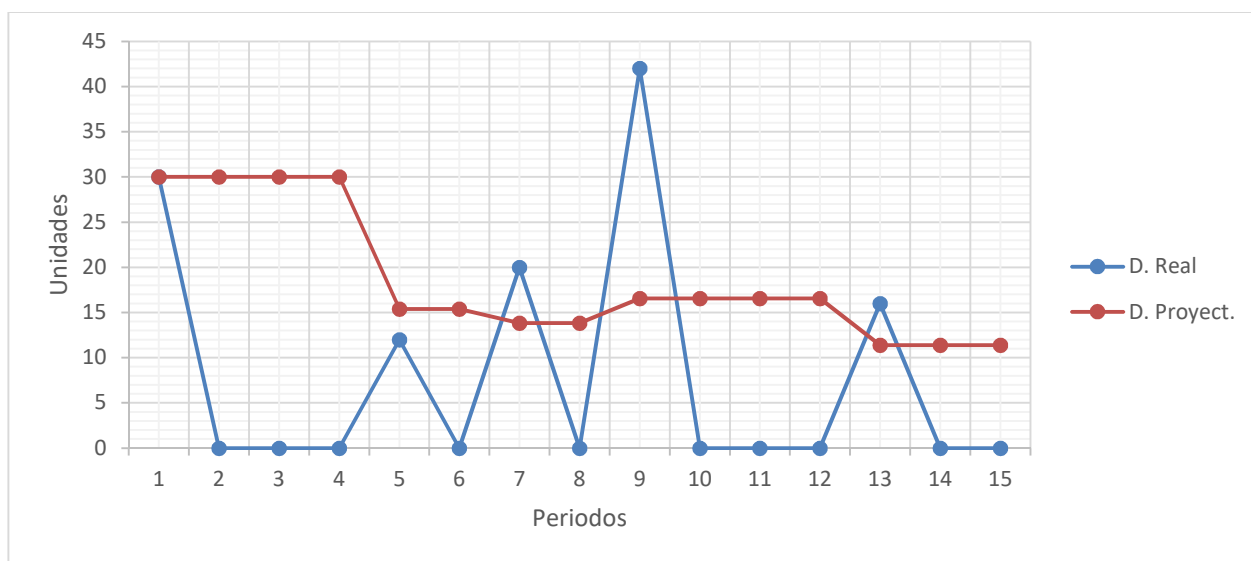


Ilustración 4-65 Contraste de demanda real contra Predicción de Croston

4.4 Descripción de las necesidades y características del sistema informático requerido para implementar los modelos elaborados

La aplicación estará inmersa en un sistema más completo y complejo de gestión de activos. Es necesario definir que módulos se requieren para capturar información, generar indicadores y reportes, establecer controles, entre otros. Se realizará esquemáticamente la definición de dicho sistema.

4.4.1 Requerimientos de hardware y otros recursos

La biblioteca de MATLAB no es directamente compatible con otros lenguajes de programación, pero si es posible, dentro de las mismas funcionalidades de MATLAB el compilar un “paquete” de aplicación, que incluya todos sus métodos y exportarlo a JAVA en forma de applet. La desventaja de aquello es que para ciertos modelos, como el de componentes en redundancia, la carga de proceso sobre el servidor que aloje dicho applet puede ser muy alta dados los procesos de cálculo complejos involucrados (integrales numéricas). Esto finalmente puede terminar en pérdidas de conexión por sobrecarga del servidor, si éste no se encuentra preparado.

En dicha consideración, el servidor encargado del cálculo debe tener recursos de hardware reservados, para evitar que por ejemplo, transacciones o grandes consultas a

4.4.2 Bases de Datos

La aplicación requerirá necesariamente de bases de datos, y un motor que permita establecer rápidamente transacciones entre ellas. Existen diversas alternativas libres en el mercado, por lo que el costo no debiese ser un limitante para su desarrollo.

Las bases de datos que se contemplan son, al menos (el listado no es excluyente ni restrictivo

- *Maquinas*: Esta base almacena toda la información de las máquinas de la empresa, incluyendo su ficha técnica, identificación única, datos de compra, datos de producción (este punto pudiese ser una base de datos independiente), historial de intervenciones. Se relaciona con las base *Pautas* al incorporar la pauta de mantenimiento asociada al equipo, con la base *Talleres* al incorporar la ubicación, el período de operación en la faena y la referencia a las órdenes de trabajo que generan el historial
- *Usuarios* almacena a todos los usuarios y sus perfiles de acceso. Se relaciona directamente con todas las otras bases a través de los permisos de visualización.
- *Pautas* Es la base de todas las pautas de mantenimiento preventivo. Su configuración depende del mantenedor y debe considerar distintas versiones dependiendo del modelo, edad, configuración y condición de operación de una maquina (un mismo camión puede realizar trabajo en una faena forestal o minera, pero si configuración y exigencias son distintas)
- *Informes* es la base de transacciones donde se almacenan todos los indicadores de desempeño, que permiten la generación de informes desplegables.

- *Talleres:* Es la base que almacena las Ordenes de trabajo realizadas en faena. En estas se encuentra información de tiempo, recursos, insumos y equipos involucrados en las diversas intervenciones.

Este listado no es excluyente ni restrictivo, el desarrollador puede agregar, combinar o modificar la propuesta, siempre y cuando las funcionalidades se mantengan.

4.4.3 Capas de funcionalidades

La aplicación deberá contar al menos con tres capas (estructuras de relaciones entre funcionalidades), a saber

4.4.3.1 Acceso

En esta capa se albergan todas las funciones que guardan relación con la validación de los perfiles de usuario. Las acciones principales son administrar bases de datos, operar el sistema y visualizar reportes. En ella se alberga el módulo de acceso donde se configura o personaliza el perfil. Se consideran tres tipos de perfiles

- *Administrador de Sistema:* es el perfil controlador. Tiene la capacidad de generar otros perfiles, entregar permisos y modificar los parámetros de reportabilidad y operación. Es capaz también de generar nuevos elementos o modificar bases de datos. Tiene acceso a la totalidad de la información
- *Supervisor de Faena:* Permite administrar el programa en el ámbito de su faena, otorga permisos de visualización al Administrativo, visualiza reportes, valida transacciones de bodega y solicitudes.
- *Administrativo de Faena:* Ingresa información al sistema, visualiza reportes y genera solicitudes de transacción.

La estructura de la capa se aprecia en la Ilustración 4-66

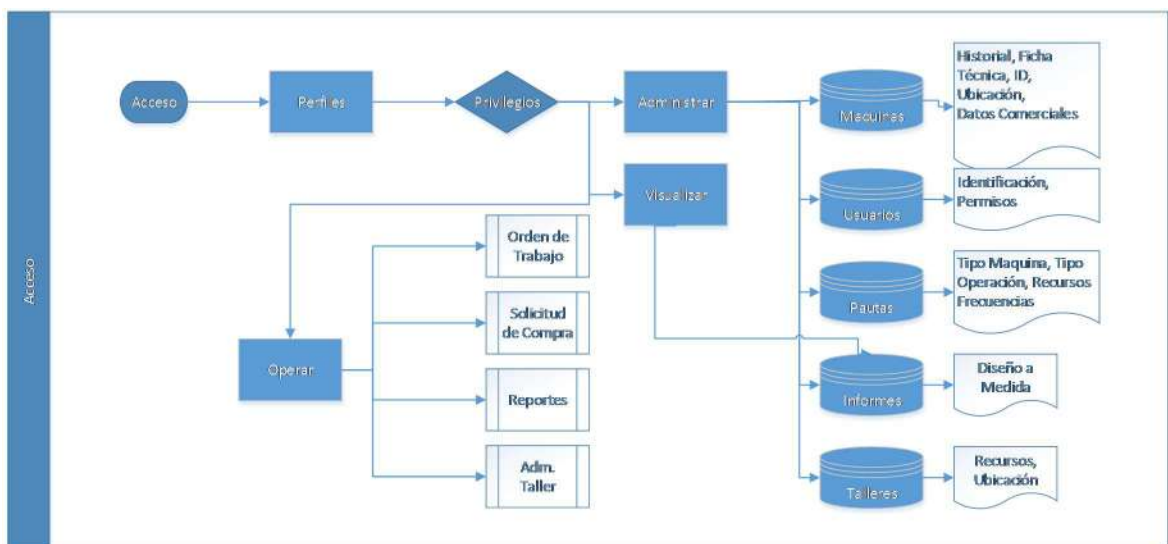


Ilustración 4-66 Estructura de la capa Acceso. Elaboración propia.

4.4.3.2 Operación

En la capa de operación se encuentran las principales funcionalidades del sistema, a través de los módulos *Taller*, *Bodega* y *Planificación*. Esta puede ser visualizada en la Ilustración 4-67

- *Taller* permite gestionar los recursos del taller (por ejemplo asignar trabajadores a una OT), generar ordenes de trabajo de mantenimiento (OTM) o reparación (OTR) además de ingresar reportes de operación. En dichos reportes se ingresan los datos de funcionamiento de la máquina, jornada a jornada, incluyendo incidentes o detenciones no planificadas (las cuales pueden o no enlazarse con una OTR), horas o kilometraje de funcionamiento. Toda esa información alimentará las bases de datos de Taller y Maquinas. A través de la misma OT se pueden hacer solicitudes de materiales, según se necesite.

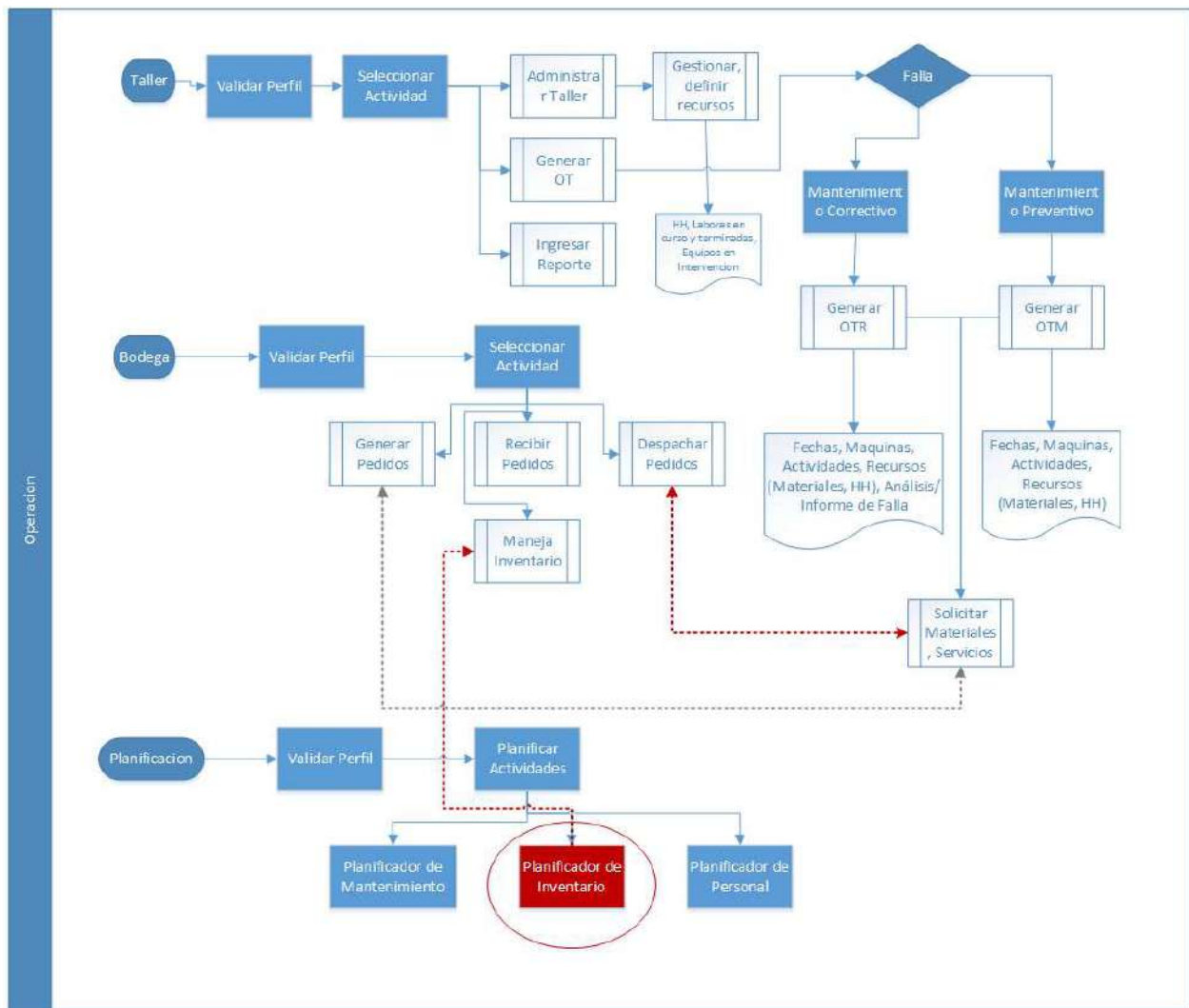


Ilustración 4-67. Estructura de la capa Operación. Elaboración propia

- *Bodega* permite hacer las transacciones relacionadas con los pedidos de materiales o insumos; solicitudes de materiales especiales (por ejemplo, aseo, que no va a asociado a ningún equipo), recepción conforme de materiales, inventario y alertas (configurables con perfil supervisor o superior en la capa de Reportabilidad). El modulo también considera la

creación de nuevas partes y piezas, considerando una verificación previa de similitud para evitar la doble creación de códigos de parte.

- *Planificación* permite utilizar herramientas de confiabilidad para planificar las labores del mantenimiento en general.
 - *Planificador de Mantenimiento* permite visualizar las labores de mantenimiento preventivo futuras, considerando el nivel de uso de las maquinas en un intervalo previo determinado (por ejemplo, tres meses) y proyectando los próximos 30 días, bajo el supuesto de igual desempeño promedio. Con dicha información se puede proyectar también el consumo global de repuestos base de las pautas de mantenimiento.
 - *Planificador de Personal* permite dimensionar las necesidades de HH de personal especializado, considerando el uso medio de la flota y las actividades planificadas en OT en curso.
 - *Planificador de Inventario* en este módulo es donde van alojados los distintos modelos de previsión y proyección de inventario que se requieran según las condiciones de operación, algunos de ellos detallados en 3.2.4 y desarrollados en el presente trabajo (4.2). Debe ser capaz de incorporar nuevos modelos según sea la necesidad de la empresa o el interés del equipo planificador y de entregar los parámetros operativos necesarios para el manejo de inventario de bodega. Este módulo tendrá la opción de acceder a un “asistente” de selección, descrito en 4.5

4.4.3.3 Reportabilidad

En la capa de reportabilidad (Ilustración 4-68) se encuentran las funcionalidades asociadas a la gestión del mantenimiento, en el sentido de los reportes y el análisis de los datos generados en las otras capas del software. El usuario interactúa con el modulo Solicitar Informe.

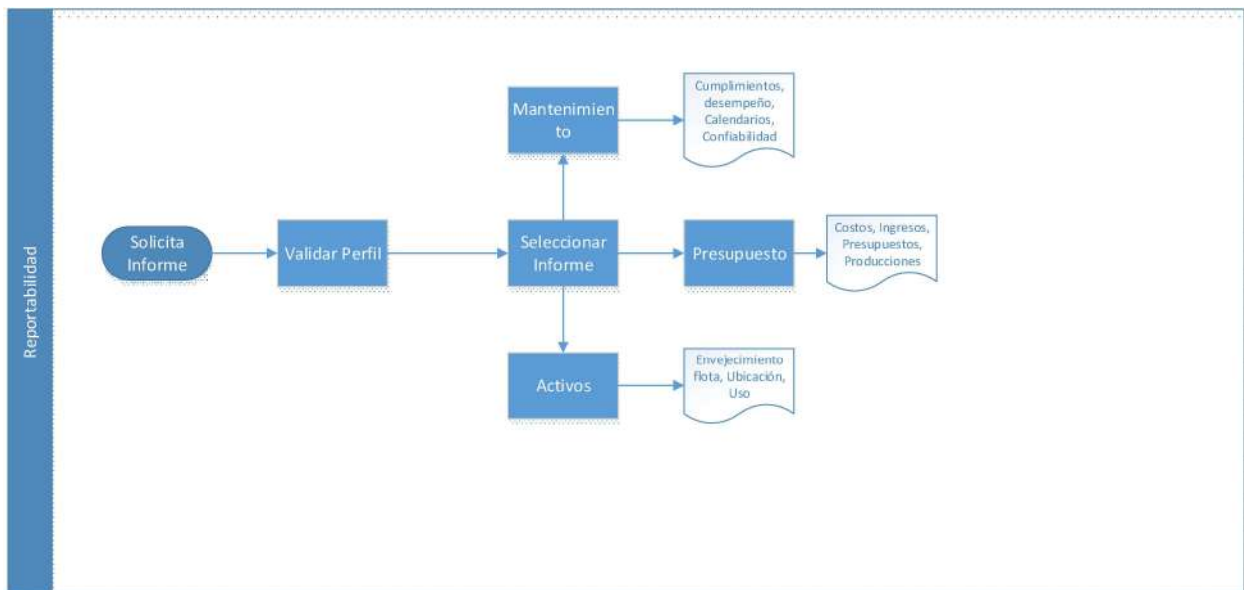


Ilustración 4-68: Estructura de la capa Reportabilidad. Elaboración propia

- *Solicita Informe* Permite seleccionar una serie de informes de desempeño, separados por categorías. Es posible visualizar el cumplimiento de mantenimientos preventivos

planificados (a través del seguimiento a las OTM), los kpi de confiabilidad (MTBF, MTTR, a través de las OTR), el uso de la flota, tipos de fallas recurrentes, etc. De existir un presupuesto de mantenimiento, es posible ver la relación entre lo gastado en el mes y lo estimado (relacionar, por ejemplo, monto total en OC generadas vs los presupuestos por cuenta). al conectar con bases de dato externas a la organización (por ejemplo, bases de datos de producción o de las áreas comerciales de la empresa), se puede establecer la relación entre el gasto en mantenimiento y las utilidades de la empresa. También debe ser posible obtener resúmenes del estado de la flota: uso promedio, ubicaciones, tipos de equipos, equipos operativos y fuera de servicio, etc.

Los informes presentados son diseñados e implementados por el *Administrador* del sistema, a pedido del usuario (habitualmente a nivel de gerencia). Será posible programar, en este interface, la emisión de correos electrónicos de forma periódica o puntual de algún informe desarrollado a usuarios del sistema, según perfil de usuario.

Se considera dentro del listado de potencialidades, el envío de alertas cuando algún indicador no cumpla con el estándar definido para el mismo (por ejemplo, alerta por horas de retraso en la ejecución del mantenimiento preventivo).

4.5 Descripción del “asistente” diseñado: cuestionario considerado.

Se asume que el usuario que utilice la plataforma tiene cierto grado de entendimiento de la materia en cuestión, pero no necesariamente al nivel de experto. Por tal motivo, dentro de la aplicación se incorpora un cuestionario que actúa como asistente de selección, para orientar al usuario a encontrar el modelo que más se ajuste a sus necesidades, del abanico de modelos disponible.

Para tal efecto, se considera el diagrama lógico presentado en la Ilustración 4-69, que muestra cuales son las opciones de selección que dispondrá el usuario de acuerdo al conjunto de modelos incorporados en esta versión de la aplicación.

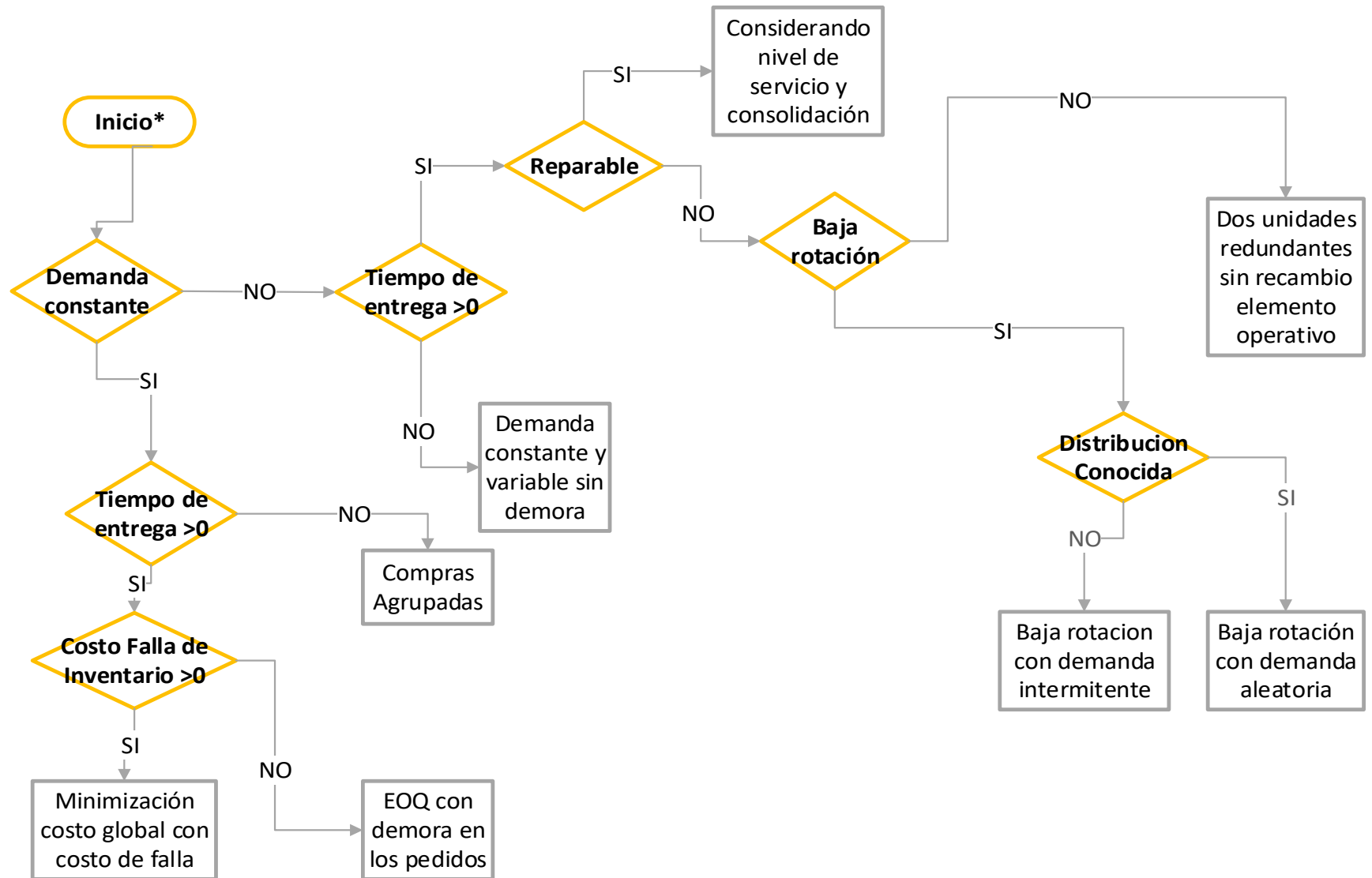


Ilustración 4-69 Esquema lógico de asistente virtual

Se incorpora una opción de omisión del árbol de decisión, en caso que el usuario se encuentre ya familiarizado con los modelos

La interacción entre el usuario y la aplicación se da según se esquematiza en la Ilustración 4-70.

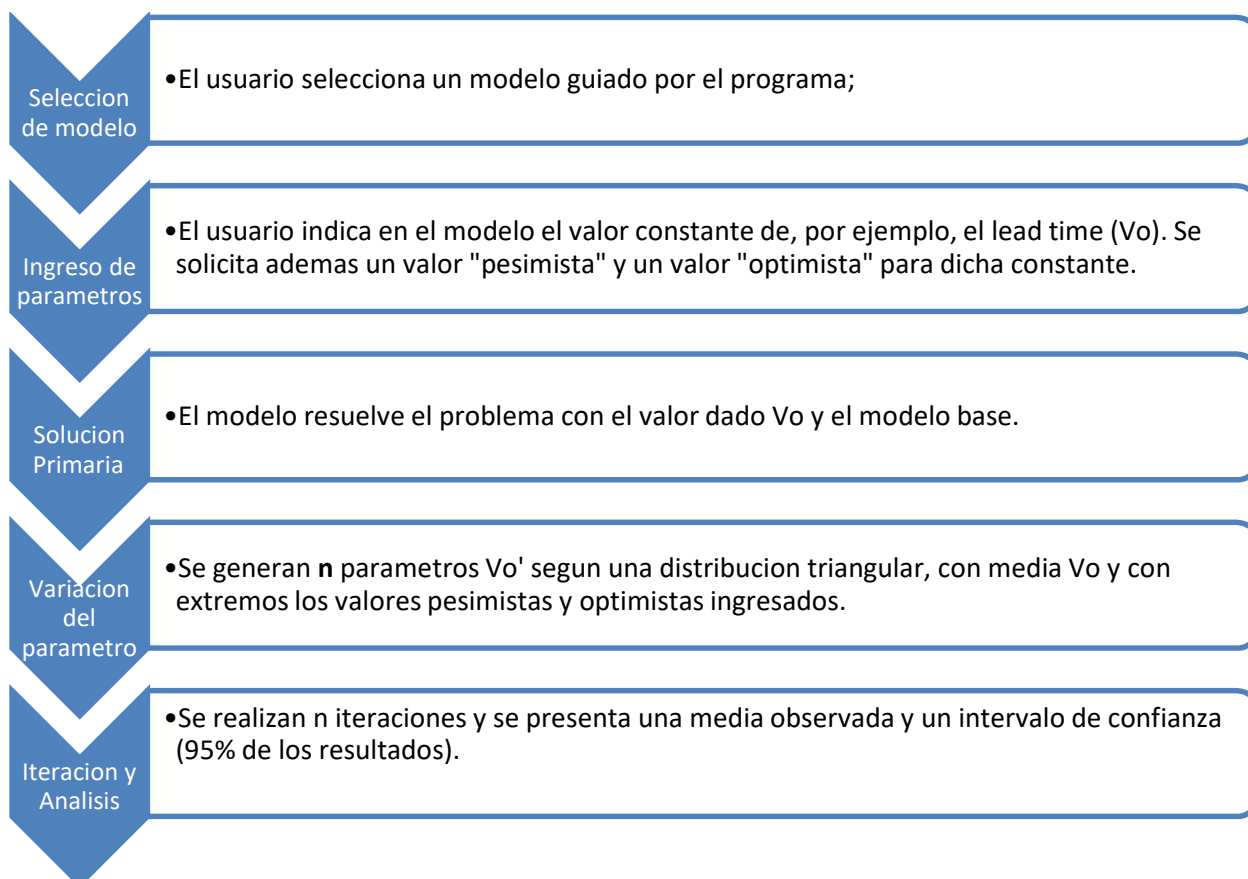


Ilustración 4-70: Esquema de funcionamiento del método de cálculo del programa.

Así pues, los resultados entregados tienen como respaldo una simulación intrínseca a cada cálculo, incorporando a los resultados la incertidumbre planificada en los objetivos

4.6 Manual de usuario

El manual de usuario contempla una estructura simple, de explicación breve de los métodos y su base teórica, más el paso a paso para lograr la selección de los modelos. Estas instrucciones se acompañan de Impresiones de pantalla de la consola de Matlab, para facilidad de comprensión.

El manual de usuario se presenta como documento anexo al presente documento.

5 Conclusiones y comentarios

Respecto de la información suministrada, si bien es de buena calidad, adolece de un punto importante, el cual es la relación de los pedidos con la falla que los origina. Sin ello, no fue posible establecer la duración exacta de cada detención, debiendo asumir ciertas premisas (por ejemplo, un pedido = una falla) para mantener la consistencia en el análisis. Otra consecuencia de aquello es no poder realizar los análisis de criticidad en términos de modos de falla, en vez de sistemas o conjuntos de elementos. Entonces, es probable que ciertos modos de falla se hayan superpuesto de acuerdo a la forma en la cual fue tratada y organizada la información.

Otro conflicto se generó al evaluar el detalle de cada uno de los pedidos; se evidenció más de un caso en el cual elementos iguales eran tratados de forma distinta (inicialmente) por la diferencia existente entre las glosas, lo que da cuenta de la importancia en la uniformidad en los registros y la asociación de cada elemento a códigos, más que a descripciones²⁰.

Sin embargo y a la luz de los resultados, las premisas utilizadas permitieron obtener resultados coherentes, debido a la cercana relación existente entre el lead time y el tiempo fuera de servicio: al ser este, por lógica, la suma del tiempo de reparación efectiva (en taller) más el tiempo de demora, por lo que se cuenta con una buena aproximación a la situación real. La misma lógica puede utilizarse para validar el uso de sistemas en vez de modos de falla para realizar los ejercicios de priorización.

Las herramientas de análisis utilizadas para el tratamiento de la información probaron ser útiles en el caso particular de este trabajo, al acotar efectivamente el universo de pedidos en categorías “críticas”, de forma tal de poder seleccionar candidatos útiles para el desarrollo y validación de los modelos implementados, además de permitir encontrar detalles como la existencia de tres grupos de maquinaria distintos, y separar la información, evitando o acotando posibles fuentes de error en los cálculos. Es necesario destacar que en el caso del grafo de Nelson Aalen modificado (3.2.3.2.2), al aunar todas las demandas de la flota asociadas a un mismo de sistema, se genera el fenómeno de “burbuja dentro de una burbuja”: en la versión original de dicho gráfico, **tal fenómeno no es posible, puesto que se trata un modo de falla a la vez, por equipo**. El enfoque utilizado en el presente trabajo permite determinar en qué momento del tiempo la disponibilidad de la flota fue afectada, al determinar en qué momentos las burbujas coinciden y **comparar la cantidad de coincidencias con el número de equipos pactados como operativos**.

En vista de lo anterior, resulta interesante la posibilidad de realizar el mismo trabajo con otros tipos de maquinaria (estacionarias de producción continua, transporte aéreo o marítimo, minera), con historiales de falla asociados a los pedidos y evaluar las similitudes o diferencias respecto del presente trabajo.

Respecto de los modelos escogidos y los algoritmos programados, si bien es cierto se observan ciertas desviaciones en términos de predicción frente a los casos reales, tienen un buen desempeño considerando que una posible causa de estas desviaciones es que los parámetros obtenidos de los datos son *cercanos a lo real* y no necesariamente *idénticos a lo real*, por los motivos explicados anteriormente. Es probable que dicho desempeño mejorase con un mayor

²⁰ En conversaciones con el departamento de adquisiciones de la empresa que suministra la información, se asume la falencia mencionada en su sistema, siendo uno de los proyectos de mejora la “limpieza” y estandarización de los códigos de partes y piezas.

volumen de información, por ejemplo, al combinar *solicitudes de reparación* junto con las *solicitudes de repuestos*, esto ya que algunas de las fallas que pudo sufrir la flota pueden haber sido tratadas por terceros, en consecuencia, las solicitudes de partes y piezas requeridas para dichas intervenciones, además de sus tiempos involucrados son invisibles para el presente estudio por no contar con la información y el cruce entre eventos de compra, más allá de la fecha. Además, existe la potente influencia de la operación, la cual puede afectar de forma crítica cualquier modelo y alejar el comportamiento de los equipos de la tendencia modelada. Tal fue el caso de los camiones del estudio: la modificación realizada a los sistemas de frenos fue acompañada de capacitación por parte del proveedor en el protocolo óptimo de conducción en la ruta habitual y monitoreo de conducción (con ayuda de GPS) para limitar las velocidades de los equipos, logrando como efecto final la disminución sustantiva en la tasa de falla de los distintos componentes de la flota.

Un punto que debe ser mencionado es que si bien los algoritmos de optimización cumplen su cometido (en términos de los resultados esperados), los tiempos de procesamiento de información son muy extensos considerando que la aplicación deberá responder a un servicio web y no a uno de estación fija. Sin ir más lejos, en el caso particular del modelo de compras agrupadas, la solución al problema utilizando el módulo SOLVER de Excel fue la misma, pero el tiempo de respuesta fue de segundos, frente a la respuesta de la aplicación que fue de minutos. Esto es probablemente consecuencia de que en general, el algoritmo genético es lento en su convergencia (en tiempo, no en cantidad de iteraciones) y que además, SOLVER es una rutina que ha sido, valga la redundancia, *optimizada para optimizar considerando los recursos físicos que tendrá disponibles*. Junto con ello, el algoritmo genético parte sobre la base de la generación de elementos aleatorios que retrasan el paso de una generación a otra. El cambio del optimizador a uno basado en gradiente, como la función FMINCON, en el caso del modelo de redundancia de componentes (3.2.4.6.1) por ejemplo, considerando las características de la curva de resultados vista en el análisis de sensibilidad, permitió disminuir un 90% el tiempo de cálculo (3300 segundos frente a 400 segundos). Pese a ello, la transacción sigue siendo lenta para un servicio web (en comparación con SOLVER), pues además para graficar los resultados, se requiere un tiempo similar. Esto debe ser considerado al momento de realizar la implementación web de la aplicación, pues esta deberá contar con recursos físicos exclusivos para el cálculo, y no ser demorada por otras transacciones, por ejemplo, operaciones o consultas complejas a bases de datos.

La optimización mixta necesaria para el modelo de compras agrupadas (3.2.4.4) solo puede ser realizada con algoritmos genéticos en MATLAB, puesto que las otras rutinas de optimización disponibles no son capaces de manejar variables continuas y discretas a la vez.

El modelo para demanda aleatoria (3.2.4.7.1) requiere de una restricción adicional a lo expresado en la publicación, puesto que para niveles de inventario menores a lo mínimo requerido por unidad de tiempo (la demanda media), pueden encontrarse costos menores a los estimados para el óptimo. El modelo programado ignora estos casos y optimiza considerando un nivel de inventario mínimo a la demanda media por unidad de tiempo.

Dentro de los otros casos, llama la atención el modelo 3.2.4.1 (costo mínimo con falla), el cual en diversos ejercicios se mostró siempre muy sensible al stock inicial del producto, variable no contemplada en el modelo de base. Al tener un stock inicial nulo, se produjeron quiebres de inventario no siempre recuperables en comparación con casos reales.

El sistema, en su conjunto, está diseñado para funcionar en torno a las herramientas de reportabilidad, desde el ingreso de la información a la estructura de las bases de datos, de forma tal

de facilitar las transacciones y la generación posterior de indicadores adecuados que permitan hacer gestión sobre la información que se maneje. Ha sido concebido, además, para que pueda ser implementado con software libre, abaratando el costo de implementación y mantenimiento.

El asistente virtual representa un soporte eficaz y simple para acercar la teoría a usuarios no habituales, flexible además en el sentido de estar estructurado para poder fácilmente incorporar nuevos modelos en la medida que se requieran.

Con todos los elementos potenciales implementados, el programa podrá cumplir el objetivo de ser una alternativa que conjugue herramientas de gestión, manejo de inventario y confiabilidad, bajo costo y accesibilidad.

Bibliografía

- [1] Davenport, T. (2006). "Competing on Analytics. Harvard Business Review", January, 99-107
- [2] Rodrigo Pascual, "El arte de mantener", Apunte de Curso, 2011
- [3] Carlos Vidal Holguin, "Fundamentos de Gestión de Inventarios", Tercera Edición, Colombia, Universidad del Valle, 2005.
- [4] Ballou, Ronald H, "Logística. Administración de la cadena de suministro". Quinta edición. México: Pearson Educación, 2004.
- [5] Felipe Arana, "Gestión de inventarios en una empresa de repuestos automotrices", Universidad de Chile, 2015
- [6] Viviana Meruane, "Gestión de Activos Físicos", Apunte de Curso ME5701, 2011
- [7] Alejandro Martínez, "Estudio y aplicación de modelos de gestión de repuestos críticos basados en la condición de equipos", Universidad de Chile, 2009
- [8] Marta Palmer Gato, Manuel Cardós Carboneras, Eugenia Babiloni, Ester Guijarro Tarradellas, "Revisión de modelos de gestión de inventarios para repuestos reparables", XIV Congreso de Ingeniería de Organización: Donostia-San Sebastián, 8-10 de Septiembre de 2010, 2010, págs. 1329-1335
- [9] Guillermo del Castillo, "Gestión de repuestos en centrales eólicas", Universidad de Chile, 2009
- [10] Darko Louit, Rodrigo Pascual, Dragan Banjevic, Andrew K. S. Jardine, "Optimization models for critical spare parts inventories - a reliability approach" Journal of The Operational Research Society, vol. 62, no. 6, pag. 992-1004, 2011
- [11] Darko Louit, Rodrigo Pascual, Dragan Banjevic, Andrew K.S. Jardine, "Condition-based spares ordering for critical components", Elsevier, 2011.
- [12] Knights, P.F., Downtime Priorities, Jack-Knife Diagrams, and the Business Cycle, Maintenance Journal, 17(2), 14-21, Melbourne, Australia, 2004.
- [13] Pascual, R., Del Castillo, G., Louit, D., Knights, P., Business-oriented prioritization: a novel graphical technique, Reliability Engineering & System Safety, doi:10.1016/j.ress.2009.01.013, 2009.
- [14] L.Barberá, A.Crespo, V. Gonzalez, R.Stegmaier, P. Viveros, "Análisis del gráfico Nelson-Aalen modificado como soporte a la toma de decisiones en la gestión global del mantenimiento", Sistemas Inteligentes de Mantenimiento, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2011

- [15] Tadashi Dohi, Shunji Osaki, Naoto Kaio, “Optimal planned maintenance with salvage cost for a two-unit standby redundant system”, *Microelectron Reliab*, Vol. 36, pp 1581-1588, Elsevier,1996
- [16] Rongbing Hu, Jun Xie “Optimal Maintenance Policies for a Cold Standby Redundant System with Two Units”, *Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2008. IEEE/SOLI 2008. IEEE International Conference, Vol. 2, IEEE, 2008
- [17] Stephen A. Smith”Optimal Inventories for an (S - 1, S) System with No Backorders”, *Management Science*, Vol 23, No 5, Enero 1977
- [18] Conversaciones con el PhD Garrit Page, catedrático del departamento de estadística de la Universidad Brigham Young, Utah. Conversaciones telefónicas y correspondencia sostenidas entre Septiembre y Diciembre de 2015.
- [19] Croston J. D., “Forecasting and Stock Control for Intermittent Demands”. *Operational Research Quarterly*, 42 (3), 289-303, 1972.
- [20] B.Vasumathi, A.Saradha, “Forecasting Intermittent Demand for Spare Parts”, *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887),Volume 75– No.11, 2013

Anexo A: Manual de usuario de la aplicación

A.1 Introducción

Este manual tiene como objetivo introducir al uso del módulo de apoyo a la gestión de repuestos para flotas de transporte, presentado en el trabajo de título “Diseño e implementación de un módulo de gestión de repuestos críticos para una flota de equipos de transporte” [1].

El módulo implementado inicialmente en código compatible con el software MATLAB®, presenta ocho modelos, desarrollados en el trabajo fuente, que permiten estimar tamaños y frecuencias de pedido de repuestos, niveles de alerta, tamaños de inventario, entre otros. Dichos modelos han sido validados en diversas fuentes de literatura y en el trabajo fuente. Cada modelo requiere de ciertos parámetros de entrada que deben ser estimados previamente por el usuario.

Para el uso del módulo no es necesario el conocimiento de programación, puesto que está orientado al usuario final. Sí lo es para exportar los modelos a otros lenguajes o plataformas o para incorporar nuevos modelos a la programación. Tampoco es indispensable contar con el software MATLAB, pues el código es compatible con servidores web abiertos que pueden interpretarlo, como por ejemplo, OCTAVE Online (<http://bit.ly/2cVGG3h>), aunque es posible que dependiendo de la versión del servidor, algunas funciones pudiesen tener una nomenclatura distinta.

Se entrega entonces, en el presente manual, las indicaciones para el uso práctico del módulo, algunos ejemplos e indicaciones, además de una breve descripción de la teoría asociada a cada modelo. Se concluye con algunos comentarios y observaciones

A.2 Descripción general del módulo

El módulo cuenta con ocho modelos de gestión de repuestos, los cuales se ajustan a distintas condiciones operacionales. Cada uno de ellos requiere una serie de parámetros para su funcionamiento, los que deben ser previamente determinados por el usuario. La mayoría de ellos son de fácil comprensión y obtención, sin embargo, en los modelos más complejos se requiere cierto grado de entendimiento de teoría de mantenimiento (aunque no es indispensable)

A.2.1. Árbol de decisión

El módulo cuenta con un árbol de decisión incorporado que actúa como asistente de selección de modelo, de acuerdo a una serie de consultas guiadas. El árbol de decisión que describe al asistente se presenta en la Ilustración 2-1. El detalle de funcionamiento de cada modelo se describe en la sección A.3.5

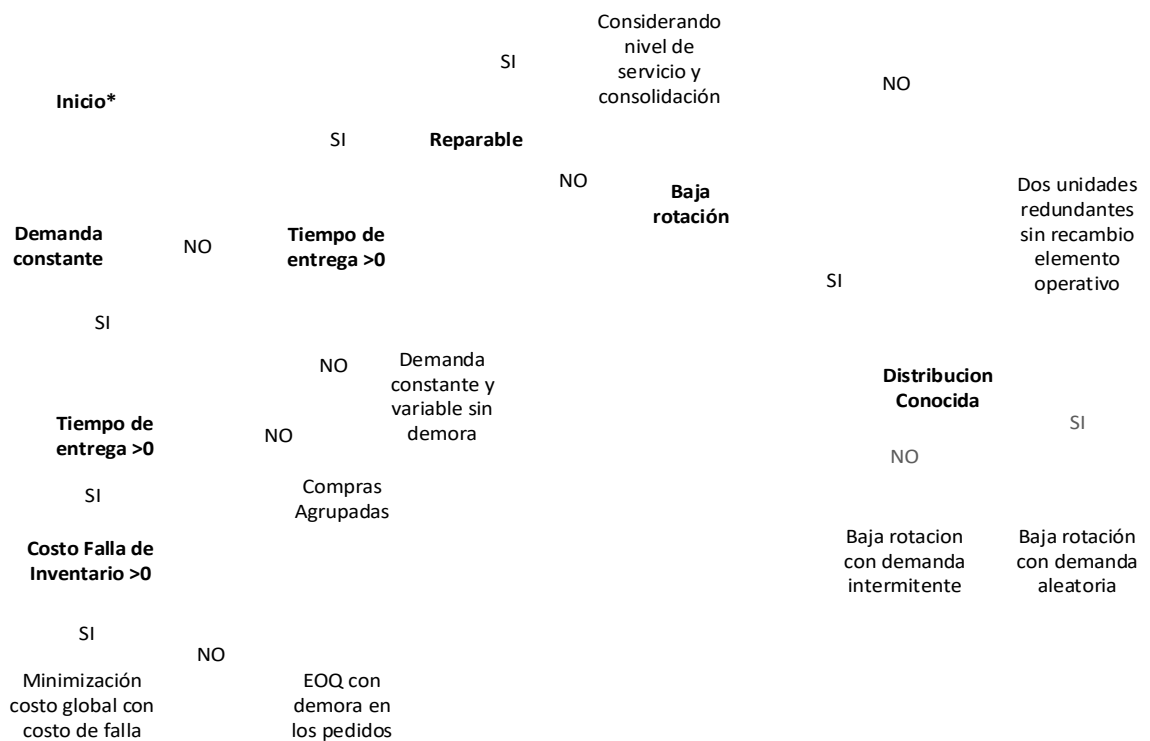


Ilustración 2-1 Árbol de decisiones de selección de modelos

Descriptivamente, la secuencia es:

- 1) Inicialmente se consulta si la tasa de demanda²¹ observada es constante (es decir, que cada demanda es muy parecida al promedio de las demandas).
 - a) Si la respuesta es afirmativa, el programa consulta si existe un tiempo de entrega no nulo (este tiempo de entrega es también conocido como *lead time*)
 - i) Si la respuesta es negativa, inicia el modelo de *compras agrupadas*.

²¹ Entiéndase tasa de demanda como cantidad de repuestos solicitada por unidad de tiempo.

- ii) Si la respuesta es positiva, el programa consulta acaso existe un costo de falla por quiebre de inventario, es decir, si existe algún perjuicio por no disponer del elemento (por ejemplo, una multa por no disponibilidad del equipo al no contar con el repuesto)
 - (1) Si la respuesta es positiva, se inicia el modelo de *minimización del costo global con costo de falla*
 - (2) Si la respuesta es negativa, se inicia el modelo de *demanda con demora en los pedidos*
- b) Si la respuesta es negativa, el programa consulta si existe un tiempo de entrega no nulo (al igual que el caso anterior, pero lleva modelos distintos por la elección primaria en 1))
 - i) Si la respuesta es negativa, se inicia el modelo de *demanda constante y variable sin demora en los pedidos*.
 - ii) Si la respuesta es positiva, el programa consulta si el repuesto es o no reparable.
 - (1) Si la respuesta es negativa, el programa consulta si los repuestos tienen o no baja rotación (poca demanda en largos períodos de tiempo)
 - (a) Si la respuesta es negativa, se inicia el modelo para componentes a fallo seguro, o *componentes redundantes sin recambio de elemento operativo*
 - (b) Si la respuesta es positiva, el programa consulta si la distribución probabilística de la demanda es conocida
 - (i) Si la respuesta es positiva, se inicia el modelo de *demanda con baja rotación y distribución aleatoria*
 - (ii) Si la respuesta es negativa, se inicia el modelo de *demanda intermitente*.
 - (2) Si la respuesta es positiva, se inicia el modelo de *estimación de demanda considerando nivel de servicio y consolidación*.

Una vez dentro de cada modelo, el programa solicitará los parámetros, según sea el caso. En caso que el usuario ya esté familiarizado con los modelos, le es posible omitir el uso del asistente y optar por la selección directa, tal como se describe en la Ilustración 2-2 Esquema de funcionamiento del programa de selección

Para los modelos, particularmente aquellos que no tienen incorporada una simulación dentro de su programación, se incorpora un cierto grado de incertidumbre a los valores asumidos como constantes. Esto pretende ser un reflejo de los comportamientos de la demanda o de la entrega de los repuestos, que se ven afectados por factores externos que no necesariamente son parte del proceso, por ejemplo, quiebres de inventario del proveedor, factores climáticos, fallas de operación, etc.

Para reflejar tal incertidumbre, se solicita una estimación *optimista* y una estimación *pesimista* de la variable sobre la cual exista una posibilidad de variación. Por ejemplo, si el promedio de la demora de una entrega es de 3 días, una estimación pesimista es que la entrega demore 5 días y una estimación optimista es por ejemplo, que solo tome 1 día.

Esta incorporación de incertidumbre permite establecer un *rango* de elecciones para el usuario, en vez de una respuesta definitiva. Si bien el sistema sugiere un óptimo, queda a opción del usuario acercarse en su decisión final a uno de estos límites.

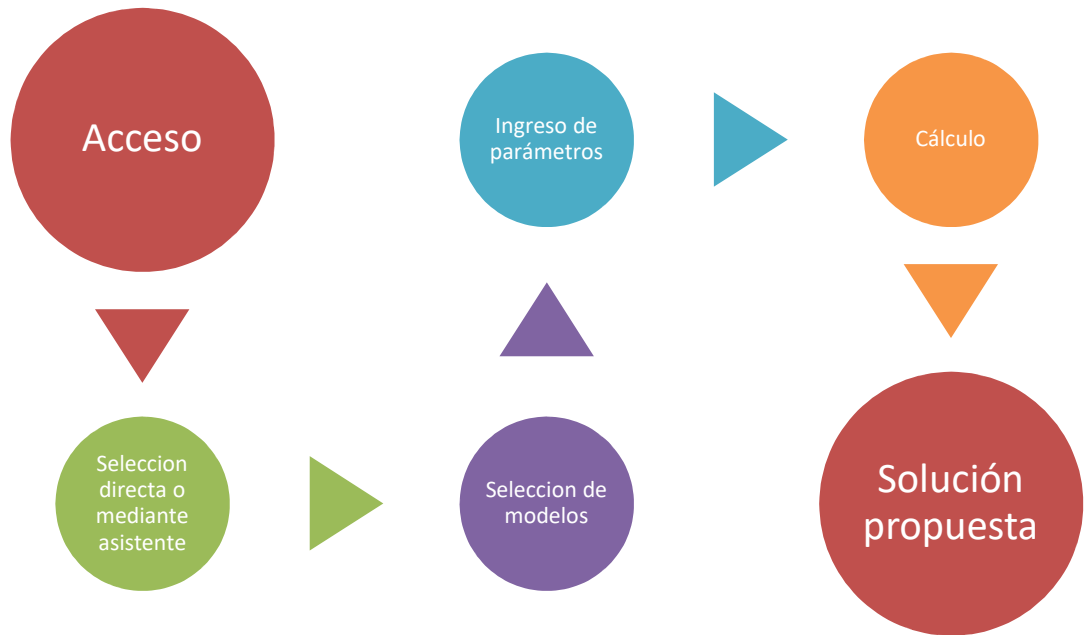


Ilustración 2-2 Esquema de funcionamiento del programa de selección

Como regla general, el programa presentará los resultados de la consulta en la consola (**Command Window**) y presentará un gráfico en los casos que sea posible.

La respuesta contempla la presentación de

- La solución óptima del caso base (con los parámetros de entrada originales)
- Rangos de solución considerando 1000 casos de simulación, donde el parámetro constante seleccionado varía dentro de los límites optimistas y pesimistas seleccionados
- Una propuesta de solución factible que toma en consideración la incertidumbre generada por dichos límites.

A.3 Aplicación

A.3.1. Acerca de MATLAB

MATLAB es una aplicación de cálculo matemático que puede realizar cálculos usando grandes volúmenes de información simultánea, puesto que su codificación está orientada al trabajo con matrices y vectores. Esto permite que, para el objetivo de realizar paralelamente el mismo cálculo con variaciones a ciertos parámetros se operen los vectores y/o matrices en los cuales están almacenados, según sea el caso. Para su utilización, este programa debe ser instalado de forma preliminar en el computador.

Su modo de funcionamiento es mediante una consola de comandos, donde se distinguen las siguientes áreas (Ilustración 3-1):

- Panel de Navegación (Current Folder):** despliega las carpetas de trabajo. Similar al *Explorador de Windows*

- b. **Editor:** Permite desarrollar código a modo de *script* sin ejecutar. MATLAB verifica instantáneamente el código ahí ingresado en busca de errores y los señala.
- c. **Ventana de Comandos (Command Window):** ventana donde se ejecutan los comandos desarrollados en el editor, ya sea a través de la opción *RUN* del menú o copiando directamente el texto
- d. **Historial de Comandos (Command History):** Ventana que almacena los comandos ejecutados. Útil para recuperar trabajo anterior
- e. **Variables de trabajo (Workspace):** se despliegan los valores o características de las variables generas o ingresadas en la codificación.
- f. **Menú:** las opciones de MATLAB.

Se puede obtener más información acerca de las funcionalidades en el manual de usuario de MATLAB.

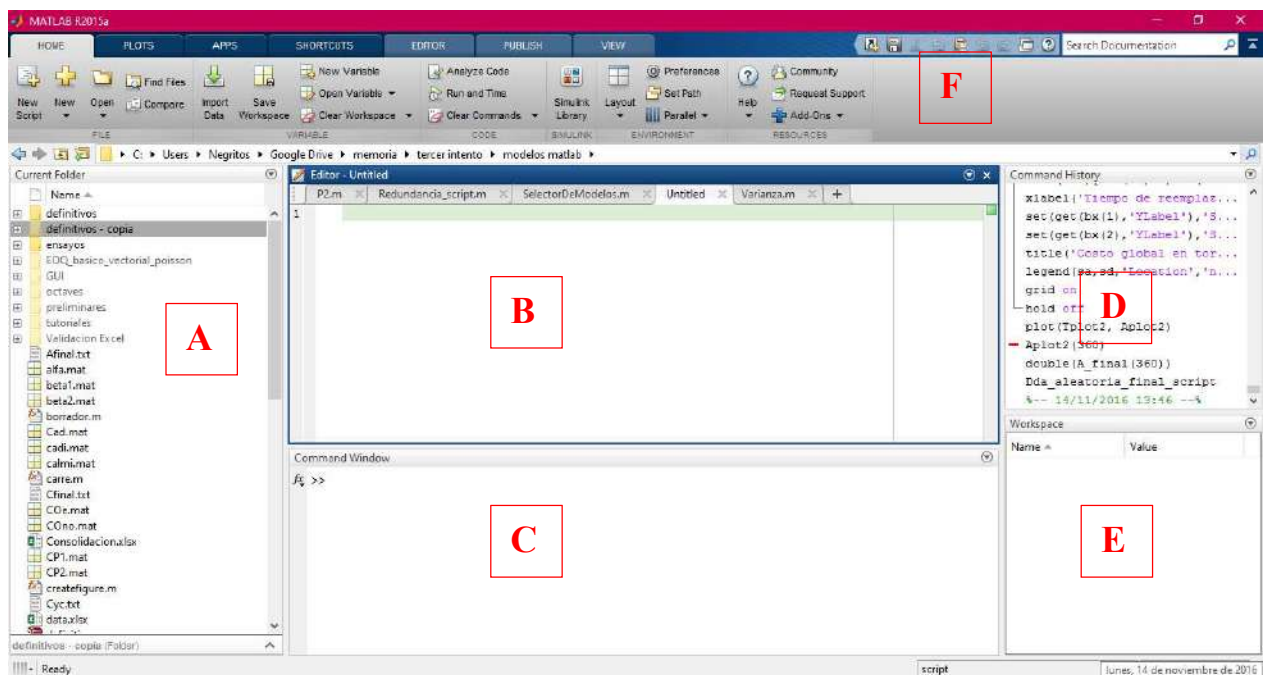


Ilustración 3-1 Escritorio de trabajo en Matlab

Al generarse gráficos, MATLAB permite que estos sean manipulados, por ejemplo, es posible ampliar ciertas áreas y desplazarse en las curvas, con las herramientas del menú superior, tal como se muestra en la imagen



Ilustración 3-2 Menú de manipulación de gráficos

A.3.2. Ejecución del Módulo

A continuación se describen los paseos a seguir para iniciar y ejecutar exitosamente el módulo de selección de repuestos

A.3.1.1. Definición del PATH para la ejecución del módulo

El *PATH* es la ruta de acceso a los archivos a los cuales el programa invoca para realizar las rutinas. Para el uso de este módulo, todos deben estar en la misma carpeta, organizados, tal como se muestra en la Ilustración 3-3. En dicho ejemplo, la ruta de acceso está destacada en azul y se obtiene haciendo clic en esa ubicación. Si no se agrega esta ruta, MATLAB no leerá los archivos y no ejecutará el programa.

Si el nombre de usuario (de Windows) fuese *Juan* y la carpeta estuviese almacenada en el *escritorio*, la ruta sería *C:\Users\Juan\Desktop\Selector de Modelos*

Para agregar la carpeta, se deben realizar los siguientes pasos

- En Matlab, seleccionar la viñeta *HOME*
- Una vez allí, seleccionar la opción *SET PATH* (Ilustración 3-4)
- Se desplegará una ventana con las carpetas ya agregadas a la ruta de verificación de MATLAB. Allí se debe seleccionar la opción *ADD WITH SUBFOLDERS* (Ilustración 3-5)
- Se desplegará una nueva ventana. Allí se debe buscar la carpeta donde están almacenados los archivos o escribir directamente la ruta de acceso, si esta es conocida.

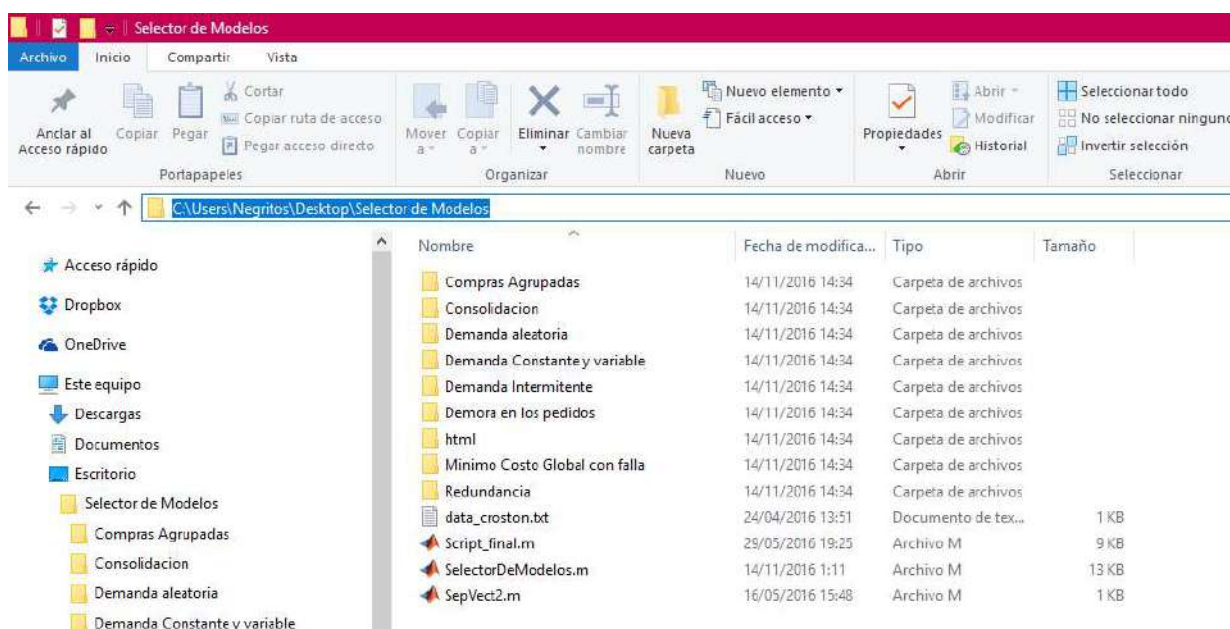


Ilustración 3-3 Carpeta de almacenamiento de archivos de rutinas. Se destaca la ruta de acceso.

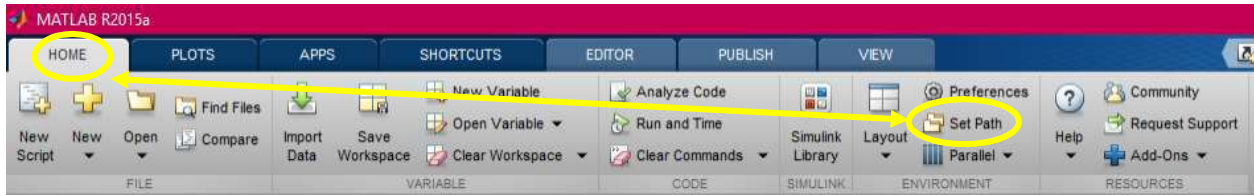


Ilustración 3-4 Opción *SET PATH*.

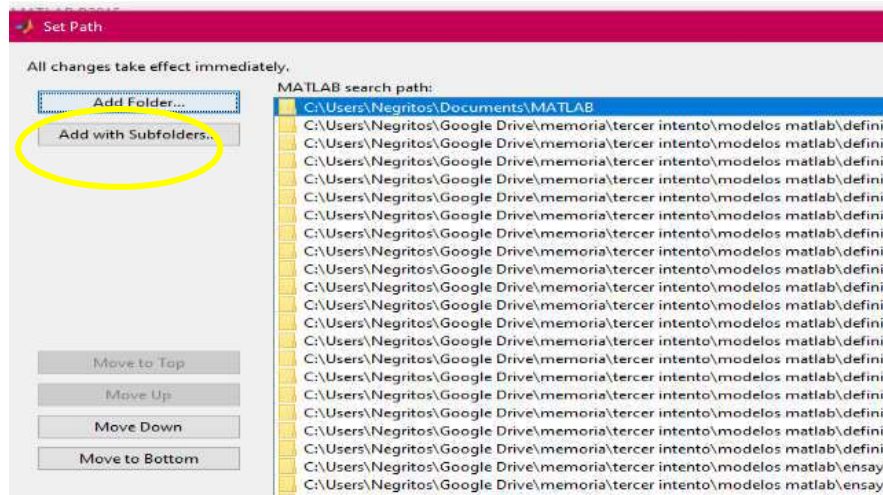


Ilustración 3-5 Opción *ADD WITH SUBFOLDERS*.

Todos los archivos deben estar almacenados

A.3.1.2. Iniciación del módulo

Para iniciar el módulo, en la ventana de comandos de MATLAB²² se debe escribir textualmente el comando *SelectorDeModelos* y presionar el botón *Enter* como se aprecia en la Ilustración 3-6.



Ilustración 3-6 Comando de inicio de la aplicación

Esto invocará un menú como se muestra en la Ilustración 3-7. Esta opción permite activar el *asistente de selección* (digitando 0) o acceder al menú de modelos directamente (digitando 1): de este modo, un usuario regular no deberá recorrer todo el árbol de decisión si ya está familiarizado con las capacidades del programa como se aprecia en la Ilustración 3-8. El asistente este arrojará una serie de consultas que permitirán orientar al usuario a través de los módulos disponibles (en la presente versión) y seleccionar el modelo que más se ajuste a su necesidad.

²² U Octave, o donde esté implementado

Command Window

```
Modelos de gestión de repuestos
fx Si está familiarizado con los modelos de este programa, digite 1, de otro modo digite 0 |
```

Ilustración 3-7 Menú de inicio

Command Window

```
Modelos de gestión de repuestos
Si está familiarizado con los modelos de este programa, digite 1, de otro modo digite 0 1
Seleccione el modelo a utilizar
1.-Mínimo costo global con costo de falla
2.-Modelo con demora en los pedidos
3.-Demanda constante y variable sin demora en los pedidos
4.-Modelo Mínimo Costo Global en Compras Agrupadas
5.-Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación
6.-Modelo para componentes a fallo seguro: sistema de dos unidades redundantes con restricción de disponibilidad
7.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda aleatoria
8.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda intermitente
fx Su opción:
```

Ilustración 3-8 Menú de selección directa

A.3.3. Nomenclatura

En el programa, algunos valores se expresan o solicitan en términos genéricos, para que puedan adaptarse a los espacios temporales y tipo de moneda que más acomode al usuario. Estos valores son:

- UT = unidades de tiempo (hora, día mes, etc.)
- UM = unidades monetarias (peso, dólar, euro, etc.)
- U= una unidad de elemento
- %= porcentaje

Se ha definido de esta forma para que el usuario pueda adaptar las escalas de cálculo de acuerdo a su conveniencia. Se debe tener atención en particular cuando se trate de *fracciones* de la unidad y evaluar, por ejemplo, si es conveniente hablar de *30 minutos* o *0.5 horas* y evaluar de forma acorde.

A.3.4. Consideraciones al ingreso de datos

MATLAB es sensible a los caracteres ingresados, es decir para todos los efectos el carácter “a” es distinto al carácter “A”, por lo que se debe tener atención al momento de digitar

También, al pulsar la tecla “Enter” sin haber digitado antes algún valor, MATLAB interpreta esa acción como ingreso del valor 0.

La separación de decimales es con el carácter “. (punto). No existe separador de miles.

Se puede salir de un proceso en curso con la combinación de teclas “Ctrl+C”

A.3.5. Modelos incorporados

A continuación, se describen con mayor detalle cada uno de los modelos incorporados

A.3.5.1. Demanda con demora en los pedidos

El objetivo de este modelo es determinar la probabilidad de que un cierto nivel de alarma q_a sufra un quiebre de inventario en un tiempo T , dada una cierta demanda con tasa λ . Actualmente, el modulo considera sólo procesos cuya demanda sigan una ley de Poisson²³. Se considera que el repuesto llega con un cierto retraso luego de ser solicitado T_d , es decir que el tiempo de reposición no es nulo [1].

Se asume además que cada falla de un determinado elemento genera necesariamente una demanda de dicho elemento

El modelo se describe en la Ilustración 3-5.

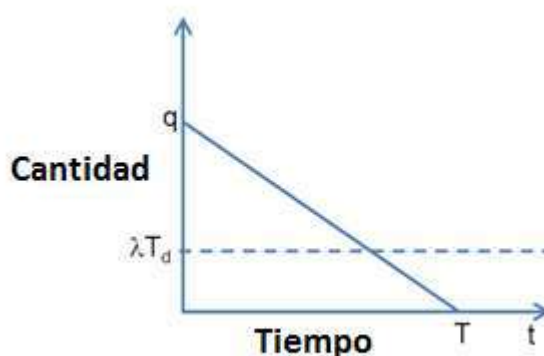


Ilustración 3-9 Modelo con demora en los pedidos

Siendo:

- $\lambda(t)$ la tasa de fallas del componente (3 fallas/mes, 2 fallas/año, etc)
- q_a el nivel de alarma. Se realiza un pedido al llegar a este nivel de inventario
- T_d el tiempo medio retraso en la entrega de los pedidos conocido

El modelo considera que la variable incierta (sobre la que existe la posibilidad de variación) es el tiempo de demora en la entrega de pedidos. Se presenta un ejemplo con los siguientes valores

Tabla 3-1 Variables de entrada para el modelo con demora en los pedidos

Variable	Notación	Valor	Unidades
Tasa media de fallas	λ	5	fallas/ut
Nivel de alerta	Q_a	6	unidades
Tiempo medio de demora en la entrega	T_d	1	ut
Repuestos requeridos por overhaul	$T_d opt$	0.5	ut

²³ Una definición adecuada para un proceso de Poisson en estadística y simulación es un proceso de conteo de eventos, que siguen una media de ocurrencia λ y cuyo tiempo entre eventos es independiente de los otros.

Repuestos requeridos por intervención correctiva	<i>Td pes</i>	2	ut
--	---------------	---	----

Se considera además que existe incertidumbre sobre los límites presentados (es decir, el usuario indica que estos límites son aproximados y no 100% seguros). Los resultados son los siguientes

- La probabilidad de que el consumo sea menor que el nivel de alerta indicado es 76.2183 %
- En mil casos, con la incertidumbre entregada para el tiempo de entrega, la probabilidad media de que el consumo sea menor que el nivel de alerta indicado es 73.8876 %
- Un 95% de los resultados se encuentran dentro del rango [38.7904 ;98.2314] %
- Para que la demanda pueda ser satisfecha un 90% del tiempo necesita: 8 unidades

Se aprecia la presentación de los datos en la Ilustración 3-10 y en la Ilustración 3-11.

```
2.-Modelo de minimo costo con demora en los pedidos
*****

Ingrese tasa de falla (demanda) [fallas/ut]=5
Ingrese el nivel de alerta [unidades]=6
Ingrese el tiempo de demora en la entrega [unidades de tiempo]=1
Ingrese una estimación optimista (>0) del tiempo de demora en la entrega [unidades de tiempo]=0.5
Ingrese una estimación pesimista del tiempo de demora en la entrega [unidades de tiempo]=2
¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no] = 1
5
La probabilidad de que el consumo sea menor que el nivel de alerta indicado es
76.2183 %
En mil casos, con la incertidumbre entregada para el tiempo de entrega,
la probabilidad media de que el consumo sea menor que el nivel de alerta indicado es
73.8876 %

Un 95% de los resultados se encuentran dentro del rango
[38.7904 ;98.2314] %

Para que la demanda pueda ser satisfecha un 90% del tiempo necesita:
8 unidades
Puede mejorar su estimacion de nivel de alerta con ayuda del grafico
```

Ilustración 3-10 Resultados de la modelación, modelo con demora en los pedidos

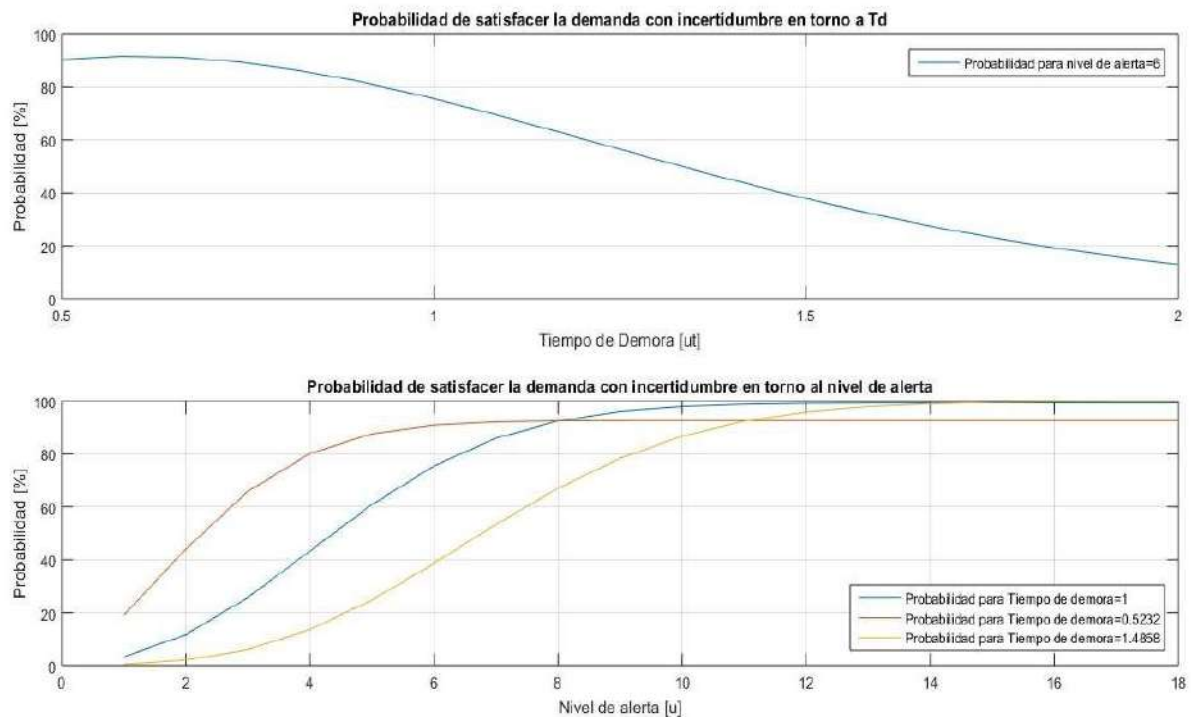


Ilustración 3-11 Gráficos de solución. Se aprecia la relación entre la probabilidad de respuesta y el tiempo de demora y la probabilidad de respuesta y el nivel de alerta (para los rangos probables de demanda)

A.3.5.2. Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

El modelo a continuación representa situaciones donde un mismo insumo puede ser requerido de forma constante por calendario (un overhaul) y de manera variable en intervenciones correctivas (fallas), lo que es típico de elementos como mangueras o correas. Aquí se considera el caso en que el tiempo de demora en la entrega es despreciable, como es el caso de repuestos fácilmente ubicables en el mercado.

En tal caso, la demanda tiene dos componentes, una fija y una variable y se representa como sigue:

$$\lambda^f = \lambda^c + \lambda^v$$

3.1

Siendo λ^c y λ^v las componentes constante (overhaul) y variable (reemplazo), respectivamente. El programa a través de una optimización calcula el tiempo óptimo de solicitud de repuestos T^* y el tamaño óptimo de pedido [1]

En este caso, se considera como parámetro incierto la demanda variable (λ^v) la cual está asociada a las fallas o intervenciones no planificadas.

A modo de ejemplo, en la consola se ingresan parámetros como los que se muestran en la Tabla 3-21

Tabla 3-2: Parámetros de referencia para cálculo en modelo de demanda compuesta

Variable	Notación	Valor	Unidades
Tasa media de fallas	Lc	50	fallas/ut
Tasa optimista	Lc min	48	fallas/ut
Tasa pesimista	Lc máx.	54	fallas/ut
Precio Unitario	Pu	20	um
Tasa de descuento	I	15	%
Costo de realizar un pedido	Cad	100	um
Periodos entre overhaul	Tpo	2	ut
Repuestos requeridos por overhaul	Qo	10	unidades
Repuestos requeridos por intervención correctiva	Qv	1	unidades

Notas

- La tasa de descuento tiene relación con la *desvalorización* del dinero en el tiempo
- El *costo de realizar un pedido* es el costo *administrativo* por ejemplo, el salario de un comprador.

Se considera en este caso que no hay incertidumbre en los límites establecidos para la demanda (tasa media de fallas), por lo que se generan 1000 demandas que siguen una distribución triangular. Los resultados son los siguientes:

- La cantidad optima de pedido es
- 60.553 unidad(es)
- El tiempo óptimo de pedido es 1.101 unidad(es) de tiempo
- En 1000 repeticiones ,el tamaño óptimo medio observado es 60.9103, con un 95% de probabilidad que se encuentre en el rango [59.7112 ; 62.3648]
- En 1000 repeticiones ,la frecuencia optima de pedido observada es 1.0949, con un 95% de probabilidad que se encuentre en el rango [1.044 ; 1.1389]
- Considerando la incertidumbre informada, el pedido recomendado es de 61 unidades cada 1.22 unidades de tiempo
- La sensibilidad del costo a la variación en la demanda se puede apreciar en el grafico

La presentación de los resultados se aprecia en la Ilustración 3-12y en la Ilustración 3-13. En esta última, se muestra en la parte inferior el zoom en torno al óptimo sugerido.

3.-Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

Ingrese el valor unitario del repuesto (pu) [um/u]=20

Ingrese el costo de adquisicion del repuesto (Cad) [um/u]=100

Ingrese la tasa de descuento observada (tau) [%] =15

Ingrese el periodo entre Overhaul (Tpo) [ut] =2

Ingrese la cantidad de repuestos requerida por overhaul (qo) [unidades] =10

Ingrese la cantidad de repuestos requerida por intervencion (qv) [unidades] =1

Ingrese tasa media de falla (demanda x reemplazo) [fallas/ut]=50

Ingrese una estimacion optimista para la tasa de falla variable (lamnda min)[fallas/ut]=48

Ingrese una estimacion pesimista para la tasa de falla variable (lamnda max)[fallas/ut]=54

¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no]0

La cantidad optima de pedido es

60.553 unidad(es)

El tiempo optimo de pedido es

1.101 unidad(es) de tiempo

En 1000 repeticiones ,el tamaño optimo medio observado es 60.9103, con un 95% de probabilidad que se encuentre en el rango [59.

En 1000 repeticiones ,la frecuencia optima de pedido observada es 1.0949, con un 95% de probabilidad que se encuentre en el ran

Considerando la incertidumbre informada, el pedido recomendado es de 61 unidades cada 1.22 unidades de tiempo

La sensibilidad del costo a la variacion en la demanda se puede apreciar en el grafico

Ilustración 3-12 Resultados de la optimización de demanda compuesta

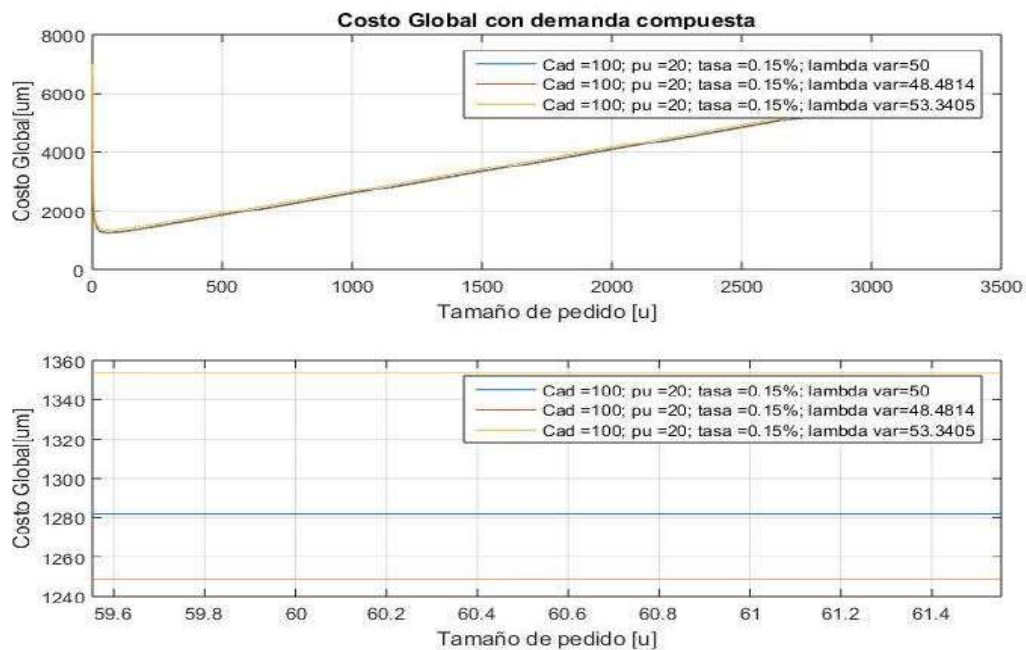


Ilustración 3-13 Gráficos de costo global contra tamaño de pedido, vista global y vista centrada en el óptimo. Se aprecia la diferencia entre escenario optimista y escenario pesimista

A.3.5.3. Minimización del costo global con costo de falla

En este caso, se busca minimizar los costos asociados a la compra de repuestos considerando que existe un costo de falla, c_f , asociado a las pérdidas de producción o cualquier acción que busque enmendar el daño causado por la falta del elemento (por ejemplo, una multa por no cumplimiento de disponibilidad). Se considera además un *nivel de servicio α* (porcentaje del tiempo en que el repuesto está disponible en la bodega), dependiendo de si el repuesto se consume inmediatamente al llegar o si queda un remanente como inventario en bodega, luego de un cierto tiempo de demora en la entrega.

Los parámetros del modelo son

- La tasa de falla $\lambda(t)$
- pu el precio unitario de cada elemento
- la tasa de descuento τ
- Cad el costo de adquisición (administrativo)
- Cf el costo de falla conocido

A modo de ejemplo, se asigna a estos parámetros los valores de la Tabla 3-3. Se considera que la variable incierta en este caso es la tasa de demanda, con incertidumbre en los límites entregados y que los repuestos son consumidos inmediatamente al llegar.

Tabla 3-3: Parámetros referenciales para modelo de mínimo costo global con costo de falla

Variable	Notación	Valor	Unidad
Costo de adquisición	Cad	2	um
tasa de demanda	lambda	20	fallas/ut
tasa de demanda optimista	lambda min	17	fallas/ut
tasa de demanda pesimista	lambda máx.	22	fallas/ut
Precio Unitario	pu	2	um
Tasa de descuento	tau	15	%
Costo de Falla	Cf	2	um

Los resultados arrojados por el modelo son

- De acuerdo a los parámetros entregados, se justifica no tener repuestos por un 13.0435 % del tiempo
- La cantidad optima de pedido sin considerar la incertidumbre es 17.5119 unidad(es)
- El tiempo óptimo de pedido es 0.88 unidad(es) de tiempo
- En mil repeticiones, el valor medio óptimo de pedido observado es de 17.4935 unidades, con un 95% de los resultados en el rango [16.7323 , 18.2177]
- En mil repeticiones, el valor medio óptimo de intervalo de solicitud observado es de 0.87771 unidades, con un 95% de los resultados en el rango [0.80822 , 0.95808]
- Considerando la incertidumbre informada, el pedido optimo es de 18 unidades cada 0.9 unidades de tiempo
- La sensibilidad a la demanda, considerando la incertidumbre informada, puede apreciarse en el gráfico.

La presentación gráfica de los resultados se aprecia en la Ilustración 3-14 y en la

1.-Minimo costo global con costo de falla

Ingrese tasa de falla promedio [fallas/ut] = 20

Ingrese el costo de adquisicion del repuesto (Cad) [um/u] = 2

Ingrese el costo por falla de inventario del repuesto (cf) [um/ut] = 2

Ingrese el valor unitario del repuesto (pu) [um/u] = 2

Ingrese la tasa de descuento observada (tau) [%] = 15

Ingrese una estimacion optimista para la demanda [fallas/ut] = 17

Ingrese una estimacion pesimista para la demanda [fallas/ut] = 22

¿Existe posibilidad que estos límites varien levemente? [1= si, 0 = no] 1

Los repuestos son consumidos inmediatamente al llegar? (1 = si, 0 = no)= 1

De acuerdo a los parametros entregados, se justifica no tener repuestos por un 13.0435 % del tiempo

La catidad optima de pedido sin considerar la incertidumbre es 17.5119 unidad(es)

El tiempo optimo de pedido es 0.88 unidad(es) de tiempo

En mil repeticiones, el valor medio optimo de pedido observado es de 17.4935 unidades, con un 95% de los resultados en el

En mil repeticiones, el valor medio optimo de intervalo de solicitud observado es de 0.87771 unidades, con un 95% de los :

Considerando la incertidumbre informada, el pedido optimo es de 18 unidades cada 0.9 unidades de tiempo

La sensibilidad a la demanda ,considerando la incertidumbre informada, puede apreciarse en el gráfico.

Ilustración 3-14 resultados del modelo de minimización de costo global con costo de falla.

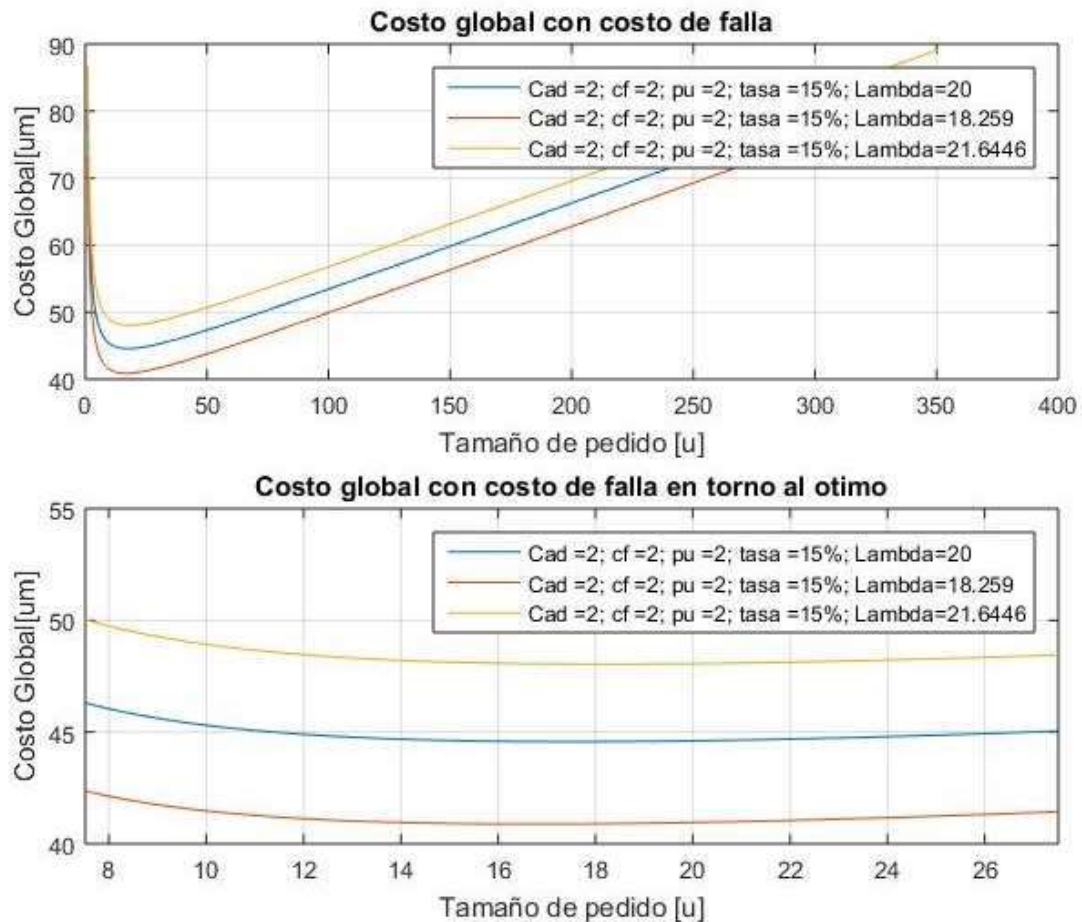


Ilustración 3-15 Grafico de función de costo global general y en torno al óptimo, se aprecia la diferencia entre escenario optimista y escenario pesimista

A.3.5.4. Compras agrupadas

Este modelo aplica cuando tenemos la posibilidad de obtener ahorros al agrupar en una orden de compra varios ítems. El objetivo es ahorrar lo más posible en los gastos de envío o distribución, por ejemplo, puede ser mucho más conveniente despachar en un envío único a una faena distante un pallet o contenedor con repuestos, que solicitar cada uno de ellos por separado. Tiene las siguientes condiciones

- La tasa de demanda es conocida y constante; para todos los ítems
- para cualquier ítem: el nivel de inventario nunca llega a cero;
- no hay demoras en las entregas;
- El horizonte de análisis es infinito.

En una forma gráfica el problema se presenta en la Ilustración 3-16

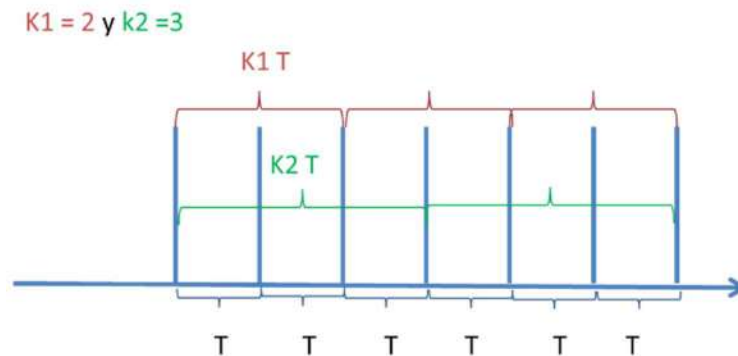


Ilustración 3-16 Ilustración grafica de compras agrupadas

El programa estima las fracciones k y el periodo T , de forma tal de optimizar las solicitudes siendo:

- T : intervalo básico de tiempo;
- k_i : número (entero) de ciclos básicos entre dos pedidos de ítem i ,

Tabla 3-4 Parámetros de referencia para modelo de compras agrupadas

Variable	Notación	Unidades	Valor			
Costo de generar un pedido	Cad	um/orden	500			
Tasa de descuento	tau	adim	0,15			
Elemento	i	Unidad	1	2	3	4
Costo de adquisición individual	Cad,i	um/orden	300	50	100	200
Tasa de demanda	L,i	u/ut	1	1	6	1
Costo de almacenamiento por unidad de tiempo	Ca,i	um/ut/u	50	50	50	50

El modulo entrega la posibilidad de seleccionar como variable una de las tasas de demanda informadas, ingresando el numeral según orden de ingreso. Por ejemplo, en la tabla, para escoger la tercera tasa (6), se debe digitar 3 en la consola.

Con los valores de la Tabla 3-4, el programa entrega los siguientes resultados:

```

Costo global obtenido al agrupar los pedidos es de 994.9874 [um]
Las cantidades de pedido optimo para cada elemento son =
    4
    2
    11
    4

Los intervalos de pedido optimo para cada elemento son=
    3.6181
    1.8091
    1.8091
    3.6181

En 100 repeticiones, la incertidumbre sobre la demanda (lambda =6), genera un intervalo de demandas entre
4.3623 y6.6347. La sensibilidad a dicha variacion de la demanda se aprecia en el grafico

```

- Costo global obtenido al agrupar los pedidos es de 994.9874 [um]
- Las cantidades de pedido óptimo para cada elemento son =
 - 4
 - 2
 - 11
 - 4
- Los intervalos de pedido óptimo para cada elemento son=
 - 3.6181
 - 1.8091
 - 1.8091
 - 3.6181
- En 100 repeticiones, la incertidumbre sobre la demanda ($\lambda = 6$), genera un intervalo de demandas entre 4.3623 y 6.6347. La sensibilidad a dicha variación de la demanda se aprecia en el gráfico

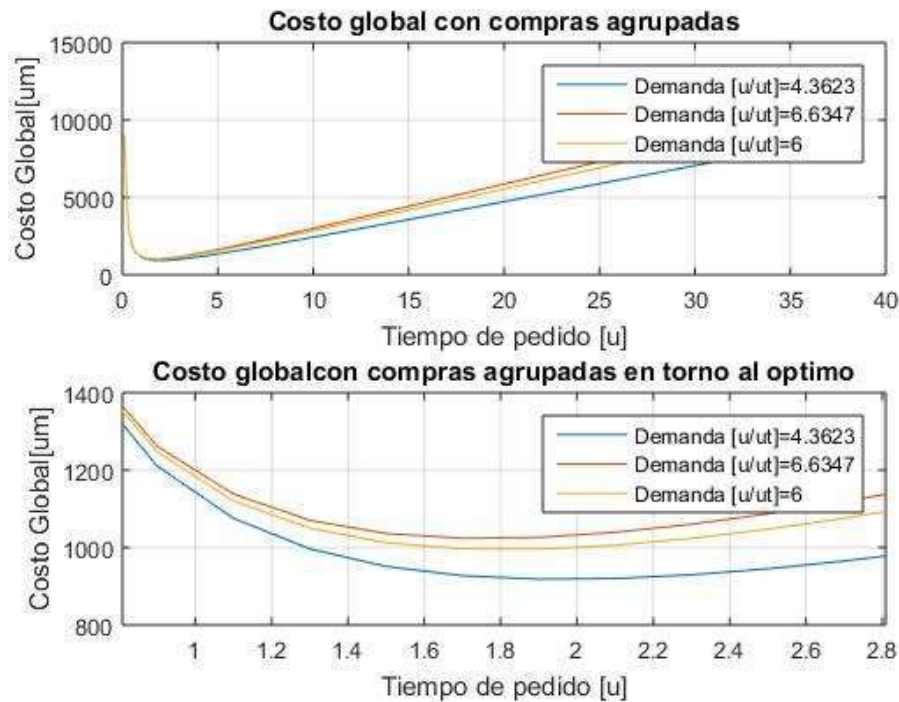


Ilustración 3-17: Situación de compras agrupadas en tres escenarios.

Estas repuestas permiten definir con precisión la cantidad de pedido y el intervalo mínimo, para lograr coincidir las demandas y minimizar las veces que se realiza una solicitud y evaluar los cambios probables en el costo global en el caso de oscilar la demanda seleccionada.

A.3.5.5. Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación

Este modelo está orientado a sacar provecho de los posibles ahorros que pudiesen generarse al consolidar repuestos entre varias bodegas (o compañías). Por ejemplo, si se tiene la misma máquina operando en distintas faenas y se tiene algún repuesto cuyo costo sea alto o de difícil obtención, una buena estrategia es considerar cada bodega independiente como un subconjunto de una bodega global, a la cual cada participante tiene acceso según su necesidad, como se explica en la Ilustración 3-18

Los parámetros de entrada del modelo son:

- η la tasa de uso del equipo (qué porcentaje del tiempo total programado se requiere el uso de la máquina, por ejemplo 6 de 8 horas de un turno)
- T_{bur} Tiempo entre intervenciones no programadas (fallas)
- nu el número de componentes instalados en toda la flota participante
- T_{at} tiempo entre la falla y reposición del componente (su reparación o compra)
- La cantidad de repuestos disponibles k (correspondiente al número de requerimientos).
- El nivel de servicio α el tiempo que se requiere que el repuesto esté disponible, es decir, la probabilidad de satisfacer la demanda inmediatamente, dado que hay k repuestos para atender las fallas de puedan sufrir las nu unidades en operación

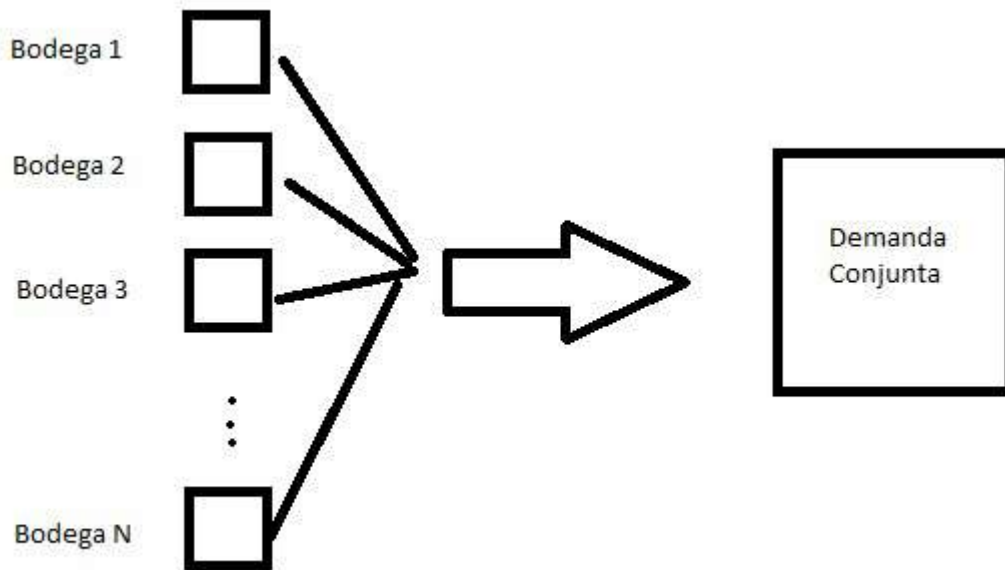


Ilustración 3-18 Situación de consolidación de bodegas

Si no existen unidades de repuesto ($k = 0$), la probabilidad de satisfacer la demanda es nula. Puede consultarse el desarrollo teórico del modelo en [1]

Tabla 3-5 Parámetros de evaluación de modelo de cooperación

Parámetro	Valor
Disponibilidad global requerida	99 %
Disponibilidad local requerida	80 %
Cantidad de bodegas	4
Unidades por bodega	80, 240, 240, 100
Tiempo de reparación (T_{at})	21 días
Tiempo entre intervenciones ($T_{bur_{ct}}$)	730 días

En este caso, el modelo considera como objeto de posible variación el tiempo entre intervenciones no programadas, pues está más sujeto a factores externos que el tiempo de taller, pues este último es generalmente una situación con mayor control.

Si se utilizan los valores de la Tabla 4-17, un intervalo de variación para T_{bur} entre [700, 750] y certeza sobre estos límites el programa entrega los resultados a continuación

- La cantidad optima de repuestos por base es $[u]=$
 - 4
 - 11
 - 11
 - 5
- En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la cantidad media de repuestos por base es $[u]=$
 - 4.0000

- 10.8600
- 10.8600
- 5.0000
- Con el 95% de las observaciones dentro del rango [u] =
 - '[4 ;4]'
 - '[10 ;11]'
 - '[10 ;11]'
 - '[5 ;5]'
- La cantidad optima de repuestos totales es 31 [u]
- En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la cantidad media total de repuestos es 30.72 unidades, con el 95% de los resultados en el intervalo [29,31]
- La confiabilidad óptima por base obtenida es [%]=
 - 91.6089
 - 95.0864
 - 95.0864
 - 92.7998
- En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la disponibilidad media por base es [u]=
 - 91.4899
 - 94.3879
 - 94.3879
 - 92.6806
- Con el 95% de las observaciones dentro del rango [u] =
 - '[90.6056 ;92.137]'
 - '[91.4651 ;95.4467]'
 - '[91.4651 ;95.4467]'
 - '[91.8014 ;93.3191]'
- La confiabilidad global optima obtenida es 99.6042 [%]
- En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la disponibilidad global media obtenida 99.4808 [%],
- con el 95% de los resultados en el intervalo [99.0165,99.6696]
- Se ha generado el archivo "Consolidacion.xlsx", donde puede ver el resultado de las simulaciones y los cambios en los resultados por la incertidumbre en el archivo

Dada la complejidad de la optimización multivariada, los resultados se presentan en un archivo Excel, disponible en la carpeta donde está alojado el Script, de nombre **Consolidacion.xlsx**. Los resultados de dicho archivo se muestran en la tabla

Tabla 3-6 Tabla de resultados para el modelo de consolidación de bodegas

T. entre intervenciones no deseadas	Base	Elementos	Conf Local	Conf Global
730	1	4	91,61	99,60
730	2	11	95,09	99,60
730	3	11	95,09	99,60
730	4	5	92,80	99,60
704,53	1	4	90,61	99,02
704,53	2	10	91,47	99,02
704,53	3	10	91,47	99,02
704,53	4	5	91,80	99,02
744,86	1	4	92,14	99,67
744,86	2	11	95,45	99,67
744,86	3	11	95,45	99,67
744,86	4	5	93,32	99,67

Se presentan las 3 situaciones, con Tbur original, su cota inferior de acuerdo a la simulación y su cota superior. Si las variaciones so fuesen muy grandes, se podría seleccionar el nivel de inventario de acuerdo a las capacidades locales de bodega y el nivel presupuestal y no solo de la disponibilidad requerida.

A.3.5.6. Redundancia de 2 componentes sin recambio de elemento operativo

El modelo considera el caso en que dos componentes idénticos funcionan en el mismo equipo, pero uno de ellos funciona como salvaguarda en caso de que el otro falle, por ejemplo, los radiadores de motores de grandes dimensiones o ciertos componentes de aviones que, por lógica, no pueden ser reemplazados mientras el equipo se encuentre en vuelo. Si uno de ellos llegase a fallar, se hace una solicitud de reemplazo de ambos, pero el que siga operativo permanecerá como repuesto en bodega para el próximo ciclo una vez que lleguen los repuestos, agregando un costo de almacenamiento al costo de operación de cada ciclo. Se impone además una restricción sobre la disponibilidad del sistema

El modelo a continuación es detallado en [1] y a grandes rasgos, sus supuestos son:

- Las probabilidades de falla de ambos componentes son conocidas y están caracterizadas. En este caso, el modelo tiene implementada funciones Weibull.
- Se consideran los costos de una orden normal, una orden urgente, un quiebre de inventario, de almacenamiento y de rescate constantes.
- Si ambos componentes fallan, se supone que el sistema falla.

Los parámetros del modelo son:

- Los parámetros de las funciones de falla de los componentes (variables de Weibull)
- El costo de falla (quiebre de inventario) por el periodo en que el sistema queda fuera de servicio k_f

- El costo de almacenamiento k_i por unidad de tiempo del componente inventariado (stand by)
- El costo de rescate k_s por la vida útil remanente del componente reemplazado que aún se encuentre operativo.
- Los costos de solicitud urgente c_1 (>0) y normal c_2 (>0)
- Los tiempos de reposición (Lead Time) L_1 y L_2
- α , la restricción impuesta a la disponibilidad del sistema.
- Ca_1 y Ca_2 los costos de adquisición de ambas unidades (1 y 2)

De modo que el problema se presenta como la minimización de un costo global $C(t)$ sujeto a que la disponibilidad $A(t)$ es mayor que un cierto parámetro α . El modelo se puede entender de acuerdo a la Ilustración 3-19

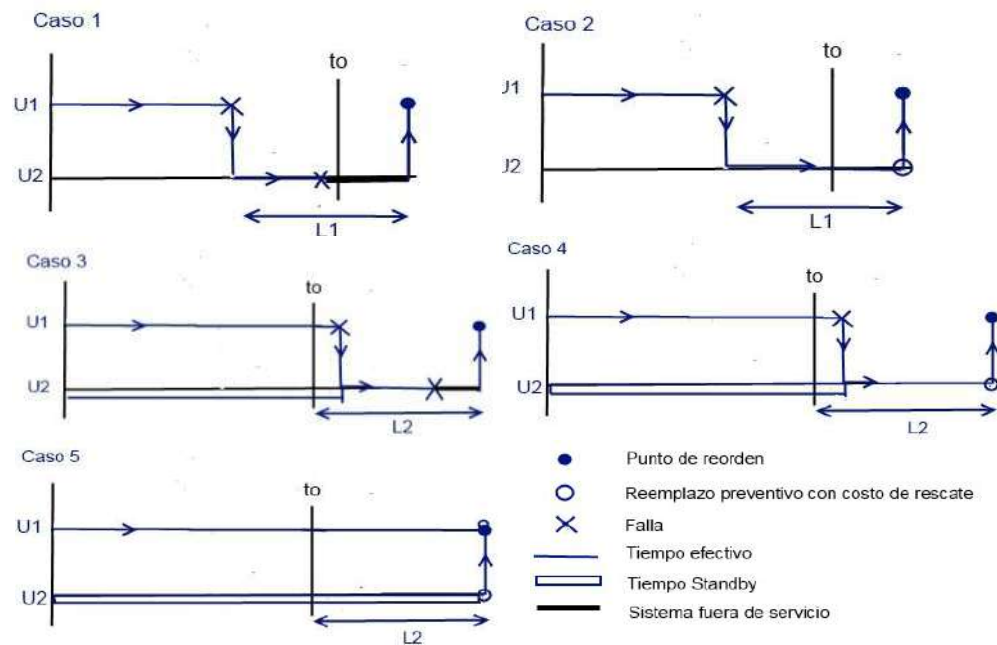


Ilustración 3-19 Ciclo de funcionamiento de las unidades redundantes U1 y U2

El código incorpora algoritmos de optimización complejos, por lo que es uno de los que más tiempo de cálculo requiere. Una situación base toma en promedio 400 segundos de cálculo, sin considerar incertidumbre. Considerando aquello, se deja este análisis como optativo, pues agrega cerca de 600 segundos adicionales al tiempo de cálculo.

Para incorporar la incertidumbre, se deja como opción para el usuario decidir sobre si el parámetro a variar será el tiempo normal de demora en la entrega o el tiempo de emergencia, L_n y L_e , respectivamente. A modo de ejemplo, se incorporan al modelo los parámetros de la Tabla 3-7,

Tabla 3-7 Parámetros de evaluación de modelo de redundancia

Parámetro	Unidad	Valor
CP1	Um	20.000
CP2	um	20.000
COe	um	1.000
CO _{no}	um	400
Le	Días	42
Ln	Días	60
Kh2	Um/ut	8
Kr1	Um	700
Kr2	Um	700
α	%	99.9
β_1	2	
β_2	2	
γ_1	250	
γ_2	400	

Al iniciar el proceso de optimización, el programa desplegará en pantalla el mensaje ****Se inicia el proceso de optimización. Espere****. A partir de este momento, pasaran cerca de 400 segundos (6 a 7 min aproximadamente) para que se desplieguen los resultados. En el intertanto, se mostraran los resultados de las diversas iteraciones del programa.

Posteriormente, se hará la consulta sobre cual parámetro variar (Ln o Le). Realizado aquello, serán 1000 segundos adicionales para obtener una respuesta. La solución propuesta entrega el óptimo considerando la variación de dicho parámetro como un resultado probable.

Para el ejemplo, el grafo resultante, considerando variación para Ln de tipo triangular (limites seguros de 55 y 63 ut) se aprecia en la. Los resultados de la simulación son.

- En mil casos, se generan los extremos para el parámetro $Ln = [56.1845, 62.1073]$
- Valor del tiempo óptimo de reemplazo en [ut] estimado en el caso de base es 369.8222
- El costo medio de dicho tiempo es [um] 160.6314
- Considerando la incertidumbre informada, el tiempo óptimo de reemplazo es 383.255 unidades de tiempo

Para este ejemplo, la incertidumbre generada tiene la suficiente importancia como para desplazar en 13 [ut] aproximadamente el óptimo original, tal como se aprecia en la Ilustración 3-20. Si bien pareciese ser importante, la primera de las curvas nos muestra la semejanza entre todos los escenarios.

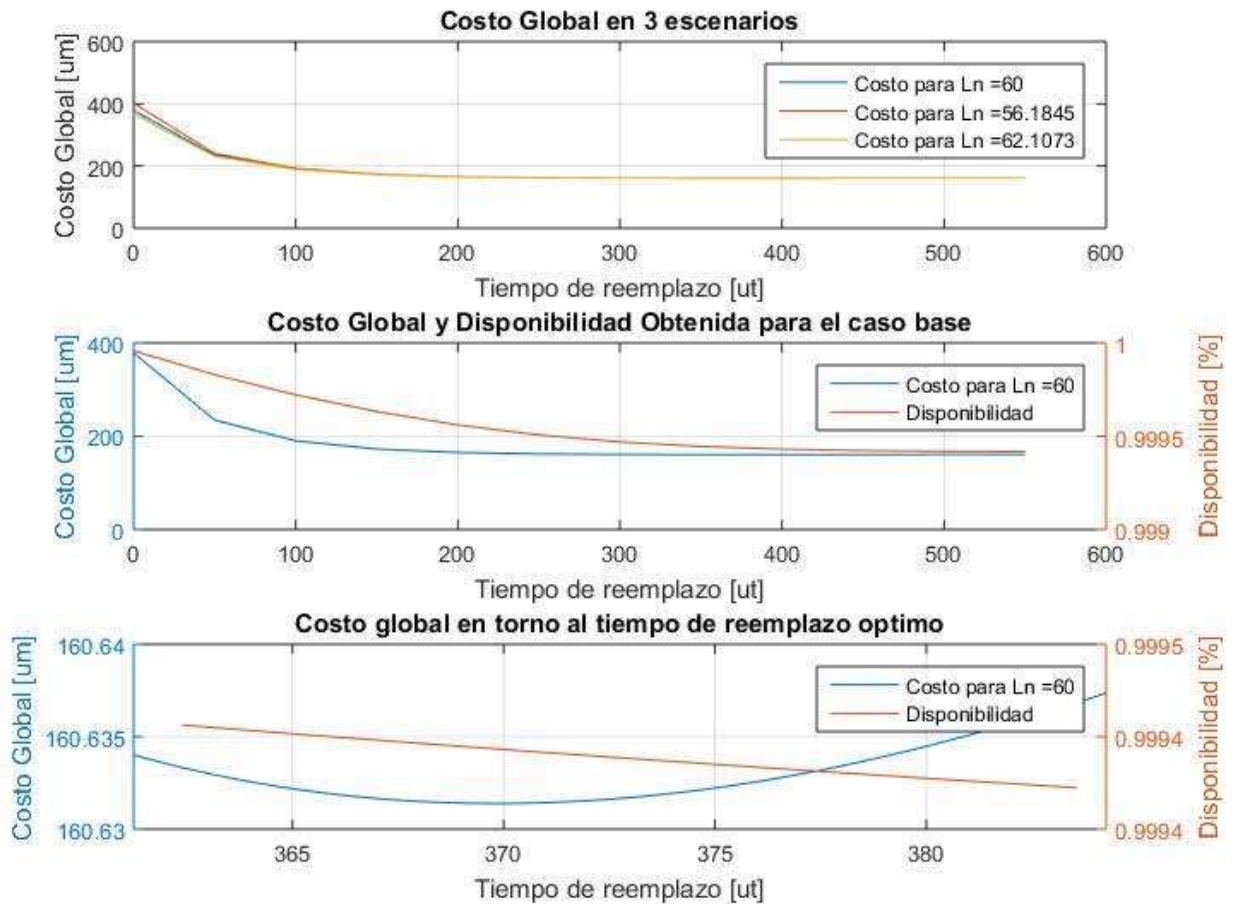


Ilustración 3-20 Grafico de optimización de elementos en redundancia. Se distinguen 3 situaciones: con las tres curvas de posibles escenarios, la curva original global y la curva en torno al óptimo.

A.3.5.7. Demanda Aleatoria

Este modelo aplica cuando la demanda no es necesariamente constante, sino que sigue una cierta distribución de probabilidad y se desea fijar un nivel de alerta. El programa tiene incorporado de momento solo el caso en que la distribución siga una ley de Poisson.

El método propuesto en utiliza aproximaciones numéricas para definir el óptimo en un sistema de inventario de la forma $\{S-1, S\}$, esto es, que se solicita la reposición de un ítem en cuanto se utiliza. Existe un costo de almacenamiento para cada ítem de valor H , un tiempo de reposición arbitrario τ y un costo L para las solicitudes.

Dado un nivel de stock s^* , se generan demandas aleatorias con una tasa λ por unidad de tiempo. Con cada demanda se solicita un reemplazo y el tiempo hasta la entrega tiene una distribución con media τ . Se incurre en un costo L de penalización cuando se incumple con la demanda por solicitudes de emergencia, o por perdida debido a quiebre de inventario.

Las variables de entrada para este modelo son, en consecuencia

- La tasa λ y la media τ

- Los costos L y H

El modelo solicita un cierto nivel de variación para el valor de τ , con el fin de generar valores de incertidumbre. La programación entrega un óptimo aproximado, el cual es corregido (internamente) de forma numérica y ajustado nuevamente, esta vez considerando la incertidumbre y sensibilidad requeridas por el usuario.

Reemplazando los parámetros por los valores indicados en la Tabla 3-8, se obtienen los siguientes resultados:

- Según el modelo, el inventario mínimo optimo aproximado a mantener es 55.9287 unidades
- Al precisar la aproximación implícita del modelo, SIN considerar la incertidumbre informada, el nivel de inventario optimo es 56 unidades
- En mil variaciones del tiempo de demora, la media a mantener es 55.8311 unidades, con un 95% de los casos dentro del rango: [35.1848,75.7047]
- Considerando la incertidumbre informada, el nivel de inventario optimo es 56 unidades
- La sensibilidad del costo al tiempo de entrega se puede apreciar en el gráfico

Tabla 3-8: Parámetros para el modelo de demanda aleatoria

Variable	Notación	Valor	Unidades
Tasa de demanda	lambda	30	u/ut
Tiempo de entrega	τ	1	ut
Costo de almacenamiento	H	1	um/ut
Variación de τ		5	%
Costo de falla	L	10000	um

Los resultados de los modelos se aprecian en la Ilustración 3-21 y en la Ilustración 3-22 . Es posible distinguir grandes diferencias al inicio de las tres curvas, sin embargo, esos casos corresponden a situaciones donde el nivel de inventario seleccionado no cubre la necesidad mínima por unidad de tiempo del problema (lambda). Estos casos no son considerados en la optimización. Después de esta zona, las curvas se asemejan mucho más y es posible evaluar sus diferencias con mayor precisión.

```

.. _-----_-----_-----_
Ingrese el costo de penalizacion por falla [um]= 10000
Ingrese el costo de almacenamiento por unidad de tiempo [um/ut]= 1
Ingrese tasa de falla (demanda) por unidad de tiempo [fallas/ut]= 30
Ingrese el tiempo de entrega de los pedidos (lead time) [ut]= 1
Ingrese una estimacion optimista para el tiempo de entrega[ut]= 0.5
Ingrese una estimacion pesimista para el tiempo de entrega[ut]= 2
¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no]= 1
Segun el modelo, el inventario minimo optimo aproximado a mantener es 55.9287unidades
Al precisar la aproximacion implicita del modelo, SIN considerar la incertidumbre informada, el nivel de inventar:
En mil variaciones del tiempo de demora, la media a mantener es 55.8311 unidades, con un 95% de los casos dentro de
Considerando la incertidumbre informada, el nivel de inventario optimo es 56 unidades
La sensibilidad del costo al tiempo de entrega se puede apreciar en el gráfico
~\ |

```

Ilustración 3-21 Despliegue en consola de la respuesta al problema.

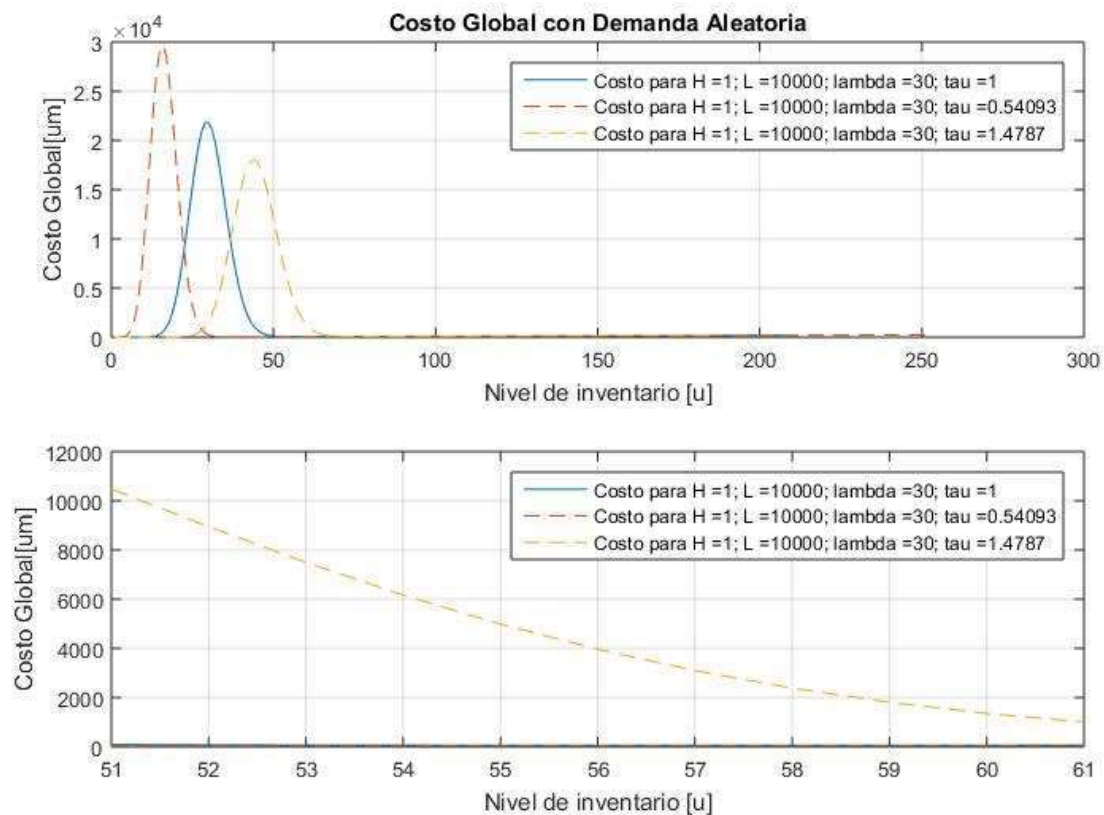


Ilustración 3-22 Relación entre el costo global y en nivel de inventario seleccionado. En el segundo gráfico, se aprecia la situación en torno al óptimo

A.3.5.8. Demanda Intermitente

Una demanda intermitente es aquella en que pueden existir períodos extensos durante los cuales no existe solicitud alguna, para luego pasar a períodos puntuales donde el nivel de requerimientos se eleva bruscamente. Tal es el caso de ciertos componentes o equipos, particularmente aquellos cuyo valor es elevado.

Sean

- $Y(t)$ la estimación del tamaño medio de las demandas no nulas
- $P(t)$ la estimación del intervalo medio entre demandas no nulas.
- Q el intervalo de tiempo (entero) desde la última demanda no nula.
- $X(t)$, la demanda en el período t
- α un factor de suavizado, típicamente entre 0 y 1.
- $X^{\wedge}(t)$ la predicción de la demanda en el período t
- β un factor de suavizado, típicamente entre 0 y 1
- t_n periodo donde ocurre la última demanda
- t_{n-1} periodo donde ocurre la demanda anterior
- $(t_n - t_{n-1})$ intervalo entre demandas
- X_n demanda en el período n
- T número de períodos

- N número de ocasiones con demandas , $N \leq T$

A diferencia de los modelos anteriormente presentados, en éste se requiere directamente el historial de demandas (en los otros se requiere la distribución de la demanda o los parámetros que la caracterizan), junto con los parámetros de suavización los cuales deben estar entre 0 y 1.

Las variables de entrada del modelo son:

- El historial completo de pedidos del repuesto o componente
- La variable de suavización α
- La variable de suavización β

El programa tiene la capacidad de incorporar un archivo de datos de tipo planilla, del cual se solicitará el nombre y debe estar alojado en la misma carpeta que los modelos, con el formato de la Ilustración 3-23

	A	B
1	#	data
2	1	0
3	2	0
4	3	19
5	4	0
6	5	0
7	6	0
8	7	4
9	8	18
10	9	17
11	10	0
12	11	0
13	12	0
14	13	0
15	14	0

Ilustración 3-23 Formato de datos de la serie de demanda aleatorio

Es importante que siempre se mantenga dicho formato para evitar problemas de compilación.

A modo de ejemplo, se suministra el archivo “data.xlsx” para la ejecución de los cálculos. Se considera además valores para α y β de 0.3 y 0.5, respectivamente. En el caso genérico, se deja la opción al usuario de generar incertidumbre sobre alguno de estos dos valores, en este caso, se utilizara la variable beta, con límites 0.3 y 0.7.

Se presentan los valores del archivo “data.xlsx” en la Tabla 3-9

Tabla 3-9 Datos de demanda intermitente

#	data	#	data
1	0	13	0
2	0	14	0
3	19	15	3
4	0	16	0
5	0	17	0
6	0	18	19
7	4	19	0
8	18	20	0
9	17	21	0
10	0	22	5
11	0	23	4
12	0	24	5

Con esta información, el modelo entrega como resultado que la proyección de demanda para el siguiente período es de 4.2913 unidades.

La presentación de los resultados se muestra en la Ilustración 3-24

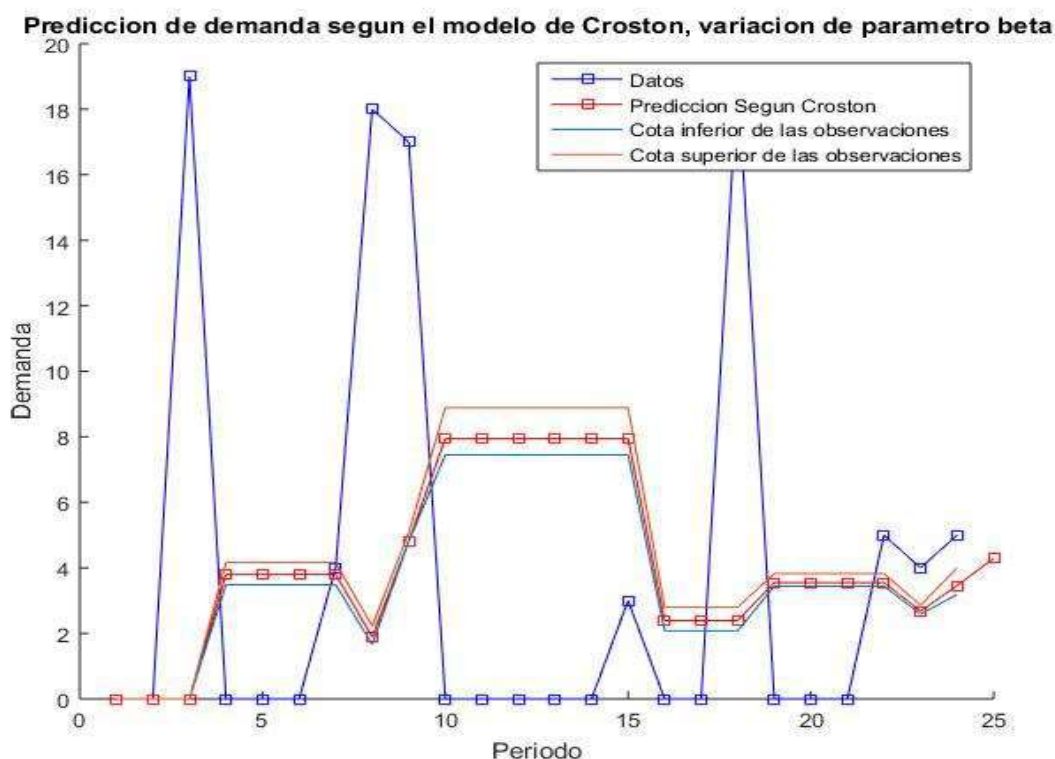


Ilustración 3-24 Predicción de Croston ante la demanda entregada

A.4 Comentarios

A.4.1. Manejo de Resultados

El objetivo detrás de la inclusión de incertidumbre a los parámetros considerados tradicionalmente constantes, es otorgar un espacio de soluciones más que una solución puntual a un problema determinado. Estos resultados deben ser estudiados con detención y ver alternativas de mejora en base a ello: condiciones operacionales, ambientales u otros pueden provocar que el problema se aleje del modelo y se encuentren discrepancias con la modelación.

Debe tenerse en consideración que la fiabilidad de los modelos será mejor a medida que la información entregada sea más acertada y en mayor cantidad.

A.4.2. Limitaciones del programa

Algunos modelos tienen simulaciones complejas dentro de su programación, por ejemplo, el modelo de elementos en redundancia (A.3.5.6) y el tiempo de cálculo es bastante extenso (sobre todo si se realiza el análisis de sensibilidad). Esto debe ser conocido y asumido por el usuario.

De momento. El programa no considera una interfaz gráfica “amigable”. Dicho elemento puede ser desarrollado con posterioridad con las herramientas disponibles en MATLAB o el lenguaje que se seleccione para implementar los modelos.

A.4.3. Traspaso a otros lenguajes de programación

MATLAB posee API's para diversos lenguajes de programación, desde C/C++/Fortran hasta Python Java, C#, entre otros. Esto significa que de cualquiera de esos lenguajes es posible invocar scripts, siguiendo los pasos de integración correspondientes. Se sugiere seguir dicha alternativa más que *transformar* el código, puesto que los cálculos matriciales utilizados en MATLAB no tienen buen rendimiento en lenguajes orientados a objetos.

Esto debe ser tomado en consideración si se desea incorporar la aplicación a una plataforma realizada en los lenguajes mencionados

A.4.4. Requerimientos de hardware

Los cálculos necesarios (para los modelos complejos) son intensos en demanda de recursos físicos, por lo que se requiere que, de estar montado en un servidor web, este tenga la capacidad de reservar recursos exclusivos para el cálculo y limite la cantidad de consultas simultáneas. Una versión de escritorio puede recurrir a mayores recursos de la máquina, acelerando los tiempos de respuesta.

A.4.5. Posibilidades de crecimiento y mejora

El árbol de decisión (y el script principal) puede ser fácilmente modificado para incorporar nuevos modelos y el lenguaje matemático de programación otorga flexibilidad a la hora de escoger

cuales agregar. Se debe tener claro, de todas formas, en los casos que se requiera algún tipo de optimización, qué función de las bibliotecas de MATLAB es la que mejor aplica a cada caso.

La aplicación fue concebida para estar inmersa en un sistema de gestión integral de mantenimiento, por lo que se deben incorporar opciones de carga masiva de datos (como en A.3.5.8) para facilidad del usuario.

Es posible mejorar algunos algoritmos de optimización, a medida que sean desarrolladas nuevas bibliotecas en MATLAB. Por ejemplo, actualmente sólo la función GA (que invoca el método de optimización de algoritmo genético) es capaz de resolver la optimización mixta (con variables enteras y variables continuas) de A.3.5.4, pero su tiempo de resolución es lenta, comparado por ejemplo con la función SOVER de Microsoft Excel. Queda entonces el desafío de desarrollar dichos algoritmos e incorporarlos a la actual codificación o encontrar otro lenguaje que permita mejor desempeño en dichos casos.

Anexo B: Código fuente programado en MATLAB

B.1 Introducción

A continuación, se presenta el código de programación en lenguaje nativo de MATLAB®, correspondiente a cada elemento de la aplicación.

Se presenta en el siguiente orden:

1. Aplicación principal
2. Demanda con demora en los pedidos
3. Demanda constante y variable sin demora en los pedidos
4. Minimización del costo global con costo de falla
5. Compras agrupadas
6. Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación
7. Modelo para componentes a fallo seguro
8. Demanda Aleatoria
9. Demanda Intermitente

La codificación es suficiente para ejecutar el programa a modo de script, en el entorno MATLAB® o en la plataforma libre OCTAVE®²⁴

La aplicación está estructurada de forma tal que desde el script principal se invoca cada módulo a través de un script auxiliar para hacer el código menos abultado y más eficiente. En dicho módulo se invocan además todas las funciones adicionales que se requieran, según sea el caso.

B.2 Aplicación principal: Selector de Modelos

```
function []= SelectorDeModelos()

clear;
clc;

%variable auxiliar de inicio de bucle de consultas
ciclo=true;

%Primero, se consulta sobre si ya conoce el modelo a utilizar, de otra
%forma se aplica el cuestionario

disp(' ');
disp('Modelos de gestión de repuestos');
disp('*****');
disp(' ');
while ciclo == true
    opt1=input('Si está familiarizado con los modelos de este programa, digite 1, de
otro modo digite 0 ');
    if opt1 == 0

        %Inicio árbol de decisión
        disp('A continuación se realizaran una serie de consultas. Dependiendo de las
respuestas entregadas ');
```

²⁴ En octave, existe la posibilidad que no todas las funciones primarias (de la biblioteca de MATLAB) se encuentren disponibles, según la actualización del servicio.

```

disp('se seleccionara un modelo de gestión de repuestos de los 8
disponibles. ');
disp('Cada modelo requiere ciertos parametros que deberan ser entregados por el
usuario. ');
disp('Considere la notacion que sigue: ');
disp(' ');
disp('1.- [um] = unidades monetarias ');
disp('2.- [ut] = unidades de tiempo ');
disp('3.- [u] = unidades del elemento ');
disp(' ');
disp('Procure mantener la consistencia de las unidades al momento de ingresar
los datos. ');
disp('Puede encontrar mas detalles en el manual de la aplicacion');
disp(' ');
disp(' **Asistente de Seleccion de Modelos** ');
disp(' ');
opt3=input('¿La demanda del repuesto requerido es constante? [1= SI, 0= NO] ');
if opt3==1
    disp(' ');
    disp('¿La entrega de los repuestos es inmediata?');
    opt4=input('(Típico de repuestos de alta rotación, sencillos de adquirir y
disponibles en el mercado) [1= SI, 0= NO] ');
    if opt4==0
        disp(' ');
        disp('¿Existe un costo asociado al quiebre (falla) de inventario?');
        opt5=input('(asociados a merma de producción, multas, etc.) [1= SI, 0=
NO] ');

        if opt5==1

            disp(' ');
            disp('1.-Minimo costo global con costo de falla');
            disp('*****');
            disp(' ');
            disp('Este modelo busca minimizar el costo global de mantenimiento
considerando los ');
            disp('costos asociados al quiebre de inventario');

            Min_Cg_Cfalla_final();
            ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

        end %opt5==1

        if opt5==0

            disp(' ');
            disp('Modelo de minimo costo con demora en los pedidos');
            disp('*****');
            disp(' ');
            disp('Este modelo busca minimizar el costo global de mantenimiento
considerando que ');
            disp('existe un tiempo de demora en la entrega del repuesto a la
bodega');

            disp(' ');

            EOQ_con_demora_final_Script();
            ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

        end %opt5==0

    end %opt4==0
    if opt4==1

        disp(' ');
        disp('Modelo de Minimo Costo Global en Compras Agrupadas');
        disp('*****');
        disp(' ');

```

```

disp('Este modelo considera el caso en que se busque ahorrar costos
agrupando las compras ');
disp('de distintos repuestos, con distintas demandas, de forma
conjunta');
disp(' ');

Compras_Agrupadas_final_script()
ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

end%opt4=0

end %opt3

if opt3==0

disp('¿La entrega de los repuestos es inmediata?');
opt6=input('(Típico de repuestos de alta rotación, sencillos de adquirir y
disponibles en el mercado) [1= SI, 0= NO] ');
if opt6==1
disp(' ');
disp('3.-Demanda constante y variable sin demora en los pedidos');
disp('*****');
disp(' ');

CteVar_sin_demora_final ();
ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

end %opt6==1
if opt6==0
opt7=input('¿El repuesto es reparable? [1= si, 0= no] ');

if opt7==1
disp(' ');
disp('Repuestos reparables considerando nivel de servicio y
consolidación');
disp('*****');
disp(' ');

RepConsol_script();
ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

end %opt7==1

if opt7==0
opt8=input('¿El repuesto tiene baja rotación? (es decir, no tiene
alta demanda) [1= SI, 0= NO] ');

if opt8==1
opt9=input('¿La demanda del repuesto sigue una distribución
estadística conocida?');

if opt9==1

disp(' ');
disp('Inventario de componentes críticos de demanda
aleatoria');

disp('*****');
disp(' ');
disp('Este modelo considera la demanda de un producto cuyo
requerimiento varía de acuerdo a una distribución de Poisson');
disp('Entrega como resultado el nivel mínimo de inventario
requerido');

disp(' ');

Dda_aleatoria_final_script()

```

```

        ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 =
no] ');

        end %opt9==1

        if opt9==0
            disp(' ');
            disp('Inventario de componentes críticos de demanda
intermitente');
disp('*****');
            disp(' ');
            disp('Este modelo considera la demanda de un producto cuyo
requerimiento es nulo por períodos');
            disp('para luego aumentar sorpresivamente. Se requerira en
este caso un archivo con la historia de la demanda.');
```

disp(' ');

croston_modif_final_script();

ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 =
no] ');

end %opt9==0

end %opt8==1

if opt8==0

disp(' ');

disp('Modelo para componentes a fallo seguro: sistema de dos
unidades redundantes con restriccion de disponibilidad');

disp('*****');

disp(' ');

disp('El modelo considera dos unidades, una de ellas en Stand-by.');

disp('Al fallar una, ambas son retiradas, pero una queda como
repuesto');

disp('Se asume una distribucion de Weibull para las fallas, con
parametros beta y eta');

disp(' ');

Redundancia_script();

ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no] ');

end %opt8==0

end %opt7==0

end %opt6==0

end %opt3==0

else %opt1=0

disp('Seleccione el modelo a utilizar');

disp('*****');

disp(' ');

disp('1.-Minimo costo global con costo de falla');

disp('2.-Modelo con demora en los pedidos');

disp('3.-Demanda constante y variable sin demora en los pedidos');

disp('4.-Modelo Minimo Costo Global en Compras Agrupadas');

disp('5.-Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación');

disp('6.-Modelo para componentes a fallo seguro: sistema de dos unidades
redundantes con restriccion de disponibilidad');

disp('7.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda
aleatoria');

disp('8.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda
intermitente');

opt2=input('Su opcion: ');

if opt2 == 1

disp(' ');

```

disp('1.-Minimo costo global con costo de falla');
disp('*****');
disp(' ');

Min_Cg_Cfalla_final();
ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2 == 1

if opt2 == 2
    disp(' ');
    disp('2.-Modelo de minimo costo con demora en los pedidos');
    disp('*****');
    disp(' ');

    EOQ_con_demora_final_Script();
    ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2 == 2

if opt2 == 3
    disp(' ');
    disp('3.-Demanda constante y variable sin demora en los pedidos');
disp('*****');
    disp(' ');

    CteVar_sin_demora_final ();
    ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2 == 3

if opt2 == 4
    disp(' ');
    disp('4.-Modelo Minimo Costo Global en Compras Agrupadas');
    disp('*****');
    disp(' ');

    Compras_Agrupadas_final_script();
    ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2=4

if opt2 == 5
    disp(' ');
    disp('5.-Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación');
    disp('*****');
    disp(' ');

    RepConsol_script();
    ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2 == 5

if opt2 == 6
    disp(' ');
    disp('6.-Modelo para componentes a fallo seguro: sistema de dos unidades
redundantes con restriccion de disponibilidad');
disp('*****');
    disp(' ');

    Redundancia_script();
    ciclo= input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

end %opt2 == 6

if opt2 == 7
    disp(' ');

```



```

        disp('7.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda
aleatoria');

disp('*****');
    disp(' ');

    Dda_aleatoria_final_script();
    ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');
    end %opt2 == 7

    if opt2 == 8
        disp(' ');
        disp('8.-Inventario de componentes críticos de baja demanda: demanda
intermitente');
        disp('*****');
        disp(' ');

        croston_modif_final_script();
        ciclo=input('Desea realizar un nuevo calculo? [1 = si, 0 = no ]');

    end %opt2 == 8
    end %%opt1 == 0
end %while

```

B.3 Demanda con demora en los pedidos

B.3.1. Función principal

```

function [] = EOQ_con_demora_final_Script()

%Valores de inicio
    lambda=input('Ingrese tasa de falla (demanda) [fallas/ut]=');
    qa=input('Ingrese el nivel de alerta [unidades]=');
    Tdi=input('Ingrese el tiempo de demora en la entrega [unidades de tiempo]=');

    %Limites para las distribuciones
    minv=input('Ingrese una estimación optimista (>0) del tiempo de demora en la
entrega [unidades de tiempo]=');
    maxv=input('Ingrese una estimación pesimista del tiempo de demora en la entrega
[unidades de tiempo]=');
    optVar=input('¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no] = ');

    %Un arreglo de 20 puntos en torno a Td para generar las curvas de evolucion
    d=(maxv-minv)/19;
    Td=(minv:d:maxv);

    %Matriz vacia para almacenar los parametros,
    %MatParam=zeros(delta,3);
    MatParam=zeros(20,3);

    %La frecuencia y el nivel de alerta permanecen invariantes en este
    %ejercicio, se llena la ultima columna con los valores de Td
    MatParam(:,1)= lambda;
    MatParam(:,2)= qa;

    for i=1:20
        MatParam(i,3)=Td(i);
    end

    %Matriz de resultados
    MatRes=zeros(20,4);

    [prob, YQ, ZQ,YT,ZT, Pavg,Td2]= EOQ_con_demora_final (lambda,qa,Tdi, minv, maxv,
optVar);

```

```

disp('1');
for i=1:20
    [MatRes(i,1),MatRes(i,2),MatRes(i,3),MatRes(i,4)]=EOQ_con_demora_final
    (MatParam(i,1),MatParam(i,2),MatParam(i,3), minv, maxv,optVar);
end
disp('2');
%leyenda de graficos
sa=strcat('Probabilidad para nivel de alerta= ', num2str(qa));
sb=strcat('Probabilidad para Tiempo de demora= ', num2str(Tdi));
se=strcat('Probabilidad para Tiempo de demora= ', num2str(YT));
sf=strcat('Probabilidad para Tiempo de demora= ', num2str(ZT));
%----graficando resultados
disp('3');
Qplot=(1:1:3*qa);
%
    maxP=zeros(2,1);
    for i= 1: length(Qplot)
        Pplot(i)= EOQ_con_demora_final_aux (lambda,Qplot(i),Tdi);
        PplotY(i)= EOQ_con_demora_final_aux (lambda,Qplot(i),YT);
        PplotZ(i)= EOQ_con_demora_final_aux (lambda,Qplot(i),ZT);

    end
    disp('4');
    %estimando p>90%

    hold on
    ax1 = subplot(2,1,1);
    plot(Td,MatRes(:,1));
    xlabel('Tiempo de Demora [ut]')
    ylabel('Probabilidad [%]')
    title('Probabilidad de satisfacer la demanda con incertidumbre en torno a Td')
    legend(sa,'Location','northeast')
    grid on
    ax2 = subplot(2,1,2);
    plot(Qplot, Pplot,Qplot, PplotY,Qplot, PplotZ)
%
    xlim(ax2,[Qopt-1] (Qopt+1))
    xlabel('Nivel de alerta [u]')
    ylabel('Probabilidad [%]')
    title('Probabilidad de satisfacer la demanda con incertidumbre en torno al
nivel de alerta')
    legend(sb,se,sf,'Location','southeast')
    grid on
    hold off
disp('5');
%se transforma en string para mostrar en pantalla
s3 = num2str(prob);
disp ('La probabilidad de que el consumo sea menor que el nivel de alerta indicado
es');
disp (strcat(s3, ' %'));

s4 = num2str(Pavg);
disp ('En mil casos, con la incertidumbre entregada para el tiempo de entrega,') ;
disp ('la probabilidad media de que el consumo sea menor que el nivel de alerta
indicado es');
disp(strcat(s4, ' %'));
disp (' ');
disp ('Un 95% de los resultados se encuentran dentro del rango');
s5=strcat([' ',num2str(YQ),' ' ; ' ',num2str(ZQ),' ']);
disp(strcat(s5, ' %'));
disp (' ');
p=qa;
if prob<90
    while poisscdf(p,lambda*Tdi)*100<90
        p=p+1;
    end
    disp('Para que la demanda pueda ser satisfecha un 90% del tiempo necesita: ');
    disp('');
    s7=strcat(num2str(p),' unidades');

```

```

disp(s7);
end

disp ('Puede mejorar su estimacion de nivel de alerta con ayuda del grafico');
end

```

B.3.2. Función auxiliar 1: Calculo de probabilidad vectorial

```

function [prob, YQ, ZQ,YT,ZT, Pavg,Td2] =EOQ_con_demora_final (lambda,qa,Td, min,
max,optVar)

if optVar == 0
    %construccion de la distribucion triangular
    pTd = makedist('Triangular','a',min,'b',Td,'c',max);
else
    %construccion de la distribucion normal
    SD= (max-min)/6;
    pTd = makedist('Normal','mu',Td,'sigma', SD);
end

%generacion de 1000 datos a partir de la distribucion
Td2 = random(pTd,1000,1);
YT= prctile(Td2,2.5);
ZT= prctile(Td2,97.5);

% %la variable prob almacena la probabilidad acumulada
prob=poisscdf(qa,lambda*Td)*100;

%vector de probabilidad acumulada, iniciado en cero
prob2 = zeros(1000,1);

for j=1:1000
    %se llena el vector
    prob2(j)= poisscdf(qa,lambda*Td2(j));
    %termina el for
end
%percentiles de probabilidad

%intervalo de confianza para Q
YQ= prctile(prob2,2.5)*100;
ZQ= prctile(prob2,97.5)*100;

%promedio de Qvectorial
Pavg=mean(prob2)*100;
end

```

B.3.3. Función auxiliar 2: Calculo de probabilidad escalar

```

function [prob3] =EOQ_con_demora_final_aux (lambda,q,Td)
prob3 = poisscdf(q,lambda*Td)*100;
end

```

B.4 Demanda constante y variable sin demora en los pedidos

```

function []=CteVar_sin_demora_final ()

Pu=input('Ingrese el valor unitario del repuesto (pu) [um/u]=');
Cad= input('Ingrese el costo de adquisicion del repuesto (Cad) [um/u]=');
taub= input('Ingrese la tasa de descuento observada (tau) [%] =');
To= input('Ingrese el periodo entre Overhaul (Tpo) [ut] =');

```

```

qo= input('Ingrese la cantidad de repuestos requerida por overhaul (qo) [unidades] =');
qv=input('Ingrese la cantidad de repuestos requerida por intervencion (qv) [unidades]
=');

%conversion de la tasa porcentual
tau=taub/100;
disp('');
%Demanda Variable
lambda=input('Ingrese tasa media de falla (demanda x reemplazo) [fallas/ut]=');
minv=input('Ingrese una estimacion optimista para la tasa de falla variable (lamnda
min) [fallas/ut]=');
maxv=input('Ingrese una estimacion pesimista para la tasa de falla variable (lamnda
max) [fallas/ut]=');

% modificacion por sensibilidad
optVar=input('¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no]');
    if optVar == 0
        %construccion de la distribucion triangular
        pLd = makedist('Triangular','a',minv,'b',lambda,'c',maxv);
    else
        %construccion de la distribucion normal
        SD= (maxv-minv)/6;
        pLd = makedist('Normal','mu',lambda,'sigma', SD);
    end
disp('');
    %cantidad de simulaciones
    sim= 1000;

%generacion de 1000 datos a partir de la distribucion
L = random(pLd,sim,1);
%Cotas inferiores y superiores para las demandas
    YL= prctile(L,2.5);
    ZL= prctile(L,97.5);

% calculo del optimo puntual

    %demanda variable, depende de las intervenciones
    lambdav= lambda*qv;
    lambdavYL= YL*qv;
    lambdavZL= ZL*qv;
    %demanda constante, depende de la cantidad de overhaul
    lambdac=qo/To;
    %demanda conjunta
    lambdaf= lambdav+lambdac;
    lambdafYL= lambdavYL+lambdac;
    lambdafZL= lambdavZL+lambdac;

    %optimo local, tamaño de pedido
    Qopt = sqrt((2*lambdaf*Cad)/(Pu*tau));

    %tiempo optimo de pedido
    T_opt= Qopt/lambdaf;

% calculo de demandas aleatorias en torno a demanda variable
    %demandas aleatorias
    Lvectv=L*qv;

    %vector de demanda compuesta
    Lvfv=Lvectv+lambdac;

    %qopt vectorial
    Qv=sqrt(2*Lvf*Cad/(Pu*tau));

    %promedio de Qvectorial
    Qavg=mean(Qv);
    %intervalo de confianza para Q
    YQ= prctile(Qv,2.5);

```

```

ZQ= prctile(Qv,97.5);

%calculo el T optimo vectorial en base a la media observada y lo nombro T
T=Qavg./Lv;

%promedio de T vectorial
Tavg = mean(T);
%intervalo de confianza para T
YT= prctile(T,2.5);
ZT= prctile(T,97.5);

%display de resultados
%optimo puntual
s1= [num2str(Qopt), ' unidad(es)'];
disp('La cantidad optima de pedido es'),
disp(s1),
disp('');
s2= [num2str(T_opt), ' unidad(es) de tiempo'];
disp('El tiempo optimo de pedido es'),
disp(s2),
disp('');
%intervalos de confianza
s3=['En ', num2str(sim),' repeticiones ,el tamaño optimo medio observado es
',num2str(Qavg),' , con un 95% de probabilidad que se encuentre en el rango
[' ,num2str(YQ),' ; ' ,num2str(ZQ),' ]'];
disp(s3)

s4=['En ', num2str(sim),' repeticiones ,la frecuencia optima de pedido
observada es ',num2str(Tavg),' , con un 95% de probabilidad que se encuentre en el rango
[' ,num2str(YT),' ; ' ,num2str(ZT),' ]'];
disp(s4)

%graficos
qplot= (1:0.2:Qopt*50);
cplot=Pu*lambda*daf+1/2.*qplot*Pu*tau+Cad*lambda*daf./qplot;
cplotYL=Pu*lambda*dafYL+1/2.*qplot*Pu*tau+Cad*lambda*dafYL./qplot;
cplotZL=Pu*lambda*dafZL+1/2.*qplot*Pu*tau+Cad*lambda*dafZL./qplot;

sa=strcat('Cad = ', num2str(Cad),' ; pu = ', num2str(Pu),' ; tasa =
',num2str(tau),' ; lambda var= ',num2str(lambdav));
sb=strcat('Cad = ', num2str(Cad),' ; pu = ', num2str(Pu),' ; tasa =
',num2str(tau),' ; lambda var= ',num2str(lambdavYL));
sc=strcat('Cad = ', num2str(Cad),' ; pu = ', num2str(Pu),' ; tasa =
',num2str(tau),' ; lambda var= ',num2str(lambdavZL));

hold on
ax1 = subplot(2,1,1);
plot(qplot, cplot,qplot, cplotYL,qplot, cplotZL)
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo Global con demanda compuesta')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2);
plot(qplot, cplot,qplot, cplotYL,qplot, cplotZL)
xlim(ax2,[(Qopt-1) (Qopt+1)])
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
hold off

%calculo de optimo aproximado

%puntos en torno al optimo
lvar=[lambda*dafYL lambda*daf lambda*dafZL];
Qvar=[ceil(Qopt) Qopt floor(Qopt)];

```

```

Cvar=Pu*Lvar + Cad*Lvar./Qvar + 1/2.*Qvar*Pu*tau;

%definicion de optimo factible

m= (Cvar(3)-Cvar(1))/(Cvar(3));
if m>=0.05
    Qrecom=Qvar(1);
else
    Qrecom=Qvar(3);
end

Trecom=round(Qrecom/lambda,2);

disp('');
s5=['Considerando la incertidumbre informada, el pedido recomendado es de
',num2str(Qrecom),' unidades cada ',num2str(Trecom),' unidades de tiempo'];
disp(s5);

s6='La sensibilidad del costo a la variacion en la demanda se puede apreciar
en el grafico';
disp(s6);
end %function

```

B.5 Minimización del costo global con costo de falla

```

function []=Min_Cg_Cfalla_final()

lambda=input('Ingrese tasa de falla promedio [fallas/ut] = ');
Cad= input('Ingrese el costo de adquisicion del repuesto (Cad) [um/u] = ');
cf=input('Ingrese el costo por falla de inventario del repuesto (cf) [um/ut] = ');
pu=input('Ingrese el valor unitario del repuesto (pu) [um/u] = ');
tau= input('Ingrese la tasa de descuento observada (tau) [%] = ');
minv=input('Ingrese una estimacion optimista para la demanda [fallas/ut] = ');
maxv=input('Ingrese una estimacion pesimista para la demanda [fallas/ut] = ');
disp(' ');

%modificacion por sensibilidad
optVar=input(';Existe posibilidad que estos límites varien levemente? [1= si, 0 = no]
');
if optVar == 0
    %construccion de la distribucion triangular
    pLd = makedist('Triangular','a',minv,'b',lambda,'c',maxv);
else
    %construccion de la distribucion normal
    SD= (maxv-minv)/6;
    pLd = makedist('Normal','mu',lambda,'sigma', SD);
end

%transformacion de tau de % a numero
tau2=tau/100;

%cantidad de variables aleatorias para la generacion de variabilidad
sim=1000;

%generacion de 1000 datos a partir de la distribucion
L = random(pLd,sim,1);
%Cotas inferiores y superiores para las demandas
YL= prctile(L,2.5);
ZL= prctile(L,97.5);

opt=input('Los repuestos son consumidos inmediatamente al llegar? (1 = si, 0 = no)= ');
if opt==1
    aopt1=cf/(pu*tau2+cf);

```

```

%solucion directa, redondeada hacia arriba
Qopt = sqrt((2*lambda*Cad)/(aopt1*pu*tau2));
Topt= round(Qopt/lambda,2);

%solucion vectorial de media lambda
Qoptv = sqrt((2*L*Cad)/(aopt1*pu*tau2));

%intervalo de confianza para Q
YQ= prctile(Qoptv,2.5);
ZQ= prctile(Qoptv,97.5);

%promedio de Q vectorial
Qavgv=mean(Qoptv);

%calculo el T optimo vectorial en base a la media observada y lo nombro T

Tv=Qavgv./L;

%promedio de T vectorial
Tavgv = mean(Tv);

%intervalo de confianza para T
YT= prctile(Tv,2.5);
ZT= prctile(Tv,97.5);

qplot= (1:0.2:Qopt*20);
Cfail=pu*lambda+Cad*lambda./qplot+1/2*(aopt1)^2.*qplot*pu*tau2+1/2*(1-
aopt1)^2.*qplot*cf;
CfailYL=pu*YL+Cad*YL./qplot+1/2*(aopt1)^2.*qplot*pu*tau2+1/2*(1-aopt1)^2.*qplot*cf;
CfailZL=pu*ZL+Cad*ZL./qplot+1/2*(aopt1)^2.*qplot*pu*tau2+1/2*(1-aopt1)^2.*qplot*cf;

sa=strcat('Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ', num2str(pu),';
tasa = ',num2str(tau), '%; Lambda= ',num2str(lambda));
sb=strcat('Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ', num2str(pu),';
tasa = ',num2str(tau), '%; Lambda= ',num2str(YL));
sc=strcat('Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ', num2str(pu),';
tasa = ',num2str(tau), '%; Lambda= ',num2str(ZL));

hold on
ax1 = subplot(2,1,1);
plot(qplot, Cfail,qplot,CfailYL,qplot,CfailZL)
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo global con costo de falla')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2);
plot(qplot, Cfail,qplot,CfailYL,qplot,CfailZL)
xlim(ax2, [(Qopt-10) (Qopt+10)])
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo global con costo de falla en torno al otimo')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
hold off

%calculo de optimo aproximado
%puntos en torno al optimo
Lvar=[YL lambda ZL];
Qvar=[ceil(Qopt) Qopt floor(Qopt)];

Cvar=Lvar*pu+Cad*Lvar./Qvar+1/2*((aopt1)^2*pu*tau2+(1-aopt1)^2*cf)*Qvar;
%definicion de optimo factible

m= (Cvar(3)-Cvar(1))/(Cvar(3));
if m>=0.05

```

```

        Qrecom=Qvar(1);
    else
        Qrecom=Qvar(3);
    end

    Trecom=round(Qrecom/lambda,2);

    disp(' ');
    s=['De acuerdo a los parametros entregados, se justifica no tener repuestos por un
', num2str((1-aopt1)*100),' % del tiempo' ];
    disp(s);
    disp(' ');
    s1=['La catidad optima de pedido sin considerar la incertidumbre es
',num2str(Qopt), ' unidad(es)'];
    disp(s1);
    s2= ['El tiempo optimo de pedido es ',num2str(Topt), ' unidad(es) de tiempo'] ;
    disp(s2);
    disp(' ');
    s3= ['En mil repeticiones, el valor medio optimo de pedido observado es de
',num2str(Qavgv),' unidades, con un 95% de los resultados en el rango [',num2str(YQ),'
', num2str(ZQ),']'];
    disp(s3);
    s4= ['En mil repeticiones, el valor medio optimo de intervalo de solicitud
observado es de ',num2str(Tavgv),' unidades, con un 95% de los resultados en el rango [
',num2str(YT),' , ', num2str(ZT),']'];
    disp(s4);
    disp(' ');
    s5=['Considerando la incertidumbre informada, el pedido optimo es de
',num2str(Qrecom),' unidades cada ',num2str(Trecom),' unidades de tiempo'];
    disp(s5);
    s6='La sensibilidad a la demanda ,considerando la incertidumbre informada, puede
apreciarse en el gráfico.';
    disp(s6);

else
    aopt0=1-(pu*tau2)/(2*cf);
    Qopt = sqrt((2*lambda*Cad)/(aopt0*pu*tau2+1/2*(1-aopt0)^2*cf));
    Qoptv = sqrt((2*L*Cad)/(aopt0*pu*tau2+1/2*(1-aopt0)^2*cf));

    YQ= prctile(Qoptv,2.5);
    ZQ= prctile(Qoptv,97.5);

    %promedio de Qvectorial
    Qavgv=mean(Qoptv);

    %calculo el T_opt vectorial en base a la media observada y lo nombro T

    Tv=Qavgv./L;

    %promedio de T vectorial
    Tavgv = mean(Tv);

    YT= prctile(Tv,2.5);
    ZT= prctile(Tv,97.5);

    qplot2 = (1:0.2:Qopt*20);
    Cfail=pu*lambda+Cad*lambda./qplot2+1/2*(aopt0)^2.*qplot2*pu*tau2+1/2*(1-
aopt0)^2.*qplot2*cf;
    CfailYL=pu*YL+Cad*YL./qplot2+1/2*(aopt0)^2.*qplot2*pu*tau2+1/2*(1-
aopt0)^2.*qplot2*cf;
    CfailZL=pu*ZL+Cad*ZL./qplot2+1/2*(aopt0)^2.*qplot2*pu*tau2+1/2*(1-
aopt0)^2.*qplot2*cf;

    sa=strcat('Costo para Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ',
num2str(pu),'; tau = ',num2str(tau),'%; Lambda= ',num2str(lambda));
    sb=strcat('Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ', num2str(pu),';
tasa = ',num2str(tau),'%; Lambda= ',num2str(YL));

```



```

sc=strcat('Cad = ', num2str(Cad),'; cf = ',num2str(cf), '; pu = ', num2str(pu),';
tasa = ',num2str(tau),'%; Lambda= ',num2str(ZL));

hold on
ax1 = subplot(2,1,1);
plot(qplot2, Cfail,qplot2,CfailYL,qplot2,CfailZL)
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo Global con Costo de Falla')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2);
plot(qplot2, Cfail,qplot2,CfailYL,qplot2,CfailZL)
xlim(ax2,[(Qopt-10) (Qopt+10)])
xlabel('Tamaño de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
hold off
%calculo de optimo aproximado

%puntos en torno al optimo
Lvar=[YL lambda ZL];
Qvar=[ceil(Qopt) Qopt floor(Qopt)];
Cvar=pu*Lvar+Cad*Lvar./Qvar+1/2*(aopt0)^2.*Qvar*pu*tau2+1/2*(1-aopt0)^2.*Qvar*cf;

%definicion de optimo factible

m= (Cvar(3)-Cvar(1))/(Cvar(3));
if m>=0.05
    Qrecom=Qvar(1);
else
    Qrecom=Qvar(3);
end

Trecom=round(Qrecom/lambda,2);

disp(' ');
s=['De acuerdo a los parmetros entregados, se justifica no tener repuestos por un
', num2str((1-aopt0)*100),' % del tiempo' ];
disp(s);
disp(' ');
s1=['La cantidad optima de pedido es ',num2str(Qopt), ' unidad(es)'];
disp(s1);

Topt= round(Qopt/lambda,2);

s2= ['El tiempo optimo de pedido es ',num2str(Topt), ' unidad(es) de tiempo'] ;
disp(s2);
disp(' ');
s3= ['En mil repeticiones, el valor medio optimo de pedido observado es de
',num2str(Qavgv),' unidades, con un 95% de los resultados en el rango [' ,num2str(YQ),'
', ' ,num2str(ZQ),']'];
disp(s3);
s4= ['En mil repeticiones, el valor medio optimo de intervalo de solicitud
observado es de ',num2str(Tavgv),' unidades, con un 95% de los resultados en el rango
[' ,num2str(YT),' , ' ,num2str(ZT),']'];
disp(s4);
disp(' ');
s5=['Considerando la incertidumbre informada, el pedido optimo es de
',num2str(Qrecom),' unidades cada ',num2str(Trecom),' unidades de tiempo'];
disp(s5);

s6='La sensibilidad a la demanda ,considerando la incertidumbre informada, puede
apreciarse en el gráfico.';
disp(s6);
end

```

end

B.6 Compras agrupadas

B.6.1. Función principal

```
function [] =Compras_Agrupadas_final_script()
%
cantidad de elementos a agrupar
N=input('Ingrese la cantidad de elementos a agrupar = ');

% costo de adquisicion del lote
Cad=input('Ingrese el costo de hacer un pedido = ');

% costo de adquisicion individual
cadi=input('Ingrese el costo de adquisicion de cada producto (separados por comas)=
','s');

%precio unitario
pui=input('Ingrese el precio unitario de cada producto (separados por comas)= ','s');

%costo de almacenamiento por unidad de tiempo
calmi=input('Ingrese el costo unitario de almacenamiento cada producto (separados por
comas)= ','s');

%demanda por unidad de tiempo
demi=input('Ingrese la demanda de cada producto por unidad de tiempo(separados por
comas)= ','s');

%variacion de la demanda en el script de optimizacion _varDem

VarDemi=input('Seleccione una demanda con valor incierto (segun el orden de ingreso) =
');
MinVarDemi=input('Ingrese una estimacion optimista para dicha demanda [u]= ');
MaxVarDemi=input('Ingrese una estimacion pesitimista para dicha demanda [u]= ');
optVar=input(';Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no] ');

    save N N;
    save Cad Cad;
    save cadi cadi;
    save pui pui;
    save calmi calmi;
    save demi demi;
    save VarDemi VarDemi;
    save MinVarDemi MinVarDemi;
    save MaxVarDemi MaxVarDemi;
    save optVar optVar;
%inicializacion de variables optimizacion
T=0.01;
kVect=ones(1,N+1);
kVect(N+1)=T;

%Limites inferiores: Se asume que para todo elemento se realiza al menos un
%pedido ( $k_i \geq 1$ ) y T es practicamente 0. Se crea un vector de dimension n+1
%para los n  $k_i$  y para T de unos (1) y en la ultima casilla se almacena T

%ki
lb=ones(N+1,1);
%T
lb(N+1)=0.01;
```

```

%limites superiores: 50 para k y 200 para T
    ub=ones(N+1,1)*50;
    ub(N+1)=200;

%vector que indica que variables a optimizar son enteras, y esto es
%igual a la cantidad de productos (N),

% se crea vector vacio de Nx1
    IntCon=zeros(N,1);
% se rellena con el orden
    for j=1:N
        IntCon(j)=j;
    end

%opciones del optimizador, se parte con las opciones por defecto
    options=gaoptimset(@ga);
tic
    % Se invoca la optimizacion
    [x,fval,exitflag] =
ga(@Compras_Agrupadas_final,N+1,[],[],[],[],lb,ub,[],IntCon,options);
toc

%Se rescatan los valores vectoriales de los datos ingresados

[Cg,CadVect,PuiVect,calmiVect,demiVect,VecAux,CgBase ] =
Compras_Agrupadas_final(kVect);

%Se rescatan los optimos con una funcion auxiliar
    [Qwi, Twi, Topt,kOptVect]= Opt_CA(x,N,demiVect);

%Sensibilidad sobre demanda variable
%seleccionar demanda variable
    VarDem=demiVect(VarDemi);
%generar demanda aleatoria en torno a seleccion del usuario
%distribuciones
    if optVar == 0
        %construccion de la distribucion triangular
        pLd = makedist('Triangular','a',MinVarDemi,'b',VarDem,'c',MaxVarDemi);
    else
        %construccion de la distribucion normal
        SD= (MaxVarDemi-MinVarDemi)/6;
        pLd = makedist('Normal','mu',VarDem,'sigma', SD);
    end

%cantidad de simulaciones
sim=100;

%Demandas
    L = random(pLd,sim,1);
%Cotas inferiores y superiores para las demandas
    YL= prctile(L,2.5);
    ZL= prctile(L,97.5);

%plot
%vector de tiempo dependiente del optimo
VecTplot=[0.1:0.2:x(N+1)*20];
%Vectores con cotas superiores e inferiores de demanda reemplazados
VecLPlot25=zeros(1,N);
VecLPlot975=zeros(1,N);
%se copian demandas originales
for u=1:N
    VecLPlot25(u)=demiVect(u);
end
for u=1:N
    VecLPlot975(u)=demiVect(u);
end
%se reemplazan cotas

```

```

VecLPlot25(VarDemi)=YL;
VecLPlot975(VarDemi)=ZL;

%vectores auxiliares de calculo de costos
VecAuxPlot25=zeros(length(VecTplot),N);
VecAuxPlot975=zeros(length(VecTplot),N);
VecAuxPlot=zeros(length(VecTplot),N);

for i=1:length(VecTplot);
    for j=1:N
        VecAuxPlot25(i,j) =
CadVect(j)/(x(j)*VecTplot(i))+1/2*calmiVect(j)*VecLPlot25(j)*x(j)*VecTplot(i) ;
        VecAuxPlot975(i,j) =
CadVect(j)/(x(j)*VecTplot(i))+1/2*calmiVect(j)*VecLPlot975(j)*x(j)*VecTplot(i) ;
        VecAuxPlot(i,j) =
CadVect(j)/(x(j)*VecTplot(i))+1/2*calmiVect(j)*demiVect(j)*x(j)*VecTplot(i) ;
    end
end
%Vector de Costos para graficar
VectCostPlot=zeros(length(VecTplot),3);

for k=1:length(VecTplot);
    VectCostPlot(k,1)=Cad/VectTplot(k)+sum(VecAuxPlot25(k,:));
    VectCostPlot(k,2)=Cad/VectTplot(k)+sum(VecAuxPlot975(k,:));
    VectCostPlot(k,3)=Cad/VectTplot(k)+sum(VecAuxPlot(k,:));
end

%plot
sa=strcat('Demanda [u/ut]= ', num2str(YL));
sc=strcat('Demanda [u/ut]= ', num2str(num2str(demiVect(VarDemi))));
sb=strcat('Demanda [u/ut]= ', num2str(ZL));

hold on
ax1 = subplot(2,1,1);
plot
(VecTplot,VectCostPlot(:,1),VecTplot,VectCostPlot(:,2),VecTplot,VectCostPlot(:,3))
xlabel('Tiempo de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo global con compras agrupadas')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2);
plot
(VecTplot,VectCostPlot(:,1),VecTplot,VectCostPlot(:,2),VecTplot,VectCostPlot(:,3))
xlim(ax2,[(x(N+1)-1) (x(N+1)+1)])
xlabel('Tiempo de pedido [u]')
ylabel('Costo Global[um]')
title('Costo globalcon compras agrupadas en torno al optimo')
legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
grid on
hold off

%Solucion Optima

s=['Costo global obtenido al agrupar los pedidos es de ',num2str(fval), ' [um]'];
disp(s);

s1='Las cantidades de pedido optimo para cada elemento son = ';
disp(s1);
disp(Qwi);

s2='Los intervalos de pedido optimo para cada elemento son= ';
disp(s2);
disp(Twi);

```

```

    s3=strcat('En 100 repeticiones, la incertidumbre sobre la demanda (lambda =
',num2str(demiVect(VarDemi)),'), genera un intervalo de demandas entre');
    disp(s3);

    s4=strcat(num2str(YL), ' y ', num2str(ZL),'. La sensibilidad a dicha variacion de
la demanda se aprecia en el grafico');
    disp(s4);

end

```

B.6.2. Función auxiliar 1: Función objetivo

```

function [Cg,CadVect,PuiVect,calmiVect,demiVect,VecAux,CgBase ] =
Compras_Agrupadas_final(kVect)

%Se cargan las variables de entrada ingresadas por el usuario
load N;
load Cad;
load cadi;
load pui;
load calmi;
load demi;

%Funcion auxiliar que transforma strings en numeros
[CadVect,PuiVect,calmiVect,demiVect]= SepVect(N,cadi,pui,calmi,demi);

%Se declara el vector de costos totales individuales que los almacenara
VecAux=zeros(1,N);
for i=1:N
    %kVect(N+1)=T
    VecAux(i) =
CadVect(i) / (kVect(i) * kVect(N+1)) + 1/2 * calmiVect(i) * demiVect(i) * kVect(i) * kVect(N+1) ;
end

%Costo Base comun a todos los elementos
CgBase=Cad/kVect(N+1);
%Funcion Objetivo (Costo Global)
Cg=CgBase+sum(VecAux);

end

```

B.6.3. Función auxiliar 1: Separador de Vectores

```

function [CadVect,PuiVect,calmiVect,demiVect]= SepVect(N,cadi,pui,calmi,demi)

%Se separa el string que almacena los costos de adquisicion individuales,
%posteriormente se debe pasar a numero (intrinsecamente son strings);
CadVectS=strsplit(cadi,',');

%generar el vector de costos de adquisicion, inicialmente vacio
CadVect=zeros(1,N);

for i=1:N
    %Se transforma a numero y se incluye en el vector
    CadVect(i) = str2double(CadVectS{i});
end

%El mismo procedimiento anterior para los precios unitarios
PuiVectS=strsplit(pui,',');

PuiVect=zeros(1,N);

```

```

    for i=1:N
        PuiVect(i) = str2double(PuiVectS{i});
    end

%Costos de almacenamiento
    calmiVectS=strsplit(calmi,',' );

    calmiVect=zeros(1,N);

    for i=1:N
        calmiVect(i) = str2double(calmiVectS{i});
    end

%Demandas individuales
    demiVectS=strsplit(demi,',' );

%generar el vector de demandas inicialmente ceros
    demiVect=zeros(1,N);

    for i=1:N
        demiVect(i) = str2double(demiVectS{i});
    end

end

```

B.6.4. Función auxiliar 2: Valores Óptimos

```

function [Qwi, Twi, Topt,kOptVect]= Opt_CA(x,N,demiVect)

%Se rescatan los valores de k, almacenados en el vector x
    kOptVect=zeros(N,1);
    for k=1:N
        kOptVect(k)=x(k);
    end

%Se rescata T
    Topt=x(N+1);

%T optimos en los que se realiza cada pedido
    Twi=kOptVect*Topt;

%Cantidades Optimas por pedido
    Qwi=zeros(N,1);
    for i=1:N
        Qwi(i)=ceil(Twi(i)*demiVect(i));
    end

end

```

B.7 Repuestos reparables considerando nivel de servicio y consolidación

Esta función tiene como particularidad que entrega como elemento de salida una matriz de resultados, para análisis de sensibilidad posterior de los mismos.

B.7.1. Función principal

```
function [] = RepConsol_script()

% Modelo de calculo de inventario considerando consolidacion de Bodegas

% cantidad de bases o bodegas a consolidar
Nbases=input('Ingrese la cantidad de bases = ');
%Nbases=5;

% numero de elementos por bodega
Nu=input('Ingrese el tamaño de la flota de cada base (separados por comas)= ','s');
%Nu='80,180,60,240,100';

% Nivel de servicio global
nug=input('Ingrese el nivel de servicio global requerido [%] = ');
% nug=99;

% Nivel de servicio local
nuloc=input('Ingrese el nivel de servicio local requerido [%] = ');
%nuloc=75;

% Tiempo medio de reparacion por componente
Tat=input('Ingrese el tiempo medio de reparacion por componente [ut] = ');
% Tat=21;

% Tiempo medio entre reemplazos no planificados
Tbur=input('Ingrese el tiempo medio entre reemplazos no planificados [ut]= ');
%Tbur=730;

%se introduce incertidumbre sobre este elemento, pues es menos
%controlable que el tiempo medio de reparacion.

minTbur=input('Ingrese una estimacion optimista para el tiempo entre reemplazos
[ut] = ');
%min=lambda*0.8;
maxTbur=input('Ingrese una estimacion pesimista para el tiempo entre reemplazos
[ut] = ');
%max=lambda*1.2;
optVar=input('¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no] ');

%sin variacion de tat o tbur
[pacum,kVect,paGlob]= RepConsol(Nbases,Nu,Tbur, Tat, nug, nuloc);
%con variacion de tat o tbur
% [pacum2,kVect2,paGlob2,Qavg,YQ,ZQ,vYk,vZk,vMk, vYp,vZp,vMp,vStringk,vStringp]=
RepConsol2(Nbases,Nu,Tbur, Tat, nug, nuloc,minTbur,maxTbur,optVar);
[Pavg,YP,ZP,Qavg,YQ,ZQ,vMk,vMp,vYk,vYp,vZk,vZp,vStringk,vStringp,vTburY,vTburZ]=
RepConsol2(Nbases,Nu,Tbur, Tat, nug, nuloc,minTbur,maxTbur,optVar);

disp('La cantidad optima de repuestos por base es [u]= ');
disp(kVect);
%aca van las medias y los rangos
% disp(kVect2);

disp('En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la cantidad
media de repuestos por base es [u]= ');
disp(vMk');

disp('Con el 95% de las observaciones dentro del rango [u] =')
disp(vStringk);

s=['La cantidad optima de repuestos totales es ', num2str(sum(kVect)), ' [u]'];
disp(s);
disp(' ');
s1=['En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la cantidad
media total de repuestos es ',num2str(Qavg),' unidades, '];
```

```

disp(s1);
s2=['con el 95% de los resultados en el intervalo
[' ,num2str(YQ),',',num2str(ZQ),']' ];
disp(s2);
disp(' ');
disp('La confiabilidad óptima por base obtenida es [%]= ');
disp(pacum*100);
% disp(pacum2*100);

disp('En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la
disponibilidad media por base es [u]= ');
disp(vMp');

disp('Con el 95% de las observaciones dentro del rango [u] =')
disp(vStringp);

s3=['La confiabilidad global optima obtenida es ',num2str(paGlob*100),' [%]'];
disp(s3);
disp(' ');
s4=['En cien repeticiones, considerando la incertidumbre informada, la
disponibilidad global media obtenida ',num2str(Pavg),' [%], '];
disp(s4);
s5=['con el 95% de los resultados en el intervalo
[' ,num2str(YP),',',num2str(ZP),']' ];
disp(s5);
s6='Se ha generado el archivo "Consolidacion.xlsx", donde puede ver el resultado de
las simulaciones y los cambios en los resultados por la incerti8dumbre en el archivo';
disp(s6);

%GENERACION DE ARCHIVO DE SOLUCIONES
filename = 'Consolidacion.xlsx';
A1 = {'T. entre intervenciones no deseadas','Base', 'Elementos', 'Conf
Local', 'Conf Global'};
A2=zeros(Nbases,5);
A3=zeros(Nbases,5);
A4=zeros(Nbases,5);

for i=1:Nbases
    A2(i,1)=Tbur;
    A2(i,2)=i;
    A2(i,3)=kVect(i);%elementos
    A2(i,4)=pacum(i)*100;%conf local
    A2(i,5)=paGlob*100;%conf global
end
for i=1:Nbases
    A3(i,1)=vTburY;
    A3(i,2)=i;
    A3(i,3)=vYk(i);
    A3(i,4)=vYp(i);
    A3(i,5)=YP;
end
for i=1:Nbases
    A4(i,1)=vTburZ;
    A4(i,2)=i;
    A4(i,3)=vZk(i);
    A4(i,4)=vZp(i);
    A4(i,5)=ZP;
end
A=[A2;A3;A4];
sheet='Hoja1';
xlRange = 'A1';
xlswrite(filename,A1,sheet,xlRange);
xlRange = 'A2';
xlswrite(filename,A,sheet,xlRange);

end

```


B.7.2. Función auxiliar 1: optimo sin variación (incertidumbre)

```
function [pacum, kVect, paGlob]= RepConsol(Nbases, Nu, Tbur, Tat, nug, nuloc)

%se descompone el string con las flotas individuales en un arreglo y se
%transforma en numero mediante una funcion auxiliar
vFlota= SepVect2(Nbases, Nu);

%flota total
TFlota=sum(vFlota);

%Frecuencia global
LGlob=TFlota/Tbur;

%Demanda global
DGlob=LGlob*Tat;

%Repuestos totales minnimos requeridos
kglobCHECK=0;

%se contabilizan hasta que la probabilidad de cumplir se mayor a la
%requerida
while poisscdf(kglobCHECK, DGlob) <= nug/100
    kglobCHECK=kglobCHECK+1;
end

%vector inicial para almacenar el numero de repuestos requeridos
kVect=ones(Nbases, 1);

%frecuendias locales
lamdaLoc=SepVect2(Nbases, Nu)/Tbur;

%Vector para almacenar la probabilidad acumulada
pacum=zeros(Nbases, 1);

%Se llenan los vectores de cantidades y confiabilidades. en la primera iteracion, se
busca cumplir con el requerimiento de confiabilidad local
for j=1:Nbases
    %Para cada elemento de kVect, se calcula la acumulada de poisson y
    %se incrementa en una unidad hasta lograr el numero deseado.
    while poisscdf(kVect(j), lamdaLoc(j)*Tat) <= nuloc/100
        kVect(j)=kVect(j)+1;
        pacum(j)=poisscdf(kVect(j), lamdaLoc(j)*Tat);
    end
end

%se verifica la condicion Global. Si la cantidad total de repuestos no
%es suficiente, se aumenta aquel cuya confiabilidad local sea la menor.
while poisscdf(sum(kVect), DGlob) < nug/100
    %se actualiza la confiabilidad minima en cada ciclo
    MinPacum=min(pacum);
    %se aumenta el stock local
    for k=1:Nbases
        if pacum(k)==MinPacum
            kVect(k)=kVect(k)+1;
            pacum(k)=poisscdf(kVect(k), lamdaLoc(k)*Tat);
        end
    end
end

paGlob=poisscdf(sum(kVect), DGlob);

end
```

B.7.3.Función auxiliar 2: optimo con incertidumbre

```
function
[Pavg,YP,ZP,Qavg,YQ,ZQ,vMk,vMp,vYk,vYp,vZk,vZp,vStringk,vStringp,vTburY,vTburZ]=
RepConsol2(Nbases,Nu,Tbur,Tat,nug,nuloc,minTbur,maxTbur,optVar)
    %similar a RepConsol, pero es la version con variaciones a Tat o Tbur

    %se descompone el string con las flotas individuales en un arreglo y se
    %transforma en numero mediante una funcion auxiliar
    vFlota2= SepVect2(Nbases,Nu);

    %flota total
    TFlota2=sum(vFlota2);

    %dimensiones para aleatoriedad y matriz de soluciones
    dim2=100;

    %distribuciones

    if optVar == 0
        %construccion de la distribucion triangular
        dTbur = makedist('Triangular','a',minTbur,'b',Tbur,'c',maxTbur);
    else
        %construccion de la distribucion normal
        SD= (maxTbur-minTbur)/6;
        dTbur = makedist('Normal','mu',Tbur,'sigma',SD);
    end

    %generacion de 100 datos a partir de la distribucion
    %   vTat = random(dTat,dim2,1);
    vTbur = random(dTbur,dim2,1);
    vTburY = prctile(vTbur,2.5);
    vTburZ = prctile(vTbur,97.5);

    %Frecuencia global
    LGlob2=TFlota2./vTbur;

    %Demanda global
    %   DGlob2=LGlob2.*vTat;
    DGlob2=LGlob2*Tat;

    %vector inicial para almacenar el numero de repuestos requeridos
    kVect2=ones(Nbases,dim2);

    %frecuencias locales
    lamdaLoc2=SepVect2(Nbases,Nu);
    vlamdaLoc2=zeros(Nbases,dim2);
    for s=1:Nbases
        for t=1:dim2
            vlamdaLoc2(s,t)=lamdaLoc2(s)/vTbur(t);
        end
    end

    %Vector para almacenar la probabilidad acumulada
    pacum2=zeros(Nbases,dim2);

    %Se llenan los vectores de cantidades y confiabilidades.
    %condicion la disp local
    for l=1:dim2
        for j=1:Nbases

            while poisscdf(kVect2(j,l),vlamdaLoc2(j,l)*Tat)<= nuloc/100
                kVect2(j,l)=kVect2(j,l)+1;
            end
        end
    end
end
```

```

                pacum2(j,1)=poisscdf(kVect2(j,1),vlamdaLoc2(j,1)*Tat);
            end
        end

    end

    %condicion sobre la disponibilidad global.
    for u=1:dim2
        while poisscdf(sum(kVect2(:,u)),DGlob2(u))<nug/100
            %se actualiza la confiabilidad minima en cada ciclo
            MinPacum=min(pacum2(:,u));
            %se aumenta el stock local
            for w=1:Nbases
                if pacum2(w,u)==MinPacum
                    kVect2(w,u)=kVect2(w,u)+1;
                    pacum2(w,u)=poisscdf(kVect2(w,u),vlamdaLoc2(w,u)*Tat);
                end
            end
        end
    end
end

paGlob2= zeros(dim2,1);

for y=1:dim2
    paGlob2(y)=poisscdf(sum(kVect2(:,y)),DGlob2(y));
end

QGlob2= zeros(dim2,1);

for a=1:dim2
    QGlob2(a)= sum(kVect2(:,a));
end
%Vectores de String para mostrar los intervalos en la consola
vStringk=cell(Nbases,1);
vStringp=cell(Nbases,1);

for z=1:Nbases

    vYk(z) = prctile(kVect2(z,:),2.5);
    vZk(z) = prctile(kVect2(z,:),97.5);
    vMk(z) = mean(kVect2(z,:));

    %    vStringk pasar a string los intervalos de las cantidades
    vStringk{z}= strcat(['',num2str(vYk(z))',' ; ',num2str(vZk(z))','']);

    vYp(z) = prctile(pacum2(z,:),2.5)*100;
    vZp(z) = prctile(pacum2(z,:),97.5)*100;
    vMp(z) = mean(pacum2(z,:))*100;

    %    vStringp pasar a string los intervalos de las probabilidades
    vStringp{z}= strcat(['',num2str(vYp(z))',' ; ',num2str(vZp(z))','']);

end

%intervalo de confianza para Q
YQ= prctile(QGlob2,2.5);
ZQ= prctile(QGlob2,97.5);

%promedio de Qvectorial
Qavg=mean(QGlob2);

%intervalo de confianza para P
YP= prctile(paGlob2,2.5)*100;
ZP= prctile(paGlob2,97.5)*100;

%promedio de Qvectorial

```

```

Pavg=mean(paGlob2)*100;

end

```

B.7.4. Función auxiliar 3: Separador de string

```

function [dVect]= SepVect2(N,sVect)
%FUNCION QUE SEPARA UN ARREGLO CON STRINGS (CELL)Y LOS CONVIERTE A VECTORES
%DEPENDEN DE N (CANTIDAD DE ELEMENTOS) Y sVect (STRING CON LOS ELEMENTOS DEL
%VECTOR)

%se separa el string, el tipo de dato se convierte intrinsecamente en
%cell
sCell=strsplit(sVect,',' );

%generar el vector de doubles inicialmente vacio
dVect=zeros(N,1);

for i=1:N
    %Se transforma el arreglo de cell a numero y se incluye en el vector
    dVect(i) = str2double(sCell{i});
end

end

```

B.8 Redundancia de 2 componentes sin recambio de elemento operativo

Para esta función, se programa una función principal y 11 funciones auxiliares para estimar cada término de la ecuación original. La nomenclatura es idéntica a la usada en el paper de referencia.

B.8.1. Función principal

```

function [] = Redundancia_script()

%Parametros de entrada
% Lead Time pedido de emergencia
Le=input('Ingrese el tiempo de demora en pedido de emergencia [ut] = ');
% Lead Time pedido normal
Ln=input('Ingrese el tiempo de demora en pedido regular [um] = ');
% Costo de pedido normal
COno=input('Ingrese el costo de ordenar un pedido regular [um] = ');
% Costo de pedido de emergencia
COe=input('Ingrese el costo de ordenar un pedido de emergencia [um] = ');
%Costos unitarios de adquisicion
% Costo de la unidad 1
CP1=input('Ingrese el costo de la primera unidad [um] = ');
% Costo de la unidad 2
CP2=input('Ingrese el costo de la segunda unidad [um] = ');
% Costo de almacenamiento de la unidad 2

```

```

kh2=input('Ingrese el costo de almacenamiento de la segunda unidad [um] = ');
%Costos de reemplazo (vida remanente)
%Costo de reemplazo de la unidad 1
kr1=input('Ingrese el costo de reemplazo de la primera unidad [um]= ');
% Costo de reemplazo de la unidad 2
kr2=input('Ingrese el costo de reemplazo de la segunda unidad [um]= ');
%Parametros de weibull
beta1=input('Ingrese el valor de beta de la primera unidad [ ]= ');
beta2=input('Ingrese el valor de beta de la segunda unidad [ ]= ');
eta1=input('Ingrese el costo de eta de la primera unidad [ ]= ');
eta2=input('Ingrese el costo de eta de la primera unidad [ ]= ');

% Disponibilidad objetivo
alfai=input('Ingrese la disponibilidad minima requerida [%] = ');
alfa=alfai/100;

disp('****Almacenando Variables****');
save Le Le;
save Ln Ln;
save COno COno;
save COe COe;
save CP1 CP1;
save CP2 CP2;
save kh2 kh2;
save kr1 kr1;
save kr2 kr2;
save beta1 beta1;
save beta2 beta2;
save eta1 eta1;
save eta2 eta2;
save alfa alfa;

% Se invoca la optimizacion
disp('***Se inicia el proceso de optimizacion. Espere***');

options=optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp','MaxIter',200,'Display','iter');
[x,fval] = fmincon(@C_final,0.01,[],[],[],[],0,10000,[],options);

disp('**** Optimización terminada ****' );

%aca va la opcion de simular las otras dos curvas
disp('>¿Existe posibilidad de variacion de alguno de los tiempos de entrega (Lead Time)?');
% optL=input('(Realizar el calculo requerira dos operaciones cuyo tiempo de simulacion es similar al anterior) [1 = si, 0 = no]');
optL=1;
% optL=0;
disp('');
if optL==1
    [x2,fval2,x3,fval3,dimVar]=Varianza(Ln,Le,options);
    %output [x25,fval25,x975,fval975]
else
    disp('No se realiza la variación');
end

disp('Valor del tiempo optimo de reemplazo estimado en el caso de base es');

```

```

s1=num2str(x);
disp(s1);
disp('El costo medio de dicho tiempo es [um]');
s2=num2str(fval);
disp(s2);

%optimo factible
Trecom=0;
if dimVar==1 %ln
    sa=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Ln));
    sb=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Ln2));
    sc=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Ln3));

    m= (fval2-fval3)/(fval2);
    if m>=0.05
        Trecom=x3;
    else
        Trecom=x2;
    end
else
    m= (fval3-fval2)/(fval3);
    sa=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Le));
    sb=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Le2));
    sc=strcat('Costo para Ln = ', num2str(Le3));
    if m>=0.05
        Trecom=x2;
    else
        Trecom=x3;
    end
end

s11=['Considerando la incertidumbre informada, el tiempo óptimo de reemplazo es
',num2str(Trecom),' unidades de tiempo' ];
disp(s11);

%plot
disp('Elaborando gráfico de la simulacion. Espere' );
%variables de construccion del ploteo global
Tplot =(0:50:x*1.5);
Aplot =zeros(1,length(Tplot));
Cplot =zeros(1,length(Tplot));
C2plot =zeros(1,length(Tplot));
C3plot =zeros(1,length(Tplot));
for i=1:length(Tplot)
    Aplot(1,i)=double(A_final(Tplot(i)));
    Cplot(1,i)=C_final(Tplot(i));
    C2plot(1,i)=C_final2(Tplot(i));
    C3plot(1,i)=C_final3(Tplot(i));
end

Tplot2 =(min(x2,x3)-1:2:max(x2,x3)+1);
Aplot2 =zeros(1,length(Tplot2));
Cplot2 =zeros(1,length(Tplot2));

for i=1:length(Tplot2)
    Aplot2(1,i)=double(A_final(Tplot2(i)));

```

```

        Cplot2(1,i)=C_final(Tplot2(i));
    end
    %grafico
    sd=('Disponibilidad');
    hold on
        ax1 = subplot(3,1,1);
        plot(Tplot, Cplot,Tplot, C2plot, Tplot, C3plot)
        title('Costo Global en 3 escenarios');
        ylabel('Costo Global [um]')
        xlabel('Tiempo de reemplazo [ut]')
        legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
        grid on
    ax2 = subplot(3,1,2);
    [bx,h1,h2]= plotyy(Tplot, Cplot,Tplot, Aplot,'plot') ;
    title('Costo Global y Disponibilidad Obtenida para el caso base');
    set(get(bx(1),'YLabel'),'String', 'Costo Global [um]');
    set(get(bx(2),'YLabel'),'String', 'Disponibilidad [%]');
    xlabel('Tiempo de reemplazo [ut]')
    legend(sa,sd,'Location','northeast')
    grid on
    ax3 = subplot(3,1,3);
    [bx,h1,h2]= plotyy(Tplot2, Cplot2,Tplot2, Aplot2,'plot') ;
    xlim(ax3,[min(x2,x3)-1 (max(x2,x3)+1)])
    xlabel('Tiempo de reemplazo [ut]')
    set(get(bx(1),'YLabel'),'String', 'Costo Global [um]');
    set(get(bx(2),'YLabel'),'String', 'Disponibilidad [%]');
    title('Costo global en torno al tiempo de reemplazo optimo')
    legend(sa,sd,'Location','northeast')
    grid on
    hold off
end

```

B.8.2. Función Auxiliar: Costo

```

function v = C_final(T)

    load alfa;

    baux=double(A_final(T));

    caux=0.01;

    if baux<alfa
        caux=1000000000;
    else
        caux=0;
    end

    v=double(V(T)/Cyc(T)+caux);

end

```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```

function v = C_final2(T)

```

```

load alfa;

baux=double(A_final2(T));

caux=0.01;

if baux<alfa
    caux=1000000000;
else
    caux=0;
end

v=double(V_2(T)/Cyc2(T)+caux);

end

```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```

function v = C_final3(T)

load alfa;

baux=double(A_final3(T));

caux=0.01;

if baux<alfa
    caux=1000000000;
else
    caux=0;
end

v=double(V_3(T)/Cyc3(T)+caux);

end

```

B.8.3. Función auxiliar: restricción de disponibilidad

```

function v = A_final(T)

v=M(T)/Cyc(T);

end

```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```

function v = A_final2(T)

v=M2(T)/Cyc2(T);

```


end

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```
function v = A_final3(T)
```

```
v=M3(T)/Cyc3(T);
```

end

B.8.4. Función auxiliar: M(t)

```
function m= M(T)
```

```
load Le;
```

```
load Ln;
```

```
load COno;
```

```
load COe;
```

```
load CP1;
```

```
load CP2;
```

```
load kh1;
```

```
load kh2;
```

```
load kr1;
```

```
load kr2;
```

```
load betal;
```

```
load eta1;
```

```
load beta2;
```

```
load eta2;
```

```
syms t u;
```

```
f=@(u,t) (t+u)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/eta1)^betal)*eta1^(-betal);
```

```
g=@(u,t) (t+Le)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/eta1)^betal)*eta1^(-betal);
```

```
h=@(u,t) (T+Ln)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/eta1)^betal)*eta1^(-betal);
```

```
j=@(t) (T+Ln)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/eta1)^betal)*eta1^(-betal);
```

```
m= int(int(f,u,0,Le),t,0,T)+int(int(g,u,Le,inf),t,0,T)+int(int(f,u,0,T+Ln-t),t,T,T+Ln)+int(int(h,u,T+Ln-t,inf),t,T,T+Ln)+int(j,t,T+Ln,inf);
```

end

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```
function m= M2(T)
```

```
load Le2;
```

```
load Ln2;
```

```
load COno;
```

```

load COe;
load CP1;
load CP2;
load kh1;
load kh2;
load kr1;
load kr2;
load beta1;
load eta1;
load beta2;
load eta2;

syms t u;

f=@(u,t) (t+u)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
g=@(u,t) (t+Le2)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
h=@(u,t) (T+Ln2)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
j=@(t) (T+Ln2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);

m= int(int(f,u,0,Le2),t,0,T)+int(int(g,u,Le2,inf),t,0,T)+int(int(f,u,0,T+Ln2-t),t,T,T+Ln2)+int(int(h,u,T+Ln2-t,inf),t,T,T+Ln2)+int(j,t,T+Ln2,inf);

end

```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```

function m= M3(T)

load Le3;
load Ln3;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kh1;
load kh2;
load kr1;
load kr2;
load beta1;
load eta1;
load beta2;
load eta2;

syms t u;

f=@(u,t) (t+u)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
g=@(u,t) (t+Le3)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
h=@(u,t) (T+Ln3)*beta2*u^(beta2-1)*exp(-(u/eta2)^beta2)*eta2^(-beta2)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);
j=@(t) (T+Ln3)*beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);

```

```
m= int(int(f,u,0,Le3),t,0,T)+int(int(g,u,Le3,inf),t,0,T)+int(int(f,u,0,T+Ln3-
t),t,T,T+Ln3)+int(int(h,u,T+Ln3-t,inf),t,T,T+Ln3)+int(j,t,T+Ln3,inf);
```

```
end
```

B.8.5. Función auxiliar: Cyc(T)

```
function v = Cyc(T)
```

```
load Ln;
load Le;
load betal;
load etal;
```

```
syms t
```

```
g=@(t) (t+Le)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
```

```
v=int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf);
```

```
end
```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```
function v = Cyc2(T)
```

```
load Ln2;
load Le2;
load betal;
load etal;
```

```
syms t
```

```
g=@(t) (t+Le2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
```

```
v=int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf);
```

```
end
```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```
function v = Cyc3(T)
```

```
load Ln3;
load Le3;
load betal;
```

```

load etal;

syms t

g=@(t) (t+Le3)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln3)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);

v=int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf);

end

```

B.8.6. Función auxiliar V(T)

```

function v = V(T)

v=P1(T)*V1(T)+P2(T)*V2(T);

end

```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```

function v = V_2(T)

v=P12(T)*V12(T)+P22(T)*V22(T);

end

```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```

function v = V_3(T)

v=P13(T)*V13(T)+P23(T)*V23(T);

end

```

B.8.7. Función auxiliar V1

```

function v = V1(T)

load Ln;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kr1;
load kr2;
load betal;
load etal;

```

```

syms t
f=@(t) beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/etal)^beta1)*etal^(-beta1);
v= (COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+(CP1+CP2)+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln)) ;

end

```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```

function v = V12(T)

load Ln2;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kr1;
load kr2;
load beta1;
load etal;

syms t
f=@(t) beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/etal)^beta1)*etal^(-beta1);
v= (COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+(CP1+CP2)+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln2)) ;

end

```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```

function v = V13(T)

load Ln3;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kr1;
load kr2;
load beta1;
load etal;

syms t
f=@(t) beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/etal)^beta1)*etal^(-beta1);
v= (COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+(CP1+CP2)+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln3)) ;

end

```

B.8.8. Función auxiliar V2

```

function v = V2(T)

```

```

load Le;
load Ln;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kh1;
load kh2;
load kr1;
load kr2;
load betal;
load etal;

syms t
f=@(t) betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
g=@(t) (t+Le)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);

v=
(COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+CP1+kh2*(int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf))+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln));

end

```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```

function v = V22(T)

load Le2;
load Ln2;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kh1;
load kh2;
load kr1;
load kr2;
load betal;
load etal;

syms t
f=@(t) betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
g=@(t) (t+Le2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln2)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);

v=
(COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+CP1+kh2*(int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf))+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln2));

end

```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```
function v = V23(T)

load Le3;
load Ln3;
load COno;
load COe;
load CP1;
load CP2;
load kh1;
load kh2;
load kr1;
load kr2;
load betal;
load etal;

syms t
f=@(t) betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
g=@(t) (t+Le3)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);
h=@(t) (T+Ln3)*betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);

v=
(COe*int(f,t,0,T)+COno*int(f,t,T,inf))+CP1+kh2*(int(g,t,0,T)+int(h,t,T,inf))+(kr1+kr2*int(f,t,0,T+Ln3));

end
```

B.8.9. Función auxiliar P1

```
function v = P1(T)

load Ln;
load betal;
load etal;

syms t

f=@(t) betal*t^(betal-1)*exp(-(t/etal)^betal)*etal^(-betal);

v=int(f,t,0,T+Ln);

end
```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```
function v = P12(T)

load Ln2;
load betal;
load etal;

syms t
```

```
f=@(t) beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);

v=int(f,t,0,T+Ln2);

end
```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```
function v = P13(T)

load Ln3;
load beta1;
load eta1;

syms t

f=@(t) beta1*t^(beta1-1)*exp(-(t/eta1)^beta1)*eta1^(-beta1);

v=int(f,t,0,T+Ln3);

end
```

B.8.10. Función auxiliar P2

```
function P = P2(T)

load Ln;
load beta1;
load eta1;

P=1-P1(T);

end
```

- **Variación para cota inferior incertidumbre**

```
function P = P22(T)

load Ln2;
load beta1;
load eta1;

P=1-P12(T);

end
```

- **Variación para cota superior incertidumbre**

```
function P = P23(T)
```



```

load Ln3;
load beta1;
load eta1;

P=1-P13(T);

end

```

B.8.11. Función auxiliar Varianza (generador de incertidumbre)

```

function [x2,fval2,x3,fval3, dimVar ,Ln2,Ln3,Le2,Le3]=Varianza(Ln,Le,options)

    dimVar=input('>Seleccione el tiempo a variar (1 =T. Normal (Ln), 0 =T. Emergencia (Le)) ');

    %texto auxiliar para desplegar desicion en pantalla
    dimVarS=(' ');
    if dimVar==1
        dimVarS=(' Ln = ');
    else
        dimVarS=(' Le = ');
    end

    %limites para la incertidumbre
    dimVarMin=input(strcat('Ingrese un valor minimo para el parametro ',dimVarS));
    dimVarMax=input(strcat('Ingrese un valor maximo para el parametro ',dimVarS));

    optVar= input('¿Existe incertidumbre sobre estos limites? (1 = si, 0 = no)');

    %parametrizando la media de la distribucion
    if dimVar == 1
        prom=Ln;
    else
        prom=Le;
    end

    %variacion segun Le y Ln
    if optVar == 0
        %construccion de la distribucion triangular
        pLd = makedist('Triangular','a',dimVarMin,'b',prom,'c',dimVarMax);
    else
        %construccion de la distribucion normal
        SD= (dimVarMax-dimVarMin)/6;
        pLd = makedist('Normal','mu',prom,'sigma', SD);
    end

    % se generan 1000 demandas aleatorias
    rL = random(pLd,1000,1);

    rL25= prctile(rL,2.5);
    rL975= prctile(rL,97.5);
    s10=['En mil casos, se generan los extremos para el parametro ',dimVarS,['
',num2str(rL25) , ' , ',num2str(rL975),']'];
    disp(s10);

```

```

%      Variables que almacenaran los limites
Ln2=0;
Ln3=0;
Le2=0;
Le3=0;
%parametrizando la media de la distribucion
if dimVar == 1
    Ln2=rL25;
    Ln3=rL975;
    Le2=Le;
    Le3=Le;
else
    Le2=rL25;
    Le3=rL975;
    Ln2=Ln;
    Ln3=Ln;
end

save Ln2 Ln2;
save Ln3 Ln3;
save Le2 Le2;
save Le3 Le3;

disp('***Se inicia el segundo proceso de optimizacion. Espere***');
%cota inferior
[x2,fval2] = fmincon(@C_final2,0.01,[],[],[],[],0,10000,[],options);
disp('');
disp('***Se inicia el tercer proceso de optimizacion. Espere***');
%cota superior
[x3,fval3] = fmincon(@C_final3,0.01,[],[],[],[],0,10000,[],options);
disp('');

end

```

Demanda Aleatoria

1. Función principal

```

function [] = Dda_aleatoria_final_script()

L=input('Ingrese el costo de penalizacion por falla [um]= ');
H=input('Ingrese el costo de almacenamiento por unidad de tiempo [um/ut]= ');
lambda=input('Ingrese tasa de falla (demanda) por unidad de tiempo [fallas/ut]= ');
tau=input('Ingrese el tiempo de entrega de los pedidos (lead time) [ut]= ');
minv=input('Ingrese una estimacion optimista para el tiempo de entrega[ut]= ');
maxv=input('Ingrese una estimacion pesimista para el tiempo de entrega[ut]= ');

%modificacion por sensibilidad
optVar=input('¿Existe incertidumbre sobre estos límites? [1= si, 0 = no]= ');

[alfa,beta,sopt,tS,tSavg,tS25,tS97,YL,ZL]= Dda_aleatoria_final(lambda,tau,L,H,minv,
maxv,optVar);

%El paper tiene error para L/Ht=5: no hay forma de obtener alfa = 1.39 como indica la
publicación

%sopt (obtenido por el método) es aproximación del optimo, por su forma debe estar en
el entorno. Graficamente, se ven algunos costos menores antes de un peak, pero la
cantidad asociada es menor a la demanda por unidad de tiempo. Esa restriccion no se
menciona en la publicacion, por lo que se agrega que s>=lambda, en cada ut.

```

```

%Se calcula el optimo real de forma directa forma directa, con seis numeros
%en torno a el optimo aproximado dentro del rango entregado por la incertidumbre

%optimo real
    Sopt2=0;
%costo del optimo real, parte infinito para actualizar
    Copt2=inf;
%largo del intervalo, redondeado hacia arriba y abajo para mover el índice de la
iteracion
    delta=ceil(ts97)-floor(ts25);

    %Vector para almacenar los x valores en torno al optimo
    SoptVect=ones(delta,2);
    %    SoptVectY=ones(delta,2);
    %    SoptVectZ=ones(delta,2);

    for a=1:delta
        %cantidad
        SoptVect(a,1)= floor(ts25)+a;
        %costo
        SoptVect(a,2)=
SoptVect(a,1)*H+lambda*tau*tpoiss(SoptVect(a,1),tau*lambda)*(H+L/tau);
        %se actualiza el optimo
        if SoptVect(a,2) < Copt2;
            %si el optimo es menor a la demanda por tiempo, se reinicia
            if SoptVect(a,1)< lambda
                Sopt2=0;
                Copt2=inf;
            else
                Copt2=SoptVect(a,2);
                Sopt2=SoptVect(a,1);
            end
        end
    end

end

%calculo de optimo recomendado
    Qrecom=0;
    %puntos en torno al optimo
    Lvar=[YL ZL];
    Qvar =[ceil(sopt) floor(sopt)];
    for u=1:2
        Cvar(u)=Qvar(u)*H + lambda*Lvar(u)*tpoiss(Qvar(u),Lvar(u)*lambda)*(H+L/Lvar(u)) ;
    end

    %definicion de optimo factible, debiese estar cercano al optimo real.

    m= (Cvar(2)-Cvar(1))/(Cvar(2));
    if m>=0.05
        Qrecom=Qvar(1);
    else
        Qrecom=Qvar(2);
    end

    %Plot
    %rango para s
    splo = (1:1:Sopt2*5);

    %rango para C
    %tpoiss es la distribucion de Poisson truncada
    for i=1:length(splo)
        C(i)=splo(i)*H+lambda*tau*tpoiss(splo(i),tau*lambda)*(H+L/tau);
        CY(i)=splo(i)*H+lambda*YL*tpoiss(splo(i),YL*lambda)*(H+L/YL);
        CZ(i)=splo(i)*H+lambda*ZL*tpoiss(splo(i),ZL*lambda)*(H+L/ZL);
    end

    %leyenda

```

```

        sa=strcat('Costo para H = ',num2str(H),' ; L = ',num2str(L), ' ; lambda = ',
num2str(lambda),' ; tau = ',num2str(tau));
        sb=strcat('Costo para H = ',num2str(H),' ; L = ',num2str(L), ' ; lambda = ',
num2str(lambda),' ; tau = ',num2str(YL));
        sc=strcat('Costo para H = ',num2str(H),' ; L = ',num2str(L), ' ; lambda = ',
num2str(lambda),' ; tau = ',num2str(ZL));

        %auxiliares para zoom sobre el s optimo
        Sfloor=Sopt2-5;
        Sceil=Sopt2+5;

        hold on
        ax1 = subplot(2,1,1);
        plot(splo, C,splo, CY,'--',splo, CZ,'--')
        xlabel('Nivel de inventario [u]')
        ylabel('Costo Global[um]')
        title('Costo Global con Demanda Aleatoria')
        legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
        grid on
        ax2 = subplot(2,1,2);
        plot(splo, C,splo, CY,'--',splo, CZ,'--')
        xlim(ax2,[Sfloor Sceil])
        xlabel('Nivel de inventario [u]')
        ylabel('Costo Global[um]')
        legend(sa,sb,sc,'Location','northeast')
        grid on
        hold off

        %Display
        disp('');
        s1=['Segun el modelo, el inventario minimo optimo aproximado a mantener es ',
num2str(sopt), ' unidades'];
        disp(s1);
        disp('');
        s5=['Al precisar la aproximacion implicita del modelo, SIN considerar la
incertidumbre informada, el nivel de inventario optimo es ',num2str(Sopt2),' unidades
'];
        disp(s5);
        disp('');
        s4=['En mil variaciones del tiempo de demora, la media a mantener es ',
num2str(tSavg), ' unidades, con un 95% de los casos dentro del rango:
[' ,num2str(tS25),',',',',num2str(tS97),',']'];
        disp(s4);
        disp('');

        s6=['Considerando la incertidumbre informada, el nivel de inventario optimo es
',num2str(Qrecom), ' unidades'];
        disp(s6);
        s7='La sensibilidad del costo al tiempo de entrega se puede apreciar en el
gráfico';
        disp(s7);

end

```

2. Función auxiliar

```

function [alfa,beta,s,tS,tSavg,tS25,tS97,YL,ZL] =
Dda_aleatoria_final(lambda,tau,L,H,minv, maxv,optVar)

% function [alfa,beta,s,lS,lSavg,lS25,lS97,tS,tSavg,tS25,tS97] =
Dda_aleatoria_final(lambda,tau,L,H,min, max,optVar)

%calculo directo
        beta=2*log(1+L/(H*tau));

```

```

alfa=sqrt(2*log((beta*(1+L/(H*tau)))/(sqrt(2*pi))));
s=lambda*tau+alfa*sqrt(lambda*tau);

if optVar == 0
    %construccion de la distribucion triangular
    tauLd = makedist('Triangular','a',minv,'b',tau,'c',maxv);
else
    %construccion de la distribucion normal
    SD= (maxv-minv)/6;
    tauLd = makedist('Normal','mu',tau,'sigma', SD);
end

%generacion de 1000 datos a partir de la distribucion
% lL = random(lamLd,1000,1);
tL = random(tauLd,1000,1);

YL= prctile(tL,2.5);
ZL= prctile(tL,97.5);

%evitando casos infinitos por tau como divisor
for i=1:1000
    if tL(i)==0
        tL(i)=0.01;
    end
end

for a=1:1000
    %esto al parecer es un error de la publicacion, no converge a sus soluciones.
    % tBeta(a)=sqrt(2*log(1+L/(H*tL(a))));
    % se modifica por el siguiente codigo, que si converge.

    tBeta(a)=2*log(1+L/(H*tL(a)));

    tAlfa=sqrt(2*log((tBeta(a)*(1+L/(H*tL(a)))/(sqrt(2*pi))));
    end

    tS=lambda*tL+tAlfa*sqrt(lambda*tL);

    tSavg = mean(tS);

    tS25=prctile(tS,2.5);

    tS97=prctile(tS,97.5);

end

```

Demanda Intermitente

1. Función principal

```

function [] = croston_modif_final_script()

    xString=input('Ingrese el nombre del archivo con los datos de demanda, segun el
formato establecido (nombre.xlsx)','s');
    x= xlsread(xString);
    xV=x(:,2);

    alfa=input('Ingrese el valor del primer parametro de suavizacion exponencial
(alfa)');
    beta=input('Ingrese el valor del segundo parametro de suavizacion exponencial
(beta)');

    dimVar=input('Seleccione el parametro de suavizacion a variar (1 = alfa, 0 =
beta)');

```

```

%texto auxiliar para desplegar desicion en pantalla
dimVarS =(' ');
if dimVar==1
    dimVarS=(' alfa = ');
else
    dimVarS=(' beta = ');
end

%limites para la incertidumbre
dimVarMin=input(strcat('Ingrese un valor minimo para el parametro ',dimVarS));
dimVarMax=input(strcat('Ingrese un valor maximo para el parametro ',dimVarS));

%parametro para seleccionar la distribucion
optVar= ('¿Existe incertidumbre sobre estos limites? (1 = si, 0 = no)');

%    varS=input('Ingrese el valor de la variacion porcentual deseada para los
parametros de suavizacion','s');
%    var=str2double(varS);

    [vCroston,aCrostonV,bCrostonV,pred] =
croston_modif_final(xV,alfa,beta,dimVar,dimVarMin,dimVarMax,optVar);
%    [vCroston,aCrostonV,bCrostonV,pred] = croston_modif_final(xV,alfa,beta,var);

    s1=strcat('De acuerdo al historial entregado, la prediccion de la demanda
para el siguiente período es ',num2str(pred),' unidades');
    disp(s1);

if dimVar==1
    %figura para la variacion de alfa
    figure;
    hold on
    plot(xV,'-bs');
    plot(vCroston,'-rs');
    plot(aCrostonV(1,:));
    %plot(aCrostonV(2,:));
    plot(aCrostonV(3,:));
    title('Prediccion de demanda segun el modelo de Croston, variacion de parametro
alfa');
    xlabel('Periodo');
    ylabel('Demanda');
    %    legend('Datos','Prediccion Segun Croston','Cota inferior de las
observaciones','Media de las observaciones','Cota superior de las observaciones')
    legend('Datos','Prediccion Segun Croston','Cota inferior de las observaciones','Cota
superior de las observaciones');
    hold off

else
    %figura para variacion de beta
    figure;
    hold on
    plot(xV,'-bs');
    plot(vCroston,'-rs');
    plot(bCrostonV(1,:));
    % plot(bCrostonV(2,:));
    plot(bCrostonV(3,:));
    title('Prediccion de demanda segun el modelo de Croston, variacion de parametro
beta');
    xlabel('Periodo');
    ylabel('Demanda');
    %    legend('Datos','Prediccion Segun Croston','Cota inferior de las
observaciones','Media de las observaciones','Cota superior de las observaciones')
    legend('Datos','Prediccion Segun Croston','Cota inferior de las
observaciones','Cota superior de las observaciones')
    hold off
end
end

```

end

2. Función auxiliar

```
function [vCroston,aCrostonV,bCrostonV,pred] =  
croston_modif_final(x,alfa,beta,dimVar,dimVarMin,dimVarMax,optVar)  
% función [vCroston,aCrostonV,bCrostonV] = croston_modif_final(x,alfa,beta,var)  
  
%alfa y beta son los factores de suavizacion exponencial, x es el vector de datos  
intermitentes  
n=length(x);  
%vector de demandas previstas  
vCroston=zeros(1,n+1);  
vCroston(1)=x(1);  
  
%forecast de la demanda, iniciado con la primera demanda real  
Z=zeros(1,n);  
aZ=zeros(1,n);  
bZ=zeros(1,n);  
  
I=zeros(1,n);  
aI=zeros(1,n);  
bI=zeros(1,n);  
  
aCrostonM=zeros(1000,n+1);  
bCrostonM=zeros(1000,n+1);  
  
Z(1)=x(1);  
aZ(1)=x(1);  
bZ(1)=x(1);  
  
%forecast de intervalos, el primero en 1 pues siempre habra uno menos que  
%la demanda y se refiere al primer periodo  
I(1)=1;  
aI(1)=1;  
bI(1)=1;  
%contador de periodos  
Q=1;  
aQ=1;  
bQ=1;  
  
%variacion de acuerdo a lo ingresado por el usuario y para  
%definir la aleatoriedad triangular o normal  
  
%modificando solo un parametro  
if dimVar == 1  
    prom=alfa;  
else  
    prom=beta;  
end  
  
%variacion segun alfa y segun beta  
  
if optVar == 0  
    %construccion de la distribucion triangular  
    pLd = makedist('Triangular','a',dimVarMin,'b',prom,'c',dimVarMax);  
else  
    %construccion de la distribucion normal  
    SD= (dimVarMax-dimVarMin)/6;  
    pLd = makedist('Normal','mu',prom,'sigma', SD);  
end  
  
%generacion de 1000 datos a partir de la distribucion  
rL = random(pLd,1000,1);  
%croston normal  
for i=2:n
```

```

    if x(i)==0
        %si el dato es nulo repetimos el valor anterior y aumentamos el
        %contador (diferencia entre periodos con demanda)
        Z(i)=Z(i-1);
        I(i)=I(i-1);
        Q=Q+1;
    else
        Z(i)=alfa*x(i)+(1-alfa)*Z(i-1);
        I(i)=beta*Q+(1-beta)*I(i-1);
        Q=1;
    end
    vCroston(i+1)=Z(i)/I(i); %Resultado de Croston basico
end

pred=vCroston(n+1);
%Se genera una matriz de nx1000 (un vector de croston por
%cada alfa y beta). De eso, a cada columna (esta construido hacia el lado),
%se obtiene la media, el percentil inferior y superior y se almacena en una
%matriz de 3 x n, para graficar esas 3 curvas

%matriz 1, para alfa

%contador para desplazarme en la matriz
if dimVar == 1
    for j=1:1000
        %      MaCros(j,aCon)=
        for k=2:n
            if x(k)==0
                aZ(k)=aZ(k-1);
                aI(k)=aI(k-1);
                aQ=aQ+1;
            else
                aZ(k)=rL(j)*x(k)+(1-rL(j))*aZ(k-1);
                aI(k)=beta*aQ+(1-beta)*aI(k-1);
                aQ=1;
            end %x(k)==0
            aCrostonM(j,k+1)=aZ(k)/aI(k); %Resultado de Croston con alfa
        end %k=2:n
    end %j=1:1000
else %dimVar == 0
    %matriz para beta
    for l=1:1000
        %      MaCros(j,aCon)=
        for m=2:n
            if x(m)==0
                bZ(m)=bZ(m-1);
                bI(m)=bI(m-1);
                bQ=bQ+1;
            else %x(m)==0
                bZ(m)=alfa*x(m)+(1-alfa)*bZ(m-1);
                bI(m)=rL(l)*bQ+(1-rL(l))*bI(m-1);
                bQ=1;
            end %x(m)==0
            bCrostonM(l,m+1)=bZ(m)/bI(m); %Resultado de Croston con beta
        end %m=2:n
    end %l=1:1000
end %dimVar == 1

% 4/11 debes construir a partir de lo que variaste, y graficar

%aCrostonV,bCrostonV
aCrostonV=zeros(3,n);
bCrostonV=zeros(3,n);

for r=1:n

```



```
    aCrostonV(1,r)=prctile(aCrostonM(:,r),2.5);  
    bCrostonV(1,r)=prctile(bCrostonM(:,r),2.5);  
  
    aCrostonV(2,r)=mean(aCrostonM(:,r));  
    bCrostonV(2,r)=mean(bCrostonM(:,r));  
  
    aCrostonV(3,r)=prctile(aCrostonM(:,r),97.5);  
    bCrostonV(3,r)=prctile(bCrostonM(:,r),97.5);  
  
end  
end
```