

**Facultad de Ingeniería
Universidad de la Republica Oriental del Uruguay**



POLÍTICAS DE INVENTARIOS, MANTENIMIENTO Y PRONÓSTICOS

TALLER V

Dpto. de Investigación Operativa, In.Co., Facultad de Ingeniería

INFORME FINAL

Abril 2002

Tutores:

Ing. Omar Viera, Dpto. I.O., In.Co.
Ing. Agr. Luis Alberto Calderón, I.C.A.

Integrantes:

Esteban Ferrer 4.026.210-9
Ángel Mouriz 4.135.172-9
Pedro Piñeyro 4.218.499-3

Abstract

Este informe presenta de la forma más detallada posible el proceso de investigación y desarrollo que tuvo lugar durante el transcurso del presente *Taller V*. Dicho proyecto, está dirigido a la implementación de soluciones para los siguientes problemas: **Problemas de inventarios** (dónde se pretende minimizar los costos de mantener un stock de uno o varios artículos, teniendo en cuenta las relaciones que existen entre ellos), **Problemas de inventarios con remanufacturación y disposición final** (se pretende minimizar los costos de mantener un artículo en stock, pero además interesa obtener un beneficio ecológico ya que como por ejemplo desechar todo cada vez y producir nuevamente puede ser perjudicial para el medio ambiente, y a veces también imposible tecnológicamente), **Problemas de mantenimiento de equipos** (también llamados problemas de reemplazo, en ellos se pretende obtener un calendario que indique cuando reemplazar un equipo existente por un equipo nuevo, de forma de minimizar los costos totales durante un período de tiempo) y **Pronósticos** (dónde se pretende conocer el valor futuro de una cantidad, la cual varía en el tiempo con una cierta tendencia).

Para cada uno de estos problemas se implementaron soluciones que van desde métodos clásicos de optimización pasando por programación dinámica y hasta recorridas sobre grafos. Las soluciones planteadas, son políticas óptimas o métodos heurísticos.

Los problemas de inventarios se solucionaron mediante métodos de optimización iterativos como el método de relajación de Lagrange [4.2] o de programación dinámica simplificados como Wagner-Whitin [4.3] y diversos heurísticos (por ejemplo el método de Silver-Meal [10]), y para el caso de varios artículos se presentan distintas soluciones, según si la relación entre los mismos es independiente (Limitación de Espacio de Almacenamiento) o dependiente (Plan de Requerimiento de Materiales, MRP [3]).

Los problemas de Inventarios con Remanufacturación y Disposición final, se resolvieron mediante el modelo planteado por Knut Richter [5][6][7][8], que es una adaptación del modelo clásico de EOQ [2.1][1.1] para este problema.

Las soluciones propuestas para resolver los problemas de mantenimiento de equipos se basaron en programación dinámica y recorridas sobre grafos.

Los problemas de pronósticos se resolvieron mediante el método de Series de Tiempo con Suavizamiento Exponencial [1.9].

Algunos métodos eran presentados de forma particular en la literatura estudiada, por lo que se realizó una extensión de los mismos para brindar una mayor funcionalidad.

El resultado del proyecto es un conjunto de funcionalidades que resuelven los problemas antes mencionados. Tanto las soluciones implementadas, como los problemas resueltos, fueron seleccionados entre una gran cantidad de opciones, por considerarlos clásicos o de fácil aplicación práctica, y que este es un taller introductorio con respecto a estos temas.

Todas estas funcionalidades pueden ser utilizadas tanto de forma local o de forma remota, ya sea en una LAN (*red de área local*) o a través de Internet.

KeyWords: Control de Inventarios, Remanufacturación, Disposición final, MRP, Mantenimiento, Pronósticos.

Area: Investigación de Operaciones, Optimización.

ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO	5
1.2. PROBLEMAS DE INVENTARIOS.....	5
1.3. PROBLEMAS DE MANTENIMIENTO DE EQUIPOS.....	9
1.4. PRONÓSTICOS	9
1.5. ASPECTOS TÉCNICOS DE PROYECTO.....	10
1.6. CONCLUSIONES.....	10
2. INVESTIGACIÓN.....	12
2.1. CONTENIDO	12
2.2. INCONVENIENTES DEL PROCESO.....	12
2.3. CONCLUSIÓN.....	12
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
3.1. MODELOS DE INVENTARIOS DE UN SOLO ARTÍCULO.....	14
3.2. MODELO DE INVENTARIO DE VARIOS ARTÍCULOS.....	27
3.3. MODELO DE INVENTARIO CON REMANUFACTURACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL.....	30
3.4. POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO.....	33
3.5. PRONÓSTICOS	36
4. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	39
4.1. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES	39
4.2. MODELO DE CASOS DE USO.....	39
5. DISEÑO	40
5.1. DISEÑO DE ALTO NIVEL Y ARQUITECTURA.....	42
5.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL SISTEMA.....	43
5.3. MODELO DE CASOS DE USO REALES	43
5.4. DECISIONES TÉCNICAS	43
6. IMPLEMENTACIÓN	44
7. RESULTADOS DE LOS TESTEOS.....	45
7.1. PRUEBAS FUNCIONALES	45
7.2. PRUEBAS DE PORTABILIDAD	63
7.3. PRUEBAS DE INTEROPERABILIDAD	63
7.4. PRUEBAS DE ACCESO	63
8. CONCLUSIONES.....	64
9. APORTES.....	66

10.	TRABAJOS FUTUROS.....	70
10.1.	OBJETIVOS NO CUMPLIDOS.....	70
10.2.	OPTIMIZACIONES Y MEJORAS.....	70
10.3.	EXTENSIONES Y NUEVAS FUNCIONALIDADES.....	71
11.	ÍNDICE DE ANEXOS.....	74
12.	REFERENCIAS	75
	GLOSARIO.....	78

1. Introducción

La intención de este documento es presentar el proceso de investigación y desarrollo que tuvo lugar durante el transcurso del presente Proyecto.

Este proyecto se enmarca dentro del contexto de un *Taller V* llevado adelante en la *Facultad de Ingeniería*, dentro de la *Universidad de la Republica Oriental del Uruguay*. La concepción de este proyecto fue de I.C.A. (*Ingenieros Consultores Asociados*) quienes presentaron el mismo para que fuese realizado como un *Proyecto de Taller V* en el año lectivo correspondiente al año 2001.

1.1. Objetivo del Proyecto

Actualmente, existen diversos productos de software disponibles en el mercado que permiten solucionar muchos de los problemas enfrentados por este taller.

La mayoría de estas herramientas utilizan la metodología *MRP** [3] como su punto principal. Muchas de ellas permiten también realizar control de inventarios mediante los métodos tradicionales de Punto de Reorden, *EOQ**, etc. pero como una funcionalidad secundaria.

(Por una breve descripción de algunos de los productos existentes, véase el Apéndice 1 del Documento del Estado del Arte (Anexo 1))

Este proyecto, está dirigido al desarrollo de soluciones para diversos problemas del área de *Investigación de Operaciones*; los mismos se detallan a continuación con su descripción correspondiente *(por una descripción más detallada, referirse al documento de Estado del Arte (Anexo 1))*:

1.2. Problemas de Inventarios

Podemos definir como inventarios al mantenimiento o almacenamiento de aquellos artículos que serán utilizados o comprados por algún cliente. Los problemas de inventario son aquellos que tratan de decidir cual es la cantidad de artículos que se debe mantener en inventario y cuando se debe ordenar esta cantidad de forma que el costo total sea mínimo, es decir, se desea obtener una *Política de Inventario** que minimice los costos totales, que es la suma de los costos de ordenar o producir una cantidad dada de artículo, costos fijos por producir u ordenar independientes de la cantidad, y costos de mantener en inventario una cierta cantidad de artículo durante un cierto tiempo.

1.2.1. Componentes de los problemas de Inventarios

Los componentes básicos de un problema de inventarios son:

- ? Información de la demanda
- ? Información del costo unitario de ordenar o producir
- ? Información del costo unitario de mantener en inventario
- ? Costo fijo de una orden o producción
- ? Tiempos de entrega de una orden o de producción

Esta la información mínima necesaria para establecer una política de inventario, aunque en la realidad el sistema puede estar compuesto de otras características, como por ejemplo que existan descuentos por cantidad de artículo comprado. A continuación se describen brevemente algunos conceptos utilizados.

Se entiende por **demanda** de un artículo como la cantidad necesaria del artículo para satisfacer una exigencia interna o externa del mismo, en determinado momento. Dependiendo de las circunstancias la falta de cierto artículo en el momento en que este es necesario puede llevar a grandes pérdidas económicas, mientras que en otras ocasiones esta demanda puede ser satisfecha posteriormente. Este último caso se conoce como problema de inventarios con *backlogging*^{*}, lo cual significa que está permitido satisfacer la demanda de un momento t , en un momento $t + k$, con $k > 0$. En estos casos evidentemente hay que tener en cuenta el **costo por faltantes**, que es el costo correspondiente a la cantidad de demanda insatisfecha.

El **costo de ordenar** o producir unitario es el costo de una unidad de artículo ya sea de compra o el necesario para su producción en determinado momento. Este costo puede ser la suma de los costos de combustible, de empaque, el de impuestos, el de horas-hombre para su ensamblaje, manufacturación o traslado, etc. Generalmente este costo se corresponde con una función lineal o no-lineal con respecto a la cantidad producida u ordenada. Una situación de costos no lineales es cuando los costos de ordenar bajan a medida que aumenta la cantidad ordenada, en este caso se dice que estamos en presencia de una *economía de escala*, lo cual significa que se realizan **descuentos por cantidad** de artículos ordenados / producidos y esto se debe tener en cuenta para la aplicación de la *política de inventario*^{*}.

El *costo de inventario*^{*} es el costo que se incurre por mantener o almacenar en inventario una unidad de artículo. El costo de inventario incluye entre otros el *costo del capital invertido* [4.1], costo de acarreos (estiba, carga y descarga), costos de almacenamiento (renta y pérdida de valor del inmueble), costos administrativos, seguros, impuestos, deterioro, robo, etc.

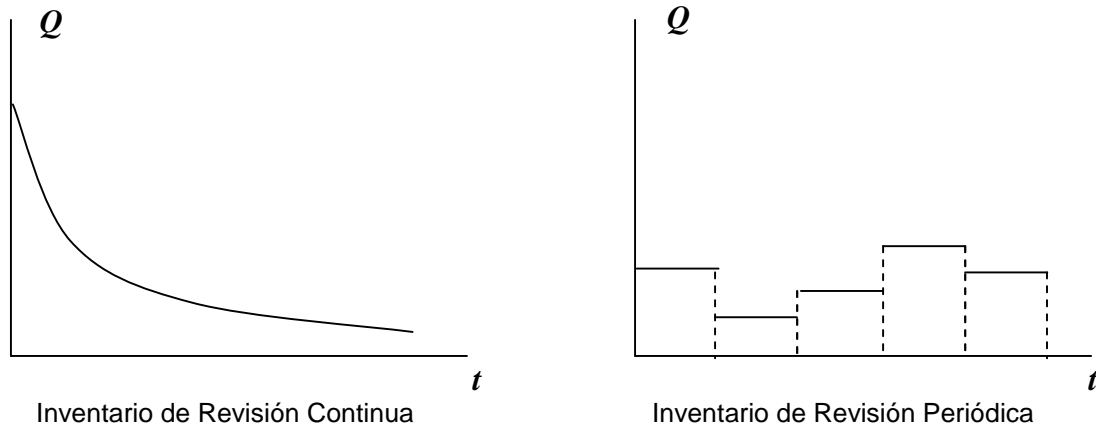
El **tiempo de entrega** es el tiempo que transcurre entre que se libera una *orden*^{*} de compra o de producción y cuando se recibe la misma. Generalmente este tiempo de entrega es un valor pequeño en relación a la duración del plan del artículo, y existen casos en que este se considera nulo.

1.2.2. Clasificación de los problemas de Inventarios

La primer clasificación que puede realizarse, es en términos de la cantidad de artículos de los problemas de inventario. Los dos tipos de problemas son los que manejan un único artículo y los que el inventario se compone de varios artículos. Para cada caso se encontraron métodos que eran presentados de forma particular en la literatura investigada, por lo que se realizaron extensiones de los mismos para brindar una funcionalidad más general, como por ejemplo extender los métodos a costos variables por períodos, a tiempos de entrega distintos de cero, y a distribuciones de probabilidad más generales. Además en el caso de varios artículos se debe tener en cuenta si la demanda de estos es dependiente o independiente.

Independientemente de la clasificación anterior, los problemas de inventario pueden dividirse en dos categorías: problemas de *revisión continua** y problemas de *revisión periódica**. Un problema de inventario es de revisión continua cuando el nivel de inventario se puede determinar en cualquier instante de tiempo, y de revisión periódica cuando el nivel de inventario se puede determinar de forma discreta, o sea se asume un cierto nivel para un intervalo de tiempo de longitud conocida.

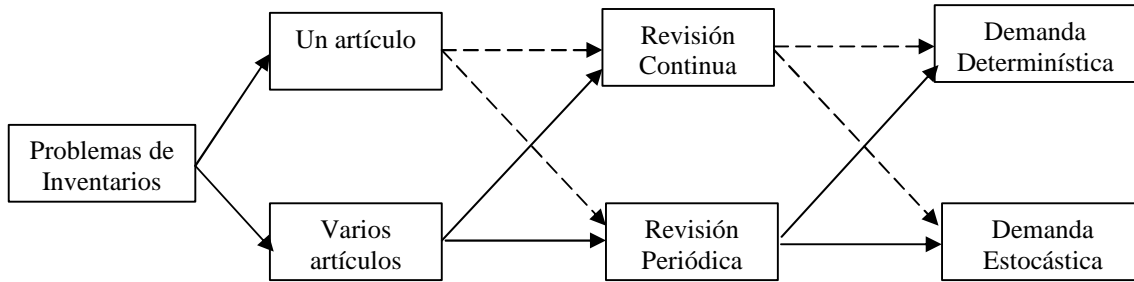
La representación gráfica de ambos casos es la siguiente:



Que la revisión de un inventario se realice de forma continua o periódica influye en la información de la demanda; en los inventarios de revisión continua generalmente se tiene una expresión de la tasa de demanda, mientras que en los de revisión periódica se tiene la demanda para cada período. En el caso de revisión periódica los períodos pueden ser de distinta longitud, aunque no es lo más habitual.

En ambos casos se puede realizar una división en cuanto al *horizonte de planeamiento**, finito o infinito, lo cual determina el largo o duración del plan calculado, y que la información necesaria (demanda y costos) se conocen hasta ese momento. El primer caso es el más utilizado y se asume así para todos los problemas descritos y las soluciones implementadas en el proyecto.

A su vez, dependiendo de las características de la demanda del artículo, cada una de estas categorías iniciales puede subdividirse en problemas con *demanda determinística** o problemas con *demanda probabilística**. La demanda determinística significa que se conoce o al menos así se supone, exactamente la demanda del artículo durante todo el largo del plan a determinar. Si estamos en un inventario de revisión continua entonces se conoce la demanda en cada instante de tiempo, y si estamos en un inventario de revisión periódica se conoce la demanda de cada período. En el caso de demanda probabilística, el valor de la demanda está dado por una distribución de probabilidad que puede ser conocida o desconocida.



Clasificación de Problemas de Inventario

Nuevamente, dentro de estas subdivisiones, pueden realizarse varias subdivisiones adicionales dependiendo de diversas características de un problema específico. Más adelante, en la [Sección 3 \(Definición del Problema\)](#), se detallan cuales son los problemas específicos que se atacaron en este proyecto respecto a este tema.

Los problemas de inventario de varios artículos requieren un análisis aparte, ya que puede darse el caso, y efectivamente este es el más interesante, de que exista relación entre la demanda de un artículo (*producto final*^{*}) y la demanda de otro u otros artículos (*artículo componente*^{*}), lo cual está informado mediante la Lista de Materiales (*BOM*^{*} de sus siglas en inglés). En estos casos el objetivo fundamental es tener la cantidad suficiente de cada artículo en el momento correcto, más que un plan de costo mínimos total.

Dada la complejidad del sistema, no se ha desarrollado hasta el momento un modelo efectivo y de uso conocido, que asegure un plan de costo mínimo global, porque esto requiere de un análisis en conjunto de los artículos, teniendo en cuenta la relación de dependencia entre la demanda de los mismos y los costos asociados de producir y mantener en inventario [3].

En cambio, se ha desarrollado un modelo para este problema de uso bastante amplio, denominado Plan de Requerimiento de Materiales, o *MRP*^{*} de sus siglas en inglés, con el cual es posible obtener óptimos locales, que si bien no asegura un óptimo global, conduce a una solución bastante aceptable, dependiendo de la *política de inventario*^{*} a aplicar a cada artículo.

En el caso de artículos independientes, puede establecerse una *política de inventario*^{*} para cada uno sin tener en cuenta la política establecida para otro artículo, pero en este caso pueden existir limitaciones de espacio de almacenamiento, y por lo tanto interesa analizarlos de forma conjunta.

Por más detalles sobre los problemas de inventarios, referirse al punto 1 y 3 del Documento del Estado del Arte (Anexo 1)

1.2.3. Problemas de inventarios con remanufacturaación disposición final

Dada la creciente importancia de la conciencia ecológica en la sociedad, es importante analizar los casos en los cuales los artículos que están en inventario pueden ser desechados o reciclados para su reutilización (un caso típico en esta categoría son los envases retornables de bebidas). En estos casos, no solo es importante la minimización de costos, sino que es de crucial importancia mantener un nivel de *disposición final** (cantidad de artículos a desechar) tal, que los efectos nocivos sobre el medio ambiente sean los menos posibles.

El modelo desarrollado para este problema fue realizado por el investigador *Knut Richter*, y esta basado en una ampliación del método *EOQ** para incluir los costos de *remanufacturaación** y *disposición final**. Este modelo solo considera un artículo.

Por más detalles sobre los problemas de inventarios con remanufacturaación y disposición final, referirse al punto 2 del Documento del Estado del Arte (Anexo 1)

1.3. Problemas de mantenimiento de equipos

No tan relacionado con los problemas de inventario, pero igualmente importante dentro de la Investigación de Operaciones, tenemos los problemas de reemplazo de equipos. En estos problemas se desea saber en que momento de tiempo se debe dejar de realizar el mantenimiento de un equipo o máquina para reemplazarlo por una máquina nueva, de forma de que el costo total de las decisiones de mantenimiento/reemplazo sea mínimo en un cierto período de tiempo. Se presentan soluciones para problemas que involucran un equipo y también para problemas en los cuales más de un equipo debe ser considerado.

Por más detalles sobre los problemas de mantenimiento de equipos, referirse al punto 4 del Documento del Estado del Arte (Anexo 1)

1.4. Pronósticos

Íntimamente relacionado con la resolución de problemas de inventario, está el problema de determinar cual es la demanda de los artículos para el próximo período de tiempo a considerar. Este punto puede ser bastante complicado, ya que en muchos casos la información sobre la demanda puede estar bien definida (por ejemplo debido a que es constante) o se puede tener un modelo que la aproxime adecuadamente (se ajusta a alguna distribución de probabilidad) y en otros casos puede ser total o parcialmente desconocida. En este último caso es importante poder determinar con cierta precisión cual es el valor de la demanda en períodos futuros para que una política de inventario tenga el efecto deseado; es aquí donde entran en juego los pronósticos. Dentro de este tema, se plantean métodos que permiten realizar pronósticos de una variable aleatoria (con *tendencia estacional**, *tendencia lineal** o *tendencia constante**) mediante el método de series de tiempo [1.9].

Por más detalles sobre los problemas de pronósticos, referirse al punto 5 del Documento del Estado del Arte (Anexo 1)

1.5. Aspectos técnicos de Proyecto

Actualmente, el mercado de soluciones informáticas muestra una tendencia a brindar diversas funcionalidades de forma remota a través de Internet (Web Services). Para no estar ajenos a esta tendencia, parte importante del proyecto era poder brindar soluciones a los problemas antes descritos de forma remota, es decir, recibir los datos de entrada desde una locación remota, resolver el problema y devolver los resultados.

Podemos decir que el resultado de este proyecto es entonces una serie de funcionalidades, implementadas de tal forma que puedan ser utilizadas desde diferentes aplicaciones tanto de forma local como remota (en una red local, o a través de Internet). Dichas funcionalidades resuelven cada uno de los problemas que se detallaron en párrafos anteriores.

Alejándonos de los temas funcionales del proyecto y acercándonos a las características técnicas del mismo, podemos decir que el mismo cubre un aspecto de creciente importancia como lo son los *Web Services*.

Un Web Service es la definición de un servicio que se ofrece a través de la Web, implementado mediante estándares que proporciona la interoperabilidad suficiente para ser invocado desde cualquier lenguaje y desde cualquier plataforma. Dentro de los estándares se encuentran XML (*Extended Markup Language*) para representar la información entre el cliente y el servicio, SOAP (*Simple Object Access Protocol*) como protocolo de comunicación, y HTTP (*Hipertext Transfer Protocol*) como medio de transporte.

Otro estándar utilizado es WSDL (*Web Service Definition Language*) el cual permite exportar las funcionalidades de un servicio al cliente.

Para este proyecto, se crearon una serie de *Web Services* que solucionan los problemas antes descritos. Para llevar adelante la implementación de estos servicios, se utilizaron como ya se mencionó tecnologías como SOAP y COM el modelo de componentes para el ambiente Windows, entre otras. (*Véase el Anexo Técnico del Documento de Diseño (Anexo 5)*).

1.6. Conclusiones

Como se puede observar de los puntos anteriores, existe una gran cantidad de casos puntuales para cada uno de los problemas, y a su vez un conjunto diverso de soluciones para cada uno de ellos.

El trabajo realizado en el proyecto consistió en la investigación de los problemas antes mencionados y de la implementación de algunas de sus soluciones, destacándose fundamentalmente el trabajo llevado a cabo sobre los problemas de mantenimiento y control de inventarios.

Debido a la gran cantidad de métodos, diversidad y complejidad de los problemas, se implementaron soluciones enfocadas a resolver los problemas clásicos y más habituales dentro de cada caso, y estas van desde políticas óptimas hasta métodos heurísticos. En la mayoría de los casos, se implementaron las soluciones clásicas debido a que la complejidad matemática y/o la complejidad de tiempo computacional podían hacer que las soluciones sofisticadas resultaran inviables dentro del contexto del presente proyecto.

Podemos concluir entonces que se logró implementar una biblioteca básica para los problemas habituales de control y mantenimiento de inventario, reemplazo de equipos y pronósticos, y que se realizó una tarea de investigación prolífera en relación a estos temas. No obstante ello, existen diversas extensiones que pueden realizarse al resultado final de este proyecto (*Véase la [Sección 10 \(Trabajos Futuros\)](#)*).

El resto de este informe está organizado como sigue. En la [Sección 2](#) describimos el proceso de investigación realizado. En la [Sección 3](#) comenzamos con una descripción detallada de los problemas atacados y las asunciones correspondientes. En la [Sección 4](#) describimos brevemente el proceso de Análisis de Requerimientos. En la [Sección 5](#) brindamos detalles sobre el diseño de las soluciones implementadas. En la [Sección 6](#) presentamos el proceso de implementación. En la [Sección 7](#) describimos el proceso de Testeo y Validación realizado. En la [Sección 8](#) resumimos los resultados del proyecto y presentamos las conclusiones del mismo. En la [Sección 9](#) presentamos los aportes realizados por nosotros al proyecto y viceversa. Finalmente en la [Sección 10](#) detallamos los trabajos futuros que pueden ser llevados adelante, por ejemplo en otro proyecto de Taller 5. Finalmente se presentan un índice de los anexos de este documento ([Sección 11](#)), las referencias bibliográficas citadas ([Sección 12](#)) y un glosario donde pueden consultarse los conceptos marcados con asterisco como superíndice (*).

2. Investigación

2.1. Contenido

La etapa de investigación de este proyecto se extendió desde el martes 5 de junio de 2001 hasta el viernes 3 de agosto de 2001. El resultado de esta etapa fue el documento de *Estado del Arte* que se adjunta como anexo a este documento ([Anexo 1](#))

En dicho documento se especifican todas las investigaciones realizadas sobre los temas referentes al proyecto. En el mismo, figura gran cantidad de información, la cual no ha sido trasladada en su totalidad a una implementación real debido por ejemplo a limitaciones como al tiempo asignado al proyecto o porque eran soluciones demasiado sofisticadas o especializadas para el marco del mismo. ([Véase el punto Alcance del Proyecto en el documento de Análisis de Requerimientos \(Anexo 3\)](#))

Sin embargo, gran parte de los temas investigados (la que consideramos esencial y más aplicable en la realidad) han sido implementados y es parte del producto de software resultante de este proyecto.

Aquellas partes que no han sido tenidas en cuenta, pero que sin embargo hubiésemos querido incluir, al igual que otras que podrían considerarse interesantes debido a que mejoran funcionalidades implementadas, son detalladas en la [Sección 10 \(Trabajos Futuros\)](#).

2.2. Inconvenientes del Proceso

La cantidad de información encontrada sobre los temas referentes al proyecto varía desde abundante (*Inventarios** de un artículo) hasta muy escasa (*Reemplazo de Equipos y MRP**).

En muchos casos se seleccionó bibliografía a través de Internet, y la misma no estaba disponible ni en la Facultad de Ingeniería ni en la Facultad de Economía, o el volumen seleccionado no estaba en la colección disponible.

La calidad del material bibliográfico también varía de forma similar, habiendo casos en que la misma es muy detallada y otros en los que además de ser extremadamente compleja, la claridad del material y las explicaciones que en él se presentan resultan difícil de entender y analizar (*Remanufacturación** y *Disposición Final**). En la mayoría de estos últimos casos, la complejidad de la información está dada en que el autor asume que el lector posee amplios conocimientos del tema que está desarrollando y omite gran cantidad de pasos básicos que harían que el material fuese más entendible. El tiempo dedicado a poder comprender ciertos artículos fue bastante extenso ([Véanse los puntos 2, 3 y 4 del documento de Estado del Arte y sus respectivos artículos relacionados\(Anexo 1\)](#))

2.3. Conclusión

Resumiendo, el informe de *Estado del Arte* presenta un desarrollo bastante extenso y detallado de todos los temas que se consideraron apropiados o aplicables en las etapas posteriores del proyecto. Muchos de estos temas fueron efectivamente llevados a una implementación real, mientras que otros fueron dejados de lado por diversos motivos,

pero no se descarta su puesta en práctica en un futuro. Aquellos temas que fueron considerados como factibles de ser implementados se presentan en la [Sección 3](#) (*Definición del Problema*).

Al final del informe de Estado del Arte, se presenta un Anexo de Referencias en el cual figuran los datos de las fuentes bibliográficas de donde se obtuvo el material que fue de utilidad para el desarrollo del proyecto, así como el material que fue seleccionado y analizado pero que no proporcionó información trascendente al mismo.

Estas referencias se encuentran ordenadas en forma descendente de importancia. En el caso de tratarse de direcciones Web, se presenta dicha dirección junto con la fecha en que se accedió por última vez a la misma.

3. Definición del problema

Posteriormente a la etapa de investigación, se pasó a una etapa en la cual deberían definirse cuales serían los problemas a resolver. En esta etapa se desarrolló un conjunto de propuestas para los problemas que se decidieron resolver, (*Véase el Documento de Propuesta (Anexo 2)*) que fue presentada para su aprobación por ambos tutores. Luego de dicha aprobación, teníamos los problemas para los cuales efectivamente se realizaría una implementación de soluciones. Los problemas y soluciones presentados en la propuesta, son aquellos que consideramos problemas clásicos debido a que son los que en la práctica se presentan con más frecuencia según nuestro criterio, y en muchos casos fue necesario una adaptación de los métodos seleccionados para extenderlos a los problemas que se deseaban resolver. Otro criterio de selección al presentar la propuesta fue la complejidad de los métodos de solución teniendo en cuenta los tiempos que se debían manejar para el largo del proyecto.

A continuación se presentan los problemas que se atacaron durante el transcurso del proyecto. Se detallan los problemas y sus características junto con las soluciones aplicadas a cada uno de ellos.

3.1. **MODELOS DE INVENTARIOS DE UN SOLO ARTÍCULO**

Como vimos antes el documento, existen varias formas de clasificar los modelos de inventarios (por el tipo de demanda, por el tipo de revisión, etc.) pero consideramos que debemos diferenciar primeramente por el tipo de revisión que se desea realizar (*Revisión Continua** y *Revisión Periódica**) y luego diferenciar por la forma en que es conocida la demanda (*Demanda Determinística** y *Demanda Probabilística**).

Otra división importante es el horizonte de planeamiento, es decir, durante cuanto tiempo se utilizará la *política de inventario**. El caso más estudiado es de horizonte de planeación finito. Aquí a su vez existen dos casos: *un solo período* o *varios períodos**.

Otras características que permiten dividir los problemas de inventarios son si se permiten faltantes, y si hay descuentos por cantidad.

Decimos que hay **faltantes** cuando la cantidad de un artículo no es suficiente para satisfacer la demanda en un momento dado. Esta demanda puede o no ser satisfecha después (*satisfacción tardía de la demanda*). Cuando el modelo **permite faltantes**, entonces puede darse el caso que en el plan determinado la cantidad de artículo no sea suficiente para satisfacer la demanda en un momento de tiempo dado.

Los **descuentos por cantidad** hacen referencia a una de las características de economía de escala, la cual establece que cuando mayor es la cantidad a ordenar o producir, entonces disminuye el costo unitario del artículo (función de costos cóncavos). Si el modelo admite descuentos por cantidad, entonces esto deber ser tenido en cuenta la hora de hallar el plan de costo mínimo.

3.1.1. Modelos de Revisión Continua

3.1.1.1. Demanda Determinística

En todos los casos presentados a continuación se supone que la información de la demanda dada es precisa, y que no hay variaciones de la misma durante el plan a determinar.

3.1.1.1.1. No se permiten Faltantes y Sin Descuentos por Cantidad

Descripción:

En este problema se tiene un inventario que corresponde a un único artículo cuya *demanda es determinística* (a). No se permiten *faltantes* y se considera que el *tiempo de entrega* es determinístico y conocido. Existe un *costo de preparación* fijo (K) por realizar una *orden* independientemente de la cantidad pedida (Q), un *costo por unidad* (c) comprada o producida que es constante e independiente de la cantidad pedida (Q) y un *costo de mantenimiento o almacenaje* (h) que también es conocido.

Solución:

Para esta situación se aplicará el modelo del lote económico (EOQ) [1.1] donde no se permiten faltantes, esto es, con el costo de preparación, el costo por unidad comprada o producida y el costo de almacenaje se calcula el *costo por unidad de tiempo*.

$$\frac{aK}{Q} + ac + \frac{hQ}{2} \quad [1.2]$$

Teniendo la función de costos, se deriva la misma con respecto a la cantidad a producir para obtener el mínimo costo.

Por ultimo calculamos el *punto de reorden* en el cuál se debe colocar la orden para que el mismo llegue cuando el inventario es cero.

3.1.1.1.2. Se permiten Faltantes y Sin Descuentos por Cantidad

Descripción:

En este caso estamos frente al problema EOQ [1.1] clásico (caso anterior) pero ahora se permite que existan *faltantes*, esto es, demanda que no puede ser satisfecha porque supera al inventario disponible y debe ser satisfecha por una orden posterior. Por esta razón se introduce una nueva variable que es el *costo por faltantes* (p).

Al tener demanda insatisfecha se puede suponer que al principio de un periodo se cuenta con una cantidad negativa de productos, por lo tanto en

este método se debe considerar la cantidad de productos al principio del periodo (S).

Solución:

Con el costo de preparación, el costo por unidad comprada o producida, el costo de almacenaje y el costo por faltantes se calcula el *costo por unidad de tiempo*.

$$\frac{aK}{Q} + ac + \frac{hS^2}{2Q} + \frac{pQ + S^2}{2Q} \quad [1.3]$$

Teniendo la función de costos, se deriva la misma con respecto a la cantidad a producir para obtener el mínimo costo.

3.1.1.1.3. No se permiten Faltantes y Con Descuentos por Cantidad

Descripción:

Se trata del mismo problema del punto anterior pero ahora cuando se realiza la compra de nuevos artículos se considera que el *costo unitario** de los mismos depende de la cantidad que se vaya a comprar; en general, cuanto mayor sea la cantidad comprada, menor será el precio unitario. Esto es lo que se definió como *descuentos por cantidad**.

Solución:

De la misma manera que en el caso del lote económico (EOQ) [1.1] que no permitía faltantes, se hallará la función de costos asociada a cada franja de precios según la cantidad, lo que nos da como resultado una familia de funciones de costos.

$$T_j = \frac{aK}{Q} + ac_j + \frac{hQ}{2} \quad [1.4] \quad \text{donde } j \text{ varía en las franjas de descuento}$$

Pro ejemplo: $j = 1$ para cantidades menores a 10.000
 $j = 2$ para cantidades entre 10.000 y 25.000
 $j = 3$ para cantidades mayores a 25.000

Luego para hallar la cantidad óptima se deben calcular, para cada intervalo, la cantidad que minimice los costos mediante el método empleado en el modelo EOQ anterior y optar por la cantidad cuyo costo asociado sea mínimo.

Luego calculamos el *Tiempo entre Pedidos**, también mediante la fórmula del método EOQ y el *punto de reorden**.

3.1.1.2. Demanda Estocástica Conocida

Existen casos en que la fluctuación de la demanda fluctúa de tal forma que puede ser vista como una función de distribución de probabilidad conocida. La demanda en un determinado momento de tiempo se calcula mediante esta función de probabilidad conocida

3.1.1.2.1. Modelo de un período

Descripción:

Este modelo es propuesto para resolver los problemas de inventarios de un solo *periodo*^{*}, esto puede ser útil para casos en que los artículos son perecederos. Se considera que la *demanda*^{*} de los artículos es probabilística y colocar una *orden*^{*} ocasiona un costo. También se contempla que los costos de *almacenaje*^{*} y *faltantes*^{*} son lineales y que puede existir un *inventario inicial*^{*}.

Solución:

Con el *costo de preparación*^{*} (K), el *costo por unidad comprada o producida*^{*} (c), el *costo de mantener en inventario*^{*} (h) y el *costo por faltantes*^{*} (p) se calcula la función de costos.

El costo de ordenar hasta y unidades es:

$$\begin{aligned} K + c(y - x) + L(y) & \text{ si } y > x \\ L(x) & \text{ si } y = x \end{aligned} \quad [1.5]$$

donde $L(y)$ es la función de costos de almacenaje y faltantes:

$$L(y) = \int_y^{\infty} p f_D(d) dd + \int_0^y h y f_D(d) dd$$

Donde f_D es la función de densidad de la demanda

Luego se aplica una política (s, S) [1.4] en base a la función de costos calculada anteriormente y se minimiza la misma con respecto a la cantidad a producir para obtener el mínimo costo (cantidad óptima a producir).

Debido a la complejidad de los cálculos para una función de densidad cualquiera, se resolvió el caso en que la distribución de la demanda es **exponencial**.

3.1.1.2.2. Modelos de varios períodos con cumplimiento tardío de la demanda insatisfecha

Descripción:

En este modelo se considera la existencia de un *tiempo de entrega** fijo antes de recibir la *orden**. También se toma en cuenta la existencia de *costos de almacenamiento** y *faltantes** lineales. Este método puede aplicarse para los casos en que se supone que la *demanda insatisfecha** se cumplirá en cuanto se reciba la orden (se surtirán los faltantes),

Solución:

Se considera una política de inventarios (s, S) [1.4], esto es, cuando el *nivel de inventario** alcanza un punto s se realiza una orden para alcanzar otro nivel de inventario S. Con el *costo por unidad comprada o producida** (c), el costo de mantener en inventario (h) y el costo por faltantes (p) se calcula la función de costos.

$$C(Q, s) = E(OC) + E(HC) + E(SC) \quad [1.6]$$

donde

$$E(OC) = K \cdot c \cdot Q \cdot \frac{a}{Q} \quad \text{costo de ordenar de cada ciclo multiplicado por la cantidad de ciclos por unidad de tiempo}$$

$$E(HC) = \frac{hQ}{a} \cdot \frac{Q}{2} \cdot s \cdot a \cdot \frac{a}{Q} \quad \text{costo de mantener el inventario por el largo de ciclo multiplicado por la cantidad promedio de inventario por unidad de tiempo}$$

$$E(SC) = \int_s^{\infty} p \cdot f(s) \cdot s \cdot d \cdot \frac{a}{Q} \quad \text{costo esperado por faltantes multiplicado por el número esperado de ciclos por unidad de tiempo}$$

$E(OC)$ costo esperado de ordenar por unidad de tiempo
 $E(HC)$ costo esperado de mantener e inventario por unidad de tiempo

$E(SC)$ costo esperado por faltantes por unidad de tiempo

$E(D)$ tasa media de la demanda

$$E(D) = a$$

τ tiempo de entrega fijo

D demanda de artículos durante el tiempo τ

$f_D(\tau)$ función de densidad de la demanda

a número de artículos ordenados por unidad de tiempo

Cuando tenemos la función de costos es necesario encontrar la cantidad óptima a ordenar y el *punto de reorden* s^* . Al derivar la función de costos con respecto a estas dos variables no quedan dos ecuaciones que no se pueden resolver simultáneamente, por lo tanto se aplica el siguiente algoritmo iterativo para llegar a dichos valores:

1. Se toma $p = 0$ y se obtiene el valor de Q de la ecuación (1)
2. Con el valor de Q del paso 1 se despeja s de la ecuación (2)
3. Con el valor de s del paso 2 se obtiene un nuevo valor de Q de la ecuación (1)
4. Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los valores sucesivos de Q y s sean suficientemente cercanos.

donde

$$Q^* = \sqrt{\frac{2a\gamma k + p\gamma s^* D}{h}} \quad (1) \quad [1.6]$$

$$\gamma_D \gamma d \gamma \frac{hQ^*}{pa} \quad (2) \quad [1.6]$$

Debido a la complejidad para el caso de una función de densidad cualquiera, se resolvió el caso en que la distribución de la demanda es *exponencial o uniforme*.

3.1.1.2.3. Modelos de varios períodos sin cumplimiento tardío de la demanda insatisfecha

Descripción:

Este modelo es parecido al anterior, la diferencia radica en que ahora se considera que la *demanda insatisfecha* s^* se supone perdida (no se surte más tarde). Por esto se incluirá un *costo por el ingreso perdido* (p) en los costos de penalización de la demanda insatisfecha.

Solución:

En este caso también se considera una política de inventarios (s, S) [1.4]. Con el *costo por unidad comprada o producida* (c) , el *costo de mantener en inventario* (h) y el costo de penalización por *faltantes* (p) se calcula la función de costos.

$$C(Q, s) = E(OC) + E(HC) + E(SC) \quad [1.6]$$

Los costos $E(OC)$ y $E(SC)$ son los mismos que en el caso anterior, el único costo que cambia es $E(HC)$ ya que en el caso en que no se admiten faltantes se tiene un nivel esperado de inventario durante el ciclo mayor que en el caso que permite faltantes en una cantidad igual al número esperado de faltantes, por lo tanto tenemos que:

$$E(HC) = h \frac{Q}{2} + s \left(a - \frac{Q}{s} \right) \frac{Q}{D} \quad [1.7]$$

Cuando tenemos la función de costos es necesario encontrar la cantidad óptima a ordenar y el *punto de reorden**. Al derivar la función de costos con respecto a estas dos variables no quedan dos ecuaciones que no se pueden resolver simultáneamente, por lo tanto se aplica el siguiente algoritmo iterativo para llegar a dichos valores:

1. Se toma $p = 0$ y se obtiene el valor de Q de la ecuación (3)
2. Con el valor de Q del paso 1 se despeja s de la ecuación (4)
3. Con el valor de s del paso 2 se obtiene un nuevo valor de Q de la ecuación (3).
4. Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los valores sucesivos de Q y s sean suficientemente cercanos.

donde:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2a \left(k + p \frac{Q^*}{s^*} \right) \frac{Q^*}{D}}{h}} \quad (3) \quad [1.7]$$

$$\frac{Q^*}{s^*} = \frac{hQ^*}{hQ^* + pa} \quad (4) \quad [1.7]$$

Debido a la complejidad para el caso de una función de densidad cualquiera, se resolvió el caso en que la distribución de la demanda es *exponencial o uniforme*.

3.1.1.3. Demanda Estocástica Estimada

En muchas ocasiones, nos enfrentamos a demandas probabilísticas en que la distribución de probabilidad no se conoce. En estos casos, resulta más eficiente manejar valores aproximados que ajustar una distribución de probabilidad a la realidad.

3.1.1.3.1. No se permiten faltantes y Sin Descuentos por Cantidad

Descripción:

En las condiciones anteriores, se necesitará una estimación de la demanda promedio por período y una estimación de la desviación estándar de la demanda. Debido a que nos manejamos con estimaciones, con seguridad ocurrirá que para ciertos períodos, la demanda variará de forma importante de su promedio, por lo que pueden producirse faltantes; la forma de solucionar estos problemas es mantener existencias de seguridad (artículos extra en inventario) que permitan cumplir con un nivel de servicio predefinido.

Como este modelo trabaja en base a promedios y estimaciones, evidentemente no devuelve la política óptima, sin embargo se ha demostrado en la práctica que sus resultados son muy satisfactorios [2.2].

Solución:

Con las estimaciones de la demanda promedio se calcularán aplicando el modelo EOQ * clásico cual es la cantidad a ordenar y el punto de reorden.

Dada la demanda promedio y su desviación estándar, se calcularan la media y la desviación estándar durante el tiempo de entrega.

Teniendo en cuenta el nivel de servicio deseado, y con la ayuda de la Distribución Normal se calcularan cuales deben ser las existencias de seguridad para cumplir este nivel de servicio. Con el nivel de existencias de seguridad y el punto de nuevos pedidos, obtener el nuevo punto de nuevos pedidos.

3.1.2. Modelos de Revisión Periódica

3.1.2.1. Demanda Determinística Variable

Características del Modelo

La característica fundamental de estos modelos, es que la revisión del inventario se realiza cada cierta cantidad de unidades de tiempo constantes conocidas. Para cada período, de una serie finita $1, \dots, T$ con $T > 0$ se conoce la demanda, los costos de ordenar y el costo de mantener en inventario un artículo.

Otra característica importante es que las mediciones se realizan al comienzo de cada período, esto quiere decir que las actividades a llevar a cabo se realizan al principio del período y se asumen instantáneas, o sea el consumo y la producción son actividades instantáneas, y el nivel de inventario en un período queda determinado al comienzo del mismo.

El modelo, denominado *Problema del Lote Económico*, $ELSP^*$ de sus siglas en inglés, en su forma básica tiene la siguiente forma [11.1]:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i(x_i) + h_i(y_i)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} y_0 = y_n &= 0 \\ x_i &\geq 0 && \text{para } 0 \leq i \leq 1 \\ y_i &\geq 0 && \text{para } 0 \leq i \leq 1 \\ y_{i-1} + x_i &= d_i + y_i && \text{para } 0 \leq i \leq 1 \end{aligned}$$

En donde:

- ? d_i : La demanda durante el período i
- ? $c_i(x)$: El costo de producir x unidades en el período i
- ? $h_i(y)$: El costo de mantener en inventario y unidades desde el período $i-1$ hasta el período i
- ? x_i : La cantidad producida durante el período i
- ? y_i : El nivel de inventario desde el período $i-1$ hasta el i

Si las funciones $c_i()$ y $h_i()$ son arbitrarias, entonces el problema anterior es *NP-duro*^{*}, como demostraron Florian-Lenstra-Kan [11.1]. En vista de estas dificultades, se realizan asunciones sobre estas funciones para relajar el problema y obtener soluciones polinomiales. Algunas de estas relajaciones se describen en [11].

Otro modelo de importancia pero que por razones de tiempo y de complejidad quedó fuera del alcance del proyecto, es el modelo de $ELSP^*$ con *backlogging*^{*}, o sea donde se permite satisfacer la demanda de un período i , en un período k , con $k > i$ [11.2].

Las propuestas de solución que se implementaron en el presente proyecto se dividen en:

- ? Óptimas
- ? Heurísticas

Las políticas que aportan una solución óptima son aquellas que devuelven un plan de ordenamiento de costo total mínimo.

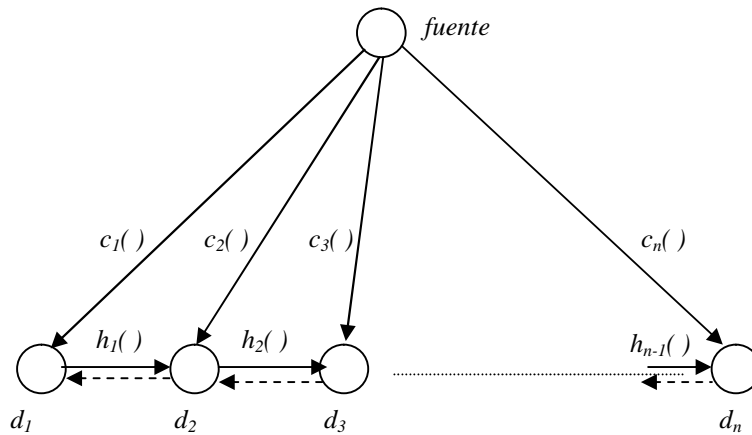
Los métodos heurísticos dan como resultados planes de ordenamiento de forma rápida y sencilla, que de acuerdo a la característica en que está basado el heurístico y a los valores del sistema, pueden o no estar muy próximos al óptimo.

La elección de un método heurístico contra uno óptimo se debe a dos causas principales:

1. Tiempo de cálculo: El problema de inventarios en su representación más general denominado $ELSP$ (*Economic Lot-Sizing Problem*) [11] está modelado mediante una red de flujo

dirigida, en donde sus nodos simbolizan períodos y sus aristas representan distintos costos involucrados. Las soluciones de este modelo general se encuentran dentro de la clase de problemas NP-duros [11.1]. Por lo tanto para hallar soluciones más eficientes es necesario realizar ciertas restricciones al modelo. Si bien los métodos de solución óptima generalmente se apoyan en estilos de programación dinámica sobre simplificaciones del modelo original, igualmente requieren de un tiempo de cálculo considerable ($O(n^k)$, $k \geq 2$ [11.2]).

2. Estacionalidad a los cambios: los métodos de soluciones óptimas dependen mucho de los valores de la demanda, valores de costos y otros parámetros, por lo cual, un pequeño cambio en uno de ellos produce grandes cambios en el plan resultado. Los heurísticos se adaptan mejor a los cambios.



Formulación de Zangwill del ELSP como red de flujos dirigida [11.1].

El grafo consiste de un nodo fuente capaz de generar un flujo de salida de $\sum_{i=1}^n d_i$ y n nodos, tal que el nodo i requiere un flujo de entrada de d_i unidades.

Soluciones Óptimas

3.1.2.1.1. Solución Óptima - Algoritmo de Wagner-Whitin

Descripción:

Este método considera un costo fijo o de preparación por realizar un pedido independientemente de la cantidad producida u ordenada, y los costos de producción (o de ordenar) y los de inventarios son *funciones cóncavas** conocidas. El inventario inicial, al igual que el final, se suponen nulos.

Este método es el que brinda un plan de ordenamiento óptimo, o sea de costo mínimo.

Solución:

Es un algoritmo de programación dinámica mejorado en base al Teorema de Wagner - Whitin [4.3] que afirma que una política óptima se caracteriza por producir u ordenar solo cuando el inventario es cero. Esta propiedad reduce en gran medida las posibilidades del algoritmo de programación dinámica.

El algoritmo original exige además que los costos de producir y de mantener en inventario sean *funciones cóncavas**, lo que significa que los costos decaen al aumentar el tiempo o la cantidad de artículo, lo cual es una característica de las *Economías de Escala** [4.3]. En la implementación realizada los costos son de la forma: $C(x) = C_i \cdot x$, donde C_i es una constante positiva, para cada período i y x es la cantidad producida ó el nivel de inventario, según la función. ([Ver Documento de Análisis de Requerimientos, Anexo 3](#))

Soluciones Aproximadas

A veces, como ya se mencionó, es mejor utilizar un método heurístico para determinar un plan de ordenamiento, ya sea por razones de tiempo de ejecución o porque el sistema es muy variable con respecto a las demandas y los costos en cada período.

Los siguientes son una serie de heurísticos implementados como alternativas al método óptimo de Wagner-Whitin. Estos mismos heurísticos, son muy utilizados en la metodología MRP, como se verá más adelante.

Para todos los casos presentados se asume que las funciones de costo de mantener en inventario y de producción son de la forma $C(x) = C_i \cdot x$, donde C_i es una constante positiva, para cada período i y x es la cantidad producida ó el nivel de inventario. ([Ver Documento de Análisis de Requerimientos, Anexo 3](#))

3.1.2.1.2. Heurístico de Silver-Meal

El método de Silver-Meal [10] determina el número de períodos para los cuales se acumulara la demanda, a incluir en una orden liberada en un período.

El heurístico balancea el costo fijo de ordenar y el costo constante de mantener, para brindar una aproximación al plan de ordenamiento óptimo. Los períodos en los cuales son liberadas las ordenes, se denominan períodos de decisión. Al comienzo, el primer período es de decisión, los demás períodos de decisión los determina el procedimiento de calculo.

En general, el procedimiento consiste en comenzar con el primer período de decisión (que comenzará siendo el primer período), calculando el

costo total de una orden usando solamente la demanda para ese período. Para este período el costo total será igual al *costo fijo de ordenar*.

Posteriormente, se calcula el costo promedio del período, que resulta de incluir en la orden la demanda del período siguiente. Incluimos la demanda de este período si el costo promedio es decreciente. En caso contrario se considera este último período como nuevo período de decisión.

Este proceso se repite para todos los períodos considerados.

3.1.2.1.3. Método de Tamaño de Lote Fijo (LFS)

La idea del método LFS [3] este método consiste en ordenar la misma cantidad siempre que el nivel de inventario y la demanda de los períodos subsiguientes así lo indiquen.

3.1.2.1.4. Método de Lote por Lote (L4L)

Consiste en ordenar al comienzo de cada período lo que es necesario actualmente (en ese período), teniendo en cuenta el tiempo de entrega. Esto produce un inventario nulo (no se mantienen artículos en stock) pero seguramente se incurre en una mayor cantidad de pedidos, que puede o no convenir según los costos del problema [3].

3.1.2.1.5. Método de Menor Costo Unitario (LUC)

Este método se basa en la idea de acumular la demanda de los períodos sucesivos desde el período j hasta el k siempre y cuando el precio por unidad del período k sea el menor entre los períodos j, \dots, k, \dots, m . [3]

3.1.2.1.6. Método de Menor Costo Total (LTC)

Este método se basa en la estrategia de acumular la demanda de los períodos hasta que la suma de los costos de inventario sea próxima al costo fijo de ordenar [3]

3.1.2.1.7. Método de Balance de Períodos (PPB)

Este método consiste en acumular la demanda de períodos sucesivos, mientras se cumpla la siguiente condición:

Dado el valor $EPP = K / H$, donde EPP es conocido como la parte económica periódica, K es el costo fijo de ordenar, y H es el costo de mantener en stock una unidad por período; entonces en una orden liberada en el período j incluimos la demanda de los períodos $j + 1, \dots, j + k$ siempre y cuando el EPP acumulado sea menor o igual al EPP calculado [3].

3.1.2.2. Demanda Probabilística

3.1.2.2.1. Modelo de varios períodos sin costo de preparación

Descripción:

Con este modelo se pretende atacar la situación en que se tienen n periodos. En este caso el inventario que queda al final de último periodo se puede vender al mismo costo de compra (c). La demanda de los artículos es probabilística y los costos de almacenaje y faltantes son lineales y puede existir un inventario inicial.

En este método, se considera que los *costos por faltantes* (p) y el *costo de almacenaje* (h) son lineales y se obtiene la siguiente función de costo:

Solución:

El problema es encontrar el valor que minimice los costos en cada período. El valor del período $i + 1$ depende del valor del período i , por lo cual se torna extremadamente costoso el cálculo exacto. Por ello, se utiliza el método en que se consideran infinitos períodos (se toman decisiones indefinidamente), en el cual la solución se calcula para un único valor.

Con el *costo por unidad comprada* o producida, el costo de mantenimiento en inventario y el costo por faltantes se calcula la siguiente función de costos.

$$C(y^0) = \frac{p + c + h}{p + h} \quad [1.8]$$

donde:

α es el factor de descuento

$f(x)$ es la función de distribución de probabilidad de la demanda

Para encontrar una política bastante cercana a la óptima global se minimizó (con respecto a la cantidad a producir) esta función de costos, en vez de plantear un algoritmo recursivo extremadamente complejo para hallar el óptimo global. Además se incluyó un factor de descuento que amortigua el costo de producción.

3.1.2.3. Demanda Probabilística Estimada

3.1.2.3.1. No se permiten faltantes y Sin Descuentos por Cantidad

Descripción:

Cuando la distribución de probabilidad no se conoce con certeza, resulta más eficiente manejar valores aproximados que ajustar una distribución de probabilidad a la realidad. En estas condiciones, se necesitará una estimación de la demanda promedio por período y una estimación de la desviación estándar de la demanda.

Como este modelo trabaja en base a promedios y estimaciones, la política resultante no es necesariamente óptima, pero suele dar buenos resultados [2.3].

Solución:

Con las estimaciones de la demanda promedio se calcularán aplicando el modelo EOQ clásico cual es la cantidad a ordenar y el punto de reorden. Dada la demanda promedio y su desviación estándar, se calcularan la media y la desviación estándar durante el tiempo de entrega.

Teniendo en cuenta el nivel de servicio deseado (con que probabilidad se desea satisfacer la demanda), y con la ayuda de la Distribución Normal se calcularan cual es la cantidad a ordenar para cumplir con el nivel de servicio deseado.

Por más detalle sobre Inventarios de un Artículo, referirse al punto 2.2 del Documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3) y al punto 1 del Documento de Estado del Arte (Anexo 1)

3.2. MODELO DE INVENTARIO DE VARIOS ARTÍCULOS

Los inventarios de varios artículos se pueden dividir en dos clases o tipos de inventario: los de demanda dependiente o los de demanda independiente. Los primeros obviamente son los más interesantes y los más complejos desde el punto de vista de su modelización. Los de demanda independiente pueden analizarse como n problemas de inventario, en donde n es la cantidad de artículos, agregando las restricciones específicas del caso, como por ejemplo la limitación de espacio del depósito de almacenamiento común.

En el caso de la demanda dependiente, es necesario contar con información de cómo es esta relación, que permita determinar la demanda de los artículos que dependen de la demanda de otros. Esta información esta en lo que se conoce como Lista de Materiales, o *BOM** por sus iniciales en inglés. Dicha estructura contiene la relación de cantidad entre un artículo y sus componentes. Debido a esta relación de dependencia suelen dividirse los artículos (ítems) en dos categorías no excluyentes: *finales* y *componentes*. Para los finales existe una demanda prefijada (denominada comúnmente demanda externa), para los componentes, la demanda es calculada o más bien actualizada después que se conoce el plan del artículo final del cual el

primero es componente. Esta relación de dependencia genera además lo que se conoce como *nivel* de un artículo o ítem. Diremos que un artículo está en un nivel k , si todos los artículos de los cuales él es un componente, están en un nivel j , con $j < k$. Esto significa que los artículos dentro de un mismo nivel son independientes entre sí, y que se puede llevar a cabo entonces un análisis en conjunto de los mismos.

En este proyecto se considera como solución al problema de inventario de varios artículos dependientes la metodología de MRP^* [3], o en español Plan de Requerimiento de Materiales, la cual es una política de revisión periódica determinística, cuyo objetivo es determinar un plan para cada uno de los artículos de forma de satisfacer la demanda de cada período (conocida), basándose en la información de la Lista de Materiales y la demanda de los artículos finales.

Para el caso de varios artículos independientes se presentará un modelo para cuando los artículos comparten un único depósito de almacenamiento con un volumen limitado [4.2].

Obsérvese que el caso de varios artículos independientes, sin ninguna restricción extra, se puede solucionar determinando un plan para cada uno de los artículos, aplicando una de las políticas vistas en el caso de problemas de inventario de un solo artículo a cada uno por separado.

3.2.1. Modelo de varios artículos dependientes

El método implementado intenta obtener un plan de ordenamiento (producción) para cada uno de los artículos considerados que satisfaga la demanda de cada uno de los períodos. El método empleado para obtener dicho conjunto de planes se conoce como Plan de Requerimiento de Materiales o MRP^* de sus siglas en inglés.

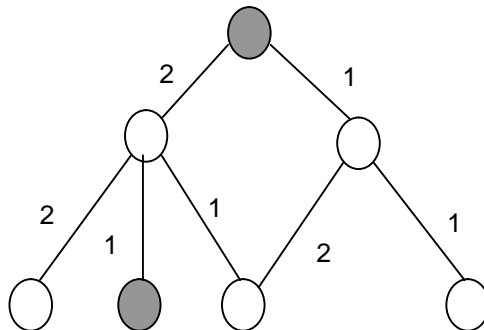
El cálculo de MRP desarrollado en este proyecto se basa en los tres siguientes pasos básicos:

1. Tomar un ítem de la Lista de Materiales, en orden creciente de nivel y adecuar la demanda según la información de inventario inicial y de recepciones asignadas al artículo.
2. Determinar el plan para el ítem dado, utilizando una de las políticas de inventario de revisión periódica.
3. Recalcular o actualizar la demanda para todos los componentes del artículo considerado, según el plan determinado en el paso anterior y el BOM^* .

Para el paso 1 hacemos uso del BOM, que nos da la información sobre las relaciones de dependencia entre los artículos, y vamos procesando cada uno de los artículos del mismo en orden ascendente de nivel. Esto nos asegura que contamos con la información precisa para el artículo, porque ya se han procesado los artículos que él compone.

Después de haber corregido la demanda con la cantidad de inventario inicial y las recepciones arbitrarias, en el paso 2 aplicamos la política de revisión periódica elegida (L4L, LTC, Silver-Meal, Wagner-Whitin, etc.) para determinar el plan de ordenamiento y el costo del mismo.

Como último paso del proceso es necesario actualizar la demanda de los componentes de este artículo, ya que esto solo se puede hacer después de determinado el plan para el mismo. Notar que puede haber artículos en el BOM que no requieran ningún componente, en este caso se obvia este paso [3].



Una posible representación de Lista de Materiales, donde cada nodo representa una artículo, y las aristas representan la relación de dependencia entre ellos. Los nodos grises representan artículos finales

3.2.2. Artículos que comparten espacio de almacenamiento

Existen casos en que los distintos artículos que están en inventario tienen una relación independiente (la demanda de unos no afecta la demanda otros), pero los mismos pueden estar sujetos a restricciones de espacio de almacenamiento. Supongamos un depósito de capacidad V donde los artículos son almacenados hasta su utilización. Si cada producto i tiene un volumen de v_i , se debe cumplir la restricción que $q_1v_1 + q_2v_2 + \dots + q_nv_n \leq V$, en donde q_i es la cantidad a ordenar o producir del artículo. Esto indudablemente introduce una nueva condición al cálculo de plan de ordenamiento.

La solución a este problema se basa en obtener una expresión de los costos general para cada uno de los artículos mediante el método EOQ y formular un problema de programación no-lineal, con función objetivo igual a la sumatoria de las formulaciones EOQ para cada artículo, con la restricción de que la suma de los volúmenes involucrados sea menor o igual al volumen de almacenamiento, el cual se supone mayor o igual a cero.

Para solucionar este problema de programación no-lineal se decide usar el método clásico de relajación de Lagrange [4.2].

Utilizando el método de Lagrange se obtiene un sistema de dos ecuaciones, donde la cantidad óptima a ordenar q_i^* de cada artículo i nos queda dependiente del multiplicador de Lagrange $\lambda < 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} q_i^* = \sqrt{\frac{2d_i K_i}{h_i + \lambda v_i}} \\ Q = \sum_{i=1}^n v_i q_i \leq 0 \end{array} \right.$$

Donde:

- d_i : demanda del artículo i
- K_i : costo fijo de ordenar del artículo i
- h_i : costo de inventario por el artículo i
- v_i : volumen unitario del artículo i
- Q : espacio de almacenamiento

El valor de Q se obtiene mediante la técnica de ensayo y error. De esta manera se obtienen valores provisionales de q_i^* hasta que los valores de Q y de q_i^* satisfagan las ecuaciones del problema de Lagrange.

Para determinar cuando es necesario ordenar cada artículo simplemente se divide la cantidad q_i^* entre el valor de la demanda constante, y luego se le resta el tiempo de entrega (se asume que el tiempo de entrega es menor al tiempo de reorden).

Por más detalle sobre Inventarios de Varios Artículos, referirse al punto 2.3 del Documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3) y al punto 3 del Documento de Estado del Ate (Anexo 1)

3.3. MODELO DE INVENTARIO CON REMANUFACTURACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL

En la vida real, existen modelos de inventarios en los cuales los artículos tienen un ciclo de vida en vez de tener una vida lineal acotada. Con esto nos referimos a los casos en que el artículo luego de ser fabricado, vuelve a la fábrica con la posibilidad de ser reparado para ser utilizado nuevamente en vez de simplemente ser consumido por el comprador final y luego desechado. Esto no significa que eventualmente, luego de varias reutilizaciones o reparaciones, los productos deberán ser descartados definitivamente.

En este tipo de modelos se manejan dos conceptos importantes:

1. Remanufacturación
2. Disposición Final

La **Remanufacturación** es la actividad llevada a cabo con los productos usados que son retornados a la fábrica para su reacondicionamiento, después de lo cual pueden ser brindados nuevamente a los clientes como si fueran productos nuevos.

Hablamos de **Disposición Final** cuando el producto usado que regresa a la fábrica debe ser descartado definitivamente, o cuando el cliente asume la responsabilidad de descharlo.

Con este nuevo concepto de remanufacturación surgen una serie de factores que no estaban presentes en los modelos clásicos de inventarios, dentro de los cuales uno de los más importantes es el **Impacto Ecológico**. Dado que ahora existen productos que serán descartados, es evidente que descharlos conlleva un problema ambiental, que puede agravarse dependiendo del tipo de productos que estemos considerando, además de incurrirse en un costo extra de disposición.

Método EOQ con Remanufacturación y Disposición Final

El modelo que se presenta a continuación es un modelo basado en un problema de inventario de revisión continua, de un artículo, con demanda conocida, donde no se permiten faltantes y no hay descuentos por cantidad, el tiempo de entrega es instantáneo y el inventario inicial es nulo.

El problema de remanufactura y disposición final a resolver esta basado en las siguientes asunciones [6]:

Existe un comercio que abastece un determinado artículo a otro comercio a una tasa de demanda constante por unidad de tiempo. Los artículos entregados pueden ser nuevos o reparados, el segundo comercio no puede distinguir si los artículos entregados son reparados o nuevos.

Los artículos son usados y recolectados en el segundo comercio, de acuerdo a una tasa constante α . Los otros artículos son inmediatamente desechados con una tasa constante $\beta = 1 - \alpha$. Al final de un cierto tiempo T los productos usados son devueltos al primer comercio, donde serán recolectados y posiblemente reparados. El objetivo de la solución es determinar cual es la tasa óptima α de disposición final, o si es dada esta α , determinar los valores que determinan el plan de costo mínimo para esta tasa de disposición.

Los componentes del problema son los siguientes:

- ? Costo fijo de reparación $r > 0$.
- ? Costo fijo de manufacturación $s > 0$.
- ? Costo unitario de manufacturación $b > 0$.
- ? Costo unitario de reparación $k > 0$.
- ? Costo unitario de disposición final unitario e ? ($-\alpha, +\alpha$).
- ? Costo unitario de mantenimiento por unidad de tiempo de los artículos almacenados en el primer comercio $h > 0$.
- ? Costo unitario de mantenimiento por unidad de tiempo de los artículos almacenados en el segundo comercio $u > 0$.
- ? Tasa de demanda del segundo comercio $d > 0$.
- ? La tasa de disposición que puede ser dada o a determinar $0 \leq \alpha \leq 1$.

La solución del problema esta compuesta por los siguientes valores:

- ? Cantidad de veces a reparar m .
- ? Cantidad de veces a producir n .
- ? La cantidad a reparar y producir x .
- ? Largo o duración del plan T .
- ? Tasa de disposición α que minimiza los costos, si no fue dada.
- ? Información sobre la incidencia ecológica

El problema es de revisión continua, por lo tanto lo que se devuelve como resultado es cuanto se debe reparar y producir para satisfacer la demanda y cada cuanto tiempo se debe realizar, que esta indicado por el largo o duración del plan.

La cantidad de veces a reparar y a producir indica la cantidad de veces que se ha de llevar a cabo cada una de estas actividades, realizando primero la actividad de reparación hasta que sea necesaria la producción de nuevos artículos para satisfacer la demanda.

La incidencia sobre la ecología es un indicador de si el plan determinado favorece o no la ecología, lo cual quiere decir si hay o no preferencia por reparar contra producir nuevamente.

Como se puede observar el modelo es bastante más complejo que el de revisión continua clásico resuelto mediante EOQ^* , a continuación se ofrece una breve descripción del mismo.

Descripción del Método de EOQ^* con Remanufactura y Disposición Final

Llamemos a la función de EOQ^* con estos agregados G . Esta función esta compuesta por dos costos los de EOQ^* clásicos para el modelo y el de costos por las actividades de remanufactura y disposición final: $G = K + R$. La función R es el componente debido a la remanufactura y disposición final y no presenta mayor problema, pero la función K , que es la función de costos de EOQ^* para el problema, es demasiado compleja como para encontrar una expresión de su valor mínimo, ya que depende de muchos parámetros.

$$G(x, m, n, \theta) = K(x, m, n, \theta) + R(\theta, e)$$

$$K(x, m, n, \theta) = d(mr + ns)/x + \frac{x}{2} \left\{ \theta^2/n + \theta^2/m \right\} h + u\theta + u\theta^2(m-1)/m$$

$$R(\theta, e) = d(\theta(b + e + k) + k)$$

Lo que se hace entonces es una sustitución, que después de algunos pasos, da como resultado una expresión de K en términos de la tasa de disposición θ . El análisis de esta sustitución determina que existen tres subintervalos en (0,1) que son los valores posibles de θ , para las cuales se obtiene una expresión distinta de la función K de costo mínimo, y por lo tanto también de los otros valores a devolver.

$$\theta \in I \quad K_1(\theta) = \sqrt{2d}(\theta \sqrt{r(h + u)} + \sqrt{s(\theta^2 h + \theta u + \theta^2 u)})$$

$$\theta \in J \quad K_2(\theta) = \sqrt{2d(r + s)(h(\theta^2 + \theta^2) + \theta u)}$$

$$\theta \in L \quad K_3(\theta) = \sqrt{2d}(\theta \sqrt{sh} + \sqrt{r(\theta(h + u))})$$

Entonces la función G se puede escribir como $G_i = K_i + R$ con $i = 1, 2, 3$.

Si la tasa de disposición θ es dada entonces lo que debemos hacer es determinar en que región de las determinadas se encuentra, y devolver los valores mínimos para este caso.

Cuando la tasa de disposición θ es requerida la situación es más delicada, ya que deben pedirse que se cumplan ciertas condiciones que permitan asegurar que existe un mínimo en (0,1).

Hasta este momento hemos estado hablando de **estrategias mixtas**, o sea de aquellas soluciones que determinan cantidades a reparar y producir ambas mayores a cero. Existe también lo que se conoce como **estrategias puras**, lo cual quiere decir que se repara todo o se produce todo nuevamente, lo que en términos de la tasa de disposición θ significa que $\theta = 0$ ó $\theta = 1$ respectivamente.

Un resultado del análisis del modelo realizado por Richter es que una de las dos estrategias puras es óptima, o sea que produce un plan de costo mínimo, lo cual significa que si consideramos todo el intervalo cerrado [0,1] para los valores posibles de tasa de disposición, entonces $\theta = 0$ es óptimo, ó $\theta = 1$ es óptimo.

Si bien uno de estos dos casos produce el beneficio económico buscado, las estrategias puras son muchas veces inviables desde el punto de vista tecnológico y ecológico, y por eso se piden condiciones que permitan hallar una solución de costo mínimo en el intervalo abierto (0,1), o sea una tasa de disposición $0 < \theta < 1$.

Otro punto a aclarar es que como la cantidad de veces a reparar y a producir quedan en función de la tasa de disposición α sus valores pueden ser reales y no enteros positivos, lo cual es incorrecto. Para estos casos se dispone de un método que determina los valores enteros que menos impactan en el costo del plan hallado.

$$m = \frac{\alpha}{2} \sqrt{m_R \frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \text{ en donde } m_R \text{ es el valor real}$$

$$n = \frac{\alpha}{2} \sqrt{n_R \frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \text{ en donde } n_R \text{ es el valor real}$$

Como se puede observar el análisis del modelo es complejo. A manera de resumen tenemos que:

- Si la tasa de disposición es dada, entonces obtenemos los valores a devolver según en cual de los tres subintervalos en (0,1) posibles cae este valor de α dado, si $0 < \alpha < 1$.
Si $\alpha = 0$ ó $\alpha = 1$ se usan las expresiones directas de los valores a devolver para cada caso.
- Si la tasa de disposición es requerida, entonces nos fijamos si se desea una de las soluciones puras o una solución mixta. En el caso de la solución pura determinamos cual de las dos, $\alpha = 0$ ó $\alpha = 1$, es la de costo mínimo, y devolvemos los valores correspondientes para el caso. Si la solución debe ser mixta determinamos si se cumplen las condiciones necesarias para que exista un mínimo en (0,1) y devolvemos los valores hallados para el caso, de no ser así devolvemos un plan con valores nulos.

Por más detalle sobre Inventarios con Remanufactura y Disposición Final, referirse al punto 2.4 del Documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3) y al punto 2 del Documento de Estado del Ate (Anexo 1)

3.4. POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO

Se plantea solucionar el problema de hasta cuando mantener una máquina antes de comprar una nueva durante un período conocido de tiempo.

Para ello, se suponen conocidos cuales son los costos de mantenimiento y el costo del equipo nuevo durante todos los períodos del horizonte de planeamiento. De esta forma, se intentan seleccionar cuales son las decisiones a tomar para cada período de tiempo (reemplazar el equipo o mantenerlo) de forma que el costo total al final del horizonte de planeamiento sea mínimo.

Dentro de esta clase de problemas, discriminaremos dos situaciones:

1. El valor de salvamento (o de recuperación) del equipo usado, depende solo del tiempo transcurrido entre la compra y la venta del mismo.

2. El valor de salvamento del equipo usado depende del período de tiempo en que se realice su venta.

En ambos casos se asume que finalizado el horizonte de planeamiento, el equipo se venderá en su valor de recuperación.

3.4.1. Reemplazo de un único equipo

- 3.4.1.1. El valor de recuperación y el precio de compra no cambian durante el tiempo

Solución:

Modelar y solucionar el problema mediante Programación Dinámica. Esta solución consiste en definir una función $g(t)$ como la función de costo durante el horizonte de planeamiento si se compra una máquina nueva en el tiempo t . Sea c_{tx} el costo neto por comprar una máquina en el tiempo t y que funcione hasta el tiempo x (estos costos se calculan en base al precio de un equipo nuevo, el valor de recuperación y los costos de mantenimiento). Si tenemos un horizonte de planeamiento de T períodos, entonces podemos plantear una función de costos que puede ser resuelta como un problema de programación dinámica [9.1]:

$$g(t) = \min. \{c_{tx} + g(x)\} \quad (t = 0, 1, 2, \dots, T-1; t+1 \leq x \leq T) \\ g(T) = 0$$

con

$$c_{tx} = V + m_1 + m_2 + \dots + m_{x-t} - S_{x-t}$$

donde:

- ? V es el costo del nuevo equipo.
- ? m_i es el costo de mantener el equipo durante i períodos.
- ? S_i es el valor de recuperación del equipo, i períodos después de comprado.

- 3.4.1.2. El valor de recuperación y el precio de compra cambian durante el tiempo

Solución:

La forma de solucionar el problema es la misma que en el punto anterior, solo con la diferencia que el cálculo de los costos c_{tx} se realiza de una forma diferente teniendo en cuenta que ahora existen valores que varían en el tiempo.

$$g(t) = \min. \{c_{tx} + g(x)\} \quad (t = 0, 1, 2, \dots, T-1; t+1 \leq x \leq T)$$

$$g(T) = 0$$

con

$$c_{tx} = V_t + m_1 + m_2 + \dots + m_{x-t} - S_t$$

donde:

- ? V_t es el costo de un nuevo equipo en el período t .
- ? m_i es el costo de mantener el equipo durante i períodos.
- ? S_i es el valor de recuperación del equipo en el período i .

3.4.2. Reemplazo de varios equipos

Descripción:

Se trata del mismo problema que en el punto anterior, pero con la diferencia de que en vez de tener un único equipo que mantener, se dispone de varios equipos para los cuales se quiere obtener la política óptima de mantenimiento y reemplazos a nivel global

Solución propuesta:

Modelar el problema como un grafo. Los nodos representan los períodos en el tiempo y las aristas serían todas las posibles combinaciones de mantener o reemplazar los equipos de un período al siguiente (por ejemplo, si consideramos dos equipos, las posibilidades para cada periodo son: mantener ambos equipos, reemplazar ambos equipos o mantener uno y reemplazar el otro) y solucionarlo hallando el Camino de Costo Mínimo entre el nodo que representa el período inicial y el nodo que representa el fin del horizonte de planeación [9.2]. Los costos asociados a las aristas del grafo dependen de los costos de mantenimiento de los equipos, la edad de cada equipo en el período que representa un nivel dado del grafo y el precio de un nuevo equipo en el mercado.

La solución propuesta implica recorridas exhaustivas sobre un grafo que puede llegar a ser de gran tamaño, por lo cual debería ser utilizada en casos no muy grandes.

Por más detalle sobre Políticas de Mantenimiento y Reemplazo, referirse al punto 2.5 del Documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3) y al punto 4 del Documento de Estado del Ate (Anexo 1)

3.5. PRONÓSTICOS

Los pronósticos son técnicas con las que se trata predecir el comportamiento de alguna variable aleatoria de interés.

Se proponen a continuación la resolución de problemas de pronósticos basados en la técnica de *Series de Tiempo* [1.9].

3.5.1. Pronósticos de variables aleatorias con nivel constante

Descripción:

Este es el caso en que la variable aleatoria de interés tiene fluctuaciones aleatorias alrededor de un valor constante.

Solución:

Se propone realizar el pronóstico mediante la utilización del método de *Suavizamiento Exponencial*. Dicho método presenta muchas ventajas sobre otros métodos como el de *Promedio* [1.10] y el de *Promedios Móviles* [1.10]; algunas de ellas son:

1. Utiliza varias muestras (se reduce la varianza).
2. Pondera las observaciones.
3. Asigna un peso superior a las observaciones más recientes (las observaciones más recientes son las que seguramente reflejen mejor el comportamiento futuro de la serie de tiempo).

$$F_{t+1} = \alpha x_t + (1 - \alpha)F_t \quad t > 0$$

$$F_2 = \alpha x_1 + (1 - \alpha)A'$$

donde $0 < \alpha < 1$ se llama *constante de suavizamiento* y A' es una estimación del valor constante A sobre el cual fluctúa la variable.

3.5.2. Pronósticos de variables aleatorias con tendencia lineal

Descripción:

Este es el caso en que la variable aleatoria de interés tiene una tendencia lineal superpuesta con fluctuaciones aleatorias. En general, sirve para pronosticar variables aleatorias con tendencia lineal creciente.

Solución:

El modelo puede representarse como:

$$X_t = A + Bt + e_t$$

donde X_t es la variable aleatoria observada en el tiempo t , A es una constante, B es el factor de tendencia y e_t es el error aleatorio que ocurre en el tiempo t .

Se propone realizar el pronóstico mediante la utilización del método de *Suavizamiento del nivel de la Serie de Tiempo* el cual es un procedimiento parecido al *Suavizamiento Exponencial* pero aquí el valor de la serie de tiempo es corregido por un factor dado por la tendencia lineal [1.11].

Si se usa el valor observado de la serie de tiempo al final del t -ésimo período, x_t , y el nivel de suavizado de la serie de tiempo en el período $t - 1$, S_{t-1} , y el valor de suavizado de la tendencia al final del período $t - 1$, B_{t-1} , el nivel suavizado de la serie de tiempo en el tiempo t está dado por:

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + B_{t-1})$$

A partir del nivel suavizado de la serie de tiempo en el tiempo t , S_t , el nivel de suavizado de la serie de tiempo en el tiempo $t - 1$, S_{t-1} , y el valor suavizado de la tendencia al final del período $t - 1$, B_{t-1} , el valor suavizado de la tendencia al final del período t está dado por

$$B_t = \beta (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)B_{t-1}$$

El pronóstico de la serie de tiempo para los próximos m períodos, $m = 1, 2, \dots$, está dado por

$$F_{t+m} = S_t + mB_t$$

Al igual que en el caso de suavizamiento exponencial para un modelo de nivel constante, se requiere un valor inicial para comenzar el proceso para el modelo de tendencia lineal. Esta inicialización, con frecuencia puede obtenerse ajustando una recta a los datos históricos que puedan disponerse.

Los valores iniciales para comenzar el procedimiento, se obtienen mediante el ajuste de una recta a una serie de datos históricos mediante el método de *Mínimos Cuadrados* [1.14].

3.5.3. Pronósticos de variables aleatorias de nivel constante y efecto estacional

Descripción:

Este es el caso en que la variable aleatoria de interés tiene períodos estacionales superpuestos con fluctuaciones aleatorias. Un ejemplo de esto, puede ser la demanda de ciertos productos dependiendo de la estación del año: la demanda de los refrescos crece en el verano, decae el resto del año para nuevamente volver a crecer al siguiente verano; aquí vemos un claro efecto estacional.

Solución:

Este tipo de problemas puede modelarse de la siguiente forma:

$$X_t = AI_t^* + e_t$$

donde X_t es la variable aleatoria observada en el tiempo t , A es el “valor constante” del modelo, e_t es el error en el tiempo t e I_t^* es el índice o factor estacional en el período t . Tanto A como I_t^* son desconocidos.

Se propone realizar el pronóstico mediante la utilización de un método basado (al igual que los anteriores) en *Suavizamiento Exponencial*. En este método, el pronóstico se va corrigiendo por un *factor estacional* [1.12]. A su vez, los sucesivos pronósticos van teniendo en cuenta su correspondencia con los períodos previos, de forma que por ejemplo el pronóstico de los meses de verano, sea calculado en base a datos históricos de períodos de verano anteriores y no en base a períodos correspondientes a otras estaciones.

Utilizando suavizamiento exponencial para este propósito:

$$S_t = \alpha \frac{x_t}{I_{t,p}} + (1 - \alpha) S_{t-1}$$

$$I_t = \beta \frac{x_t}{S_t} + (1 - \beta) I_{t-p}$$

y el pronóstico para el siguiente período está dado por

$$F_{t+1} = S_t I_{t+p}$$

en donde p es el número de períodos en el ciclo estacional y $0 < \alpha < 1$ es otra constante de suavizamiento y x_t es el valor observado de la serie de tiempo al final del t -ésimo período.

Por más detalle sobre Pronósticos, referirse al punto 2.6 del Documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3) y al punto 5 del Documento de Estado del Ate (Anexo 1)

4. Análisis de Requerimientos

En base a las propuestas realizadas y tomando como requerimientos funcionales cada uno de los problemas planteados y sus soluciones, se plasmó el Documento de Análisis de Requerimientos.

Mediante las reuniones realizadas con los usuarios del producto (en este caso ICA), y el documento de propuesta generado en la etapa de análisis de problemas y sus posibles soluciones, se identificaron los requerimientos principales. Dichos requerimientos, una vez formalizados, fueron planteados a los usuarios para obtener un feedback de ellos, y ver que modificaciones debían hacerse. De esta manera se ajustó el documento con las modificaciones sugeridas hasta llegar a los requerimientos finales del sistema. Dichos requerimientos fueron acotados de acuerdo al tiempo y recursos con los que se contaron.

4.1. Requerimientos Funcionales

Los principales requisitos que el producto de software provee son:

- ? Desarrollo de una serie de funcionalidades que permitan resolver problemas de inventarios con diversas características.
- ? Desarrollo de una serie de funcionalidades que permitan resolver problemas de reemplazo de equipos con diversas características.
- ? Desarrollo de una serie de funcionalidades que permitan realizar pronósticos.
- ? Todas las funcionalidades deben permitir su utilización de forma remota a través de la Web.
- ? Todas las funcionalidades deben permitir su utilización en cualquier aplicación local.
- ? Desarrollo de una aplicación que utilice todas las funcionalidades desarrolladas de forma remota y/o local.

Se identificaron los principales objetos que aparecen en el dominio de los distintos problemas y las relaciones entre los mismos.

Para cada problema se definió de forma detallada cual será el proceso para obtener la solución adecuada

Por más detalles, referirse al documento de Análisis de Requerimientos (Anexo 3)

4.2. Modelo de Casos de Uso

Teniendo en cuenta las funcionalidades que se deben proveer y las características de la aplicación a desarrollar, se procedió a la creación de un modelo de casos de uso.

Se definieron casos de uso para cada una de las funcionalidades que la aplicación debería proporcionar.

Por más detalles, referirse al documento de Casos de Uso (Anexo 4)

5. Diseño

Con la información recabada en la etapa de Análisis, se diseñaron las estructuras que modelan los objetos del dominio de los problemas a resolver. Esto luego se tradujo en el diseño del sistema.

Este diseño se realizó siguiendo una metodología *Top-Down*, identificando primero grupos de funcionalidades que representaban los principales problemas a resolver, para más tarde refinarlos hasta llegar a un nivel de detalle en el que fuera posible implementar la solución a cada problema de forma independiente.

A continuación se muestran algunos de los pasos realizados en dicha metodología:

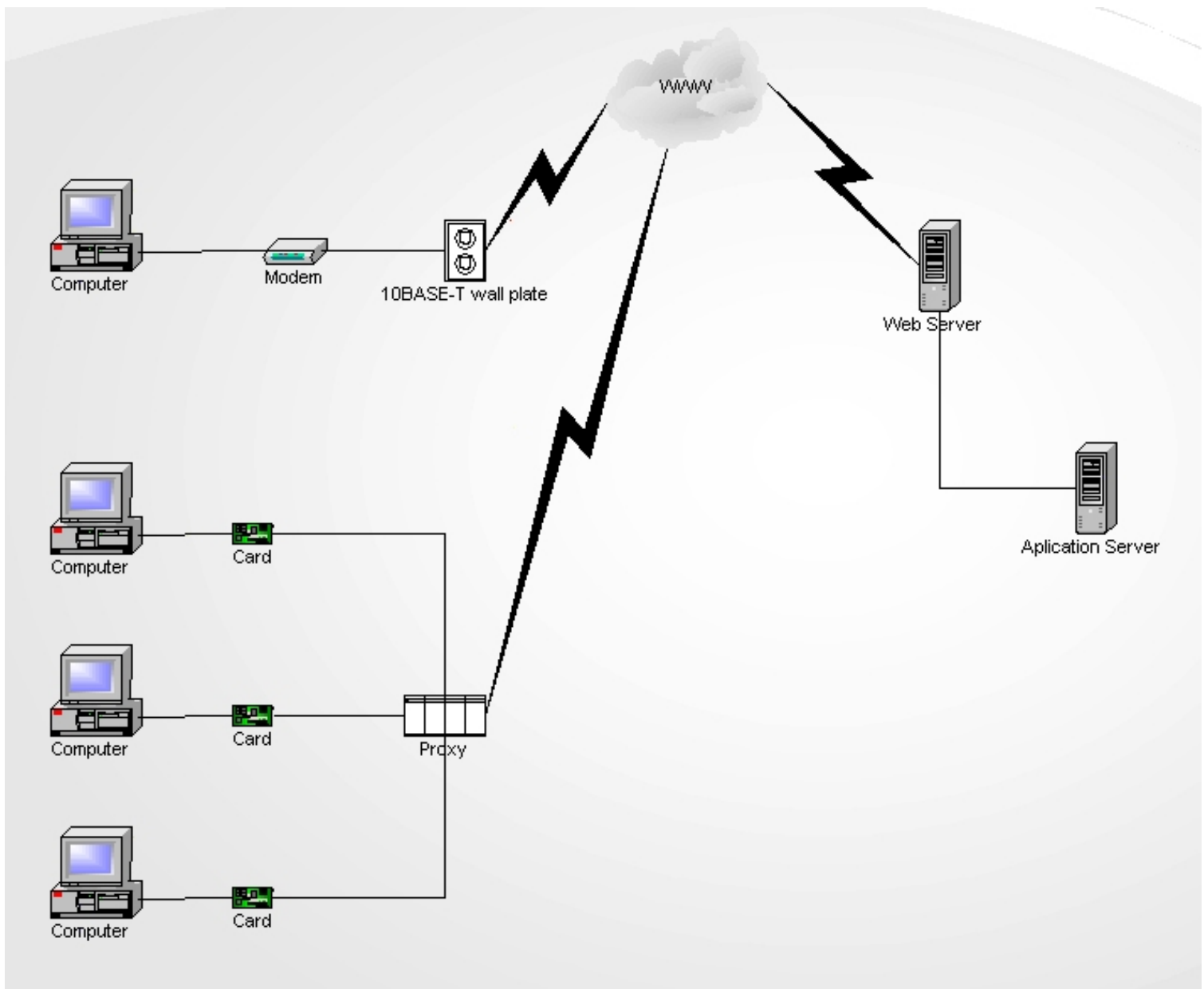


Figura 1 (Arquitectura de acceso mediante web)

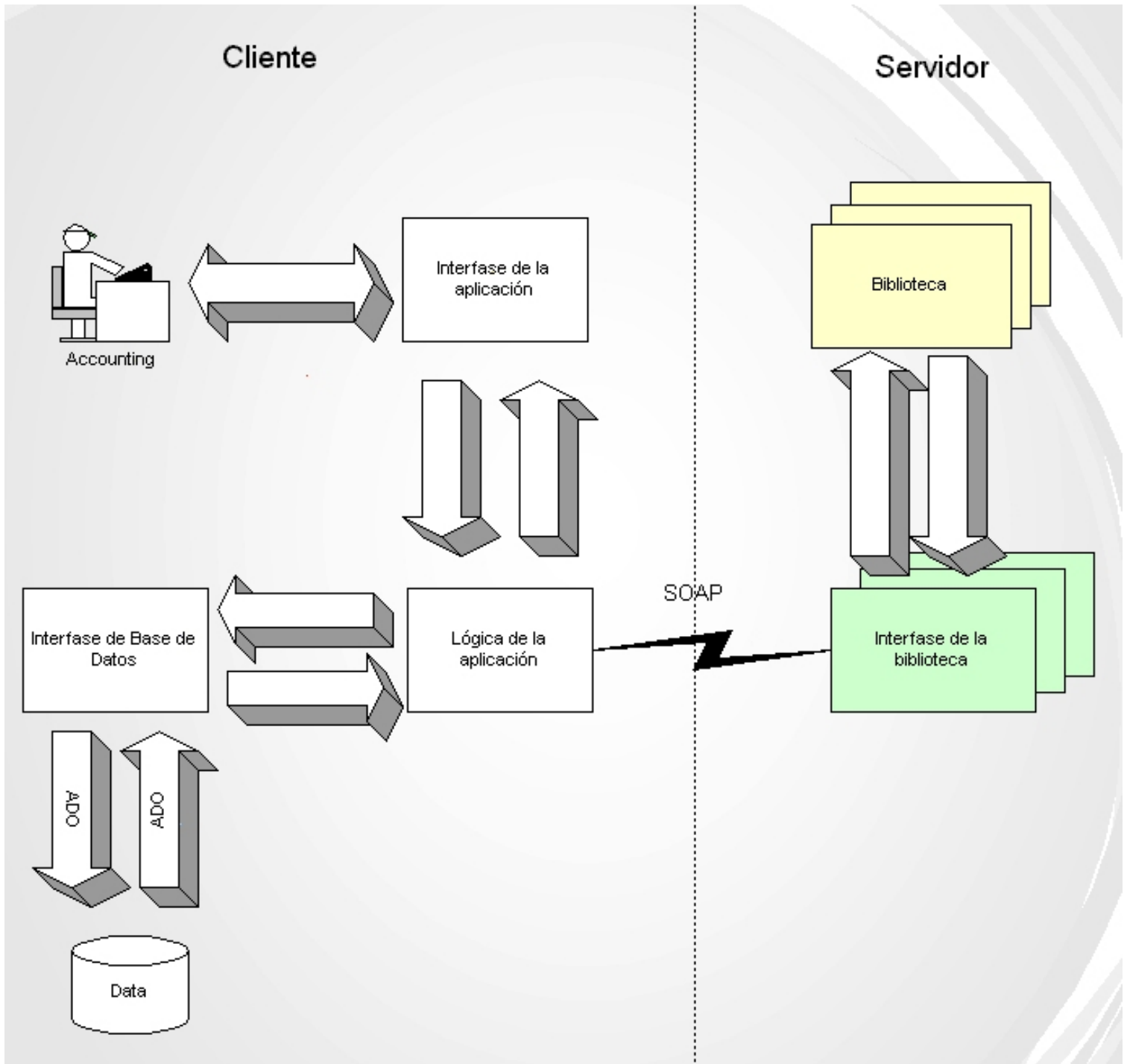


Figura 2 (Diseño de la arquitectura cliente-servidor)

Se procedió a realizar el Modelo de Diseño del sistema, para identificar la forma en que las funcionalidades estarían agrupadas y sus interrelaciones.

5.1. *Diseño de alto nivel y arquitectura*

Dadas las características de los diferentes problemas resueltos (inventarios, reemplazo y pronósticos), se consideró conveniente separar las funcionalidades en varias bibliotecas, de forma de modularizar así las funcionalidades.

La división planteada fue la siguiente:

? inventarioICA

Implementa soluciones para problemas de inventario de un único artículo.

? prpdICA

Implementa soluciones para problemas de inventario de un solo artículo con revisión periódica.
Presenta métodos heurísticos y un método de solución óptima.

? rydfICA

Implementa la solución de un modelo para el problema de inventario con remanufacturación y disposición final.

? mrpICA

Implementa soluciones para problemas de inventario de varios artículos con demanda dependiente.

? ivpleICA

Implementa una solución para el problema de inventario de varios artículos independientes que comparten un único espacio de almacenamiento.

? reemplazoICA

Implementa soluciones para problemas mantenimiento y reemplazo de un único equipo.

? reemplazoVariosICA

Implementa soluciones para problemas de inventario de varios equipos.

? pronosticoICA

Implementa soluciones para problemas de pronósticos.

5.2. Especificación de los módulos del sistema

Se da una especificación de alto nivel de cada módulo componente del sistema. Estos módulos se presentan agrupados según a la biblioteca a la que pertenezcan. Para cada módulo, se indica :

1. Una descripción conceptual del propósito del módulo
2. Funcionalidades que debe proveer

5.3. Modelo de Casos de Uso Reales

En base a los Casos de Uso de alto nivel generados en la etapa de análisis, se generaron los *Casos de Uso Reales*. Estos son una expansión de los anteriores, donde se detallan ciertos aspectos de la interacción de la aplicación con los actores y se definen prototipos de las interfaces con los usuarios.

Por más detalles, referirse al documento de Casos de Uso Reales (Anexo 6).

5.4. Decisiones Técnicas

Luego de definida la solución a los problemas, fue necesario tomar una serie de decisiones sobre los aspectos técnicos del problema, como por ejemplo el lenguaje de programación a utilizar y el protocolo para la comunicación remota. En este sentido podemos destacar los siguientes puntos:

1. *Lenguaje de Programación*
Se plantean los motivos de la elección del lenguaje de programación seleccionado para implementar las bibliotecas (C++).
2. *Utilización de COM*
Se presenta los motivos de la elección de interfaces ATL/COM para implementar las bibliotecas junto con una breve descripción de esta tecnología.
3. *Desarrollo de la aplicación*
Se discuten cuales son las razones por las que creímos apropiado desarrollar la aplicación en Visual Basic.
4. *Protocolo de comunicación*
Se listan las consideraciones que se evaluaron a la hora de elegir SOAP como protocolo de intercambio de información. Se brinda también una breve descripción de esta tecnología.
5. *Base de Datos*
Se enumeran cuales fueron las elecciones de tecnologías mediante las cuales la aplicación desarrollada accede a la Base de Datos.

Por más detalles, referirse al Anexo Técnico del Documento de Diseño (Anexo 6)

6. Implementación

Durante la etapa de implementación, se desarrolló tanto la aplicación cliente como las bibliotecas que implementan las funcionalidades, teniendo en cuenta que el corazón del producto de software a construir son las bibliotecas y que la aplicación es a manera de ejemplo de una utilización de las mismas.

Para el caso de la implementación de las bibliotecas, se desarrolló un estándar de programación en C++ (*referirse al documento de Estándar de Programación (Anexo 8)*) para que el código fuente de todo el desarrollo tuviera una coherencia que facilite su entendimiento y mantenimiento futuro.

También se generó un documento en donde se especifican las interfaces de las funcionalidades que exporta cada biblioteca. (*Referirse al documento de Especificación de Interfaces (Anexo 9)*). En este documento se especifica el orden de los parámetros, el tipo de los mismos y las restricciones que los mismos deben cumplir.

7. Resultados de los Testeos

Luego de la etapa de implementación, comenzó la etapa de testeo, en la cual se intentaron detectar los errores cometidos durante la etapa anterior.

En este sentido podemos destacar los siguientes puntos:

7.1. Pruebas funcionales

Finalizada la implementación, se realizaron testeos en busca de errores. En el documento de testeo se presenta una selección de los testeos realizados junto con los resultados de los mismos. En la mayoría de los casos, se presentan representaciones gráficas de los problemas y de las soluciones de forma que el análisis del caso resulte más sencillo.

Los casos de prueba se desarrollaron en base a casos de prueba y ejemplos existentes en la literatura consultada o en modificaciones de dichos casos, de forma que permitieran verificar los resultados obtenidos con las implementaciones de los métodos realizadas. Cuando no existieron casos de testeo disponibles, los mismos fueron desarrollados por nosotros mismos especialmente para realizar el testeo.

En todos los casos, se dan los tiempos de ejecución de la funcionalidad ejecutando a través de SOAP ya sea de forma *stand-alone* así como en una red local.

Vale la pena recalcar que fue imposible documentar todo los testeos realizados, ya que muchos de ellos se llevaron a cabo durante el proceso de implementación de las bibliotecas, o porque requieren de un volumen documental bastante grande de números y tablas, como puede ser el caso de inventario de varios artículos y reemplazo de varios equipos. Los casos para los cuales se documento fueron desarrollados a manera de ejemplo, para mostrar las características más sobresalientes de cada una de las soluciones implementadas, y poder mostrar el funcionamiento correcto de las mismas, así como determinar conclusiones sobre los resultados obtenidos.

A continuación se presenta, a modo de ejemplo, una selección de los testeos funcionales realizados. Los casos se eligieron de modo que cada funcionalidad principal (Políticas de Inventarios, MRP, Remanufacturación y Disposición Final, Políticas de Reemplazo y Pronósticos) quedase representada mediante un caso de test.

Dado que se presentan tiempos de ejecución, es importante saber cual es la configuración de software y hardware sobre la que se realizaron las pruebas, por ello, se listan ahora las características de los equipos en que se efectuaron los testeos:

Equipo 1: (Testeos en red)

Hardware:

Procesador: AMD Athlon 850 MHz.

Memoria RAM: 128 Mb. PC 100 MHz.

Software:

Sistema Operativo: Microsoft Windows XP 5.1 (32 bits)

Equipo 2: (Testeos en red)

Hardware:

Procesador: AMD Athlon 850 MHz.
Memoria RAM: 128 Mb. PC 133 MHz.

Software:

Sistema Operativo: Microsoft Windows XP 5.1 (32 bits)

Equipo 3: (Testeos standalone y en red)

Hardware:

Procesador: Intel Pentium III 600 MHz.
Memoria RAM: 128 Mb. PC 133 MHz.

Software:

Sistema Operativo: Microsoft Windows 2000 Professional

Equipo 4: (Testeos standalone)

Hardware:

Procesador: Intel Pentium III 500 MHz.
Memoria RAM: 64 Mb. PC 133 MHz.

Software:

Sistema Operativo: Microsoft Windows 98 SE

LAN (Local Area Network): Ethernet 10 Mbits

Los tiempos de ejecución registrados, en el caso *standalone*, corresponden a ejecuciones sobre el Equipo 4, mientras que los testeos de red involucraron los Equipos 1 y 2. En el Equipo 3 se realizaron diversas pruebas, sin registrar los tiempos de ejecución.

Las pruebas realizadas se organizaron de la siguiente forma:

1. *Descripción*

Se presenta de forma general como es la prueba a realizar. Se presentan cuales fueron los datos de entrada relevantes, los resultados esperados y cual debe ser el comportamiento de la funcionalidad. Si se trata de un caso de test basado en algún ejemplo o ejercicio presentado en la literatura que se utilizó, se referencia la misma.

2. *Objetivo*

Se describe en detalle que es lo que se pretendió comprobar mediante el caso de test.

3. *Datos de entrada*

Se especifican de forma detallada cuales fueron los datos de entrada del problema.

4. *Resultados Esperados*

Se especifican de forma detallada (cuando es posible) cuales eran los valores que el programa debía devolver. Estos resultados son los que figuran como correctos en la fuente bibliográfica. En el caso de un test desarrollado por nosotros, son los resultados obtenidos mediante el cálculo manual, o el comportamiento intuitivo de la funcionalidad para los datos de entrada dados.

5. *Resultados Obtenidos*

Se especifican cuales fueron los valores devueltos por la funcionalidad que se está testeando.

6. *Observaciones*

Se indica si los resultados obtenidos son los que se esperaban. Se realizan las aclaraciones que se consideren necesarias así como los comentarios pertinentes al comportamiento del programa. Se presentan las conclusiones de la prueba.

7. *Tiempos de ejecución*

Se indica cuanto tiempo transcurrió entre la solicitud del procesamiento del problema hasta el momento en que se obtuvo el resultado. Para todos los casos, se presentan los tiempos de ejecución medidos desde la aplicación desarrollada utilizando las bibliotecas mediante SOAP pero de dos formas distintas:

- ? Uso local
- ? Uso sobre una red local

En los casos en que se miden tiempos sobre una red local, debe tenerse en cuenta que los resultados son altamente dependientes de la carga de información que viaja por dicha red. Los casos testeados se probaron en una red en la que el tráfico era mínimo.

7.1.1. Políticas de Inventario

No se permiten faltantes y con descuentos por cantidad

DESCRIPCIÓN

Se probará la funcionalidad de inventario de un producto en donde *no se permiten faltantes y con descuentos por cantidad*, en donde se considerará que el tiempo de entrega es inmediato (cero).

Se supone que el costo depende de la cantidad a ordenar o producir, es decir, que existen divisiones en el costo.

El valor que indicará cada cuanto tiempo se debe producir o realizar una orden y que será calculado por la política, se encuentra en relación directa con la cantidad óptima calculada y el valor de la demanda.

Este caso se basa en un ejemplo presentado en [1.4].

OBJETIVO

Este caso intenta probar que la política de inventarios mencionada funciona correctamente para un caso aportado conocido aportado por la bibliografía.

DATOS DE ENTRADA

? Costo de preparación (K):	12000
? Costo de mantenimiento (h):	0.30
? Tasa de demanda (a):	8000
? Tiempo de entrega (t):	0
? Costo unitario en la franja de cantidad 1 (1 – 10000):	11
? Costo unitario en la franja de cantidad 2 (10000 – 80000):	10
? Costo unitario en la franja de cantidad 3 (80000 en adelante):	9.5

RESULTADOS ESPERADOS

? Cantidad óptima a ordenar o producir:	25298
? Cada cuanto tiempo se debe ordenar o producir:	3.2 meses
? Nivel de inventario en donde se debe ordenar o producir:	0

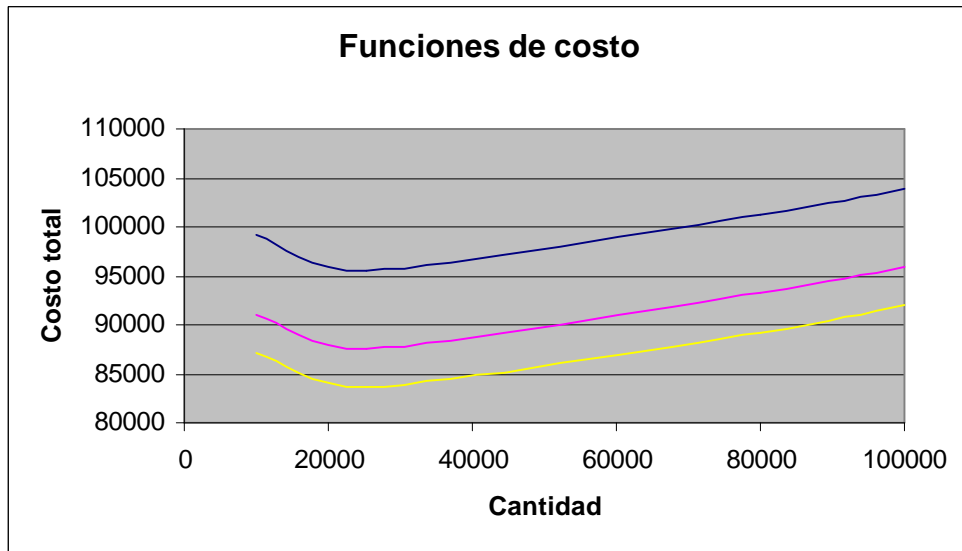
RESULTADOS OBTENIDOS

? Cantidad óptima a ordenar o producir:	25298
? Cada cuanto tiempo se debe ordenar o producir:	3.16..... meses
? Nivel de inventario en donde se debe ordenar o producir:	0

OBSERVACIONES

Se obtuvieron los resultados esperados. La diferencia obtenida es debido a redondeos en las operaciones matemáticas.

A continuación se muestran las funciones de costos para cada franja de descuento.



TIEMPOS DE EJECUCIÓN

- ? Acceso Local: menos de un segundo
- ? Acceso Red Local: 1 Segundo

7.1.2. MRP

DESCRIPCIÓN

Probaremos la implementación de MRP mediante un ejemplo pequeño de lista de materiales. El caso de test fue desarrollado y calculado manualmente por nosotros.

OBJETIVO

Con este caso probaremos si la implementación de MRP calcula bien la demanda de los artículos que no son finales.

Debido a la gran cantidad de datos solo se probarán con las siguientes políticas: L4L, LFS, LTC y Wagner-Whitin, ya que no es el objetivo central testear las políticas, sino su integración con MRP, y esta integración funciona de la misma manera para todas.

DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada fueron seleccionados para que el cálculo a mano sea fácil de realizar.

? Cantidad de artículos: 4

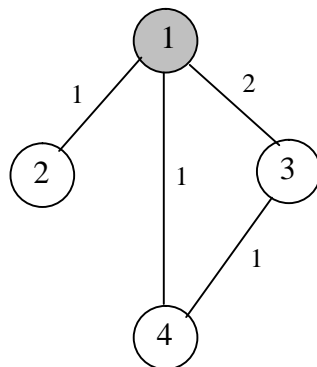
? Cantidad de períodos: 5

El resto de la información es presentado en las siguientes tablas:

Artículo	Periodo	Demanda	Costo de Inventario	Costo de Ordenar	Recepciones Planeadas
1	1	4	1	1	0
1	2	4	1	1	0
1	3	5	1	1	0
1	4	5	1	5	0
1	5	4	1	0.5	0
2	1	0	1	1	0
2	2	0	1	1	0
2	3	0	1	1	0
2	4	0	1	1	0
2	5	0	1	1	0
3	1	0	1	1	0
3	2	0	1	1	0
3	3	0	1	1	0
3	4	0	1	1	0
3	5	0	1	1	0
4	1	0	1	1	0
4	2	0	1	1	0
4	3	0	1	1	0
4	4	0	1	1	0
4	5	0	1	1	0

Artículo	Nivel del BOM	Inventario Inicial	Costo de Preparación	Tiempo de Entrega	Tamaño del Lote para LFS	Es final ?
1	1	0	0	0	20	Si
2	2	0	0	0	20	No
3	2	0	0	0	50	No
4	3	0	0	0	100	No

? La lista de materiales (BOM) es la siguiente:



RESULTADOS ESPERADOS

Como la demanda de un artículo depende del plan determinado para un artículo del nivel superior, del cual él es componente, es difícil de establecer a priori la demanda de cada uno de los artículos. Por lo tanto, se analizarán cada uno de los resultados con el BOM y la demanda de los artículos finales para ver que así sea, y se revisará que el costo del plan sea el correcto.

Por ejemplo, en el caso de Wagner-Whitin es de esperar que la demanda del período 4 para el artículo 1 sea ordenada en el período 3 y no en el 4, donde el costo de ordenar es 5 veces superior y los costos de inventario son constantes.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestra el plan determinado por las políticas y el costo de cada plan:

Wagner – Whitin

Artículo	Periodo	Ordenar
1	1	4
1	2	4
1	3	10
1	5	4
2	1	4
2	2	4
2	3	10
2	5	4
3	1	8
3	2	8
3	3	20
3	5	8
4	1	12
4	2	12
4	3	30
4	5	12

Artículo	Costo
1	25
2	22
3	44
4	66

Como se suponía, la demanda del período 5 es ordenada en 4

L4L

Artículo	Periodo	Ordenar
1	1	4
1	2	4
1	3	5
1	4	5
1	5	4
2	1	4
2	2	4
2	3	5
2	4	5
2	5	4
3	1	8
3	2	8
3	3	10
3	4	10
3	5	8
4	1	12
4	2	12
4	3	15
4	4	15
4	5	12

Artículo	Costo
1	40
2	22
3	44
4	66

LFS

Artículo	Periodo	Ordenar
1	1	20
1	5	20
2	1	20
2	5	20
3	1	50
3	5	50
4	1	100
4	5	100

Artículo	Costo
1	85
2	40
3	160
4	380

OBSERVACIONES

Se obtuvieron los resultados esperados, si tenemos en cuenta la demanda del artículo final 1 (que además es el único artículo final) y el BOM.

TIEMPOS DE EJECUCIÓN

- ? Acceso Local: de menos de un segundo (heurísticos) a un segundo (Wagner-Whitin)
- ? Acceso Red Local: de un segundo (heurísticos) a más de un segundo (Wagner-Whitin)

7.1.3. Remanufacturación y Disposición Final

DESCRIPCIÓN

Probaremos la implementación de una política, con los datos de entrada del caso dado en [6]. Se probará la implementación con distintos valores de tasa de disposición, incluso el valor dado como correcto 0,371 de forma de obtener una representación gráfica similar a la dada en el ejemplo.

Este ejemplo es el que usa el autor para demostrar la efectividad de sus resultados.

(Nota: El ejemplo citado, no tiene el valor de tasa de demanda. La misma es calculada usando la fórmula 19 mediante la sustitución de los demás valores, dada en la página 323 de la referencia antes mencionada)

OBJETIVO

Este caso intenta probar que la implementación de la política de remanufacturación y disposición final funciona correctamente para el caso dado en la referencia, para el cual se cuenta con un resultado correcto.

DATOS DE ENTRADA

Datos constantes:

Costo fijo de producción:	100
Costo fijo de reparación:	100
Costo unitario de producir:	3
Costo unitario de reparar:	13
Costo unitario de disponer:	20
Costo de inventario en fábrica:	6
Costo de inventario en depósito:	4
Tasa de demanda:	8.8 (estimada)

Datos variables:

Tasa de Disposición
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.371
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
0.75

← Tasa de disposición óptima, dada en el ejemplo

0.8
0.85
0.9
0.95

RESULTADOS ESPERADOS

Se espera obtener una representación gráfica de la función de costos próxima a la del ejemplo citado, y los siguientes valores para las siguientes tasas de disposición:

Tasa de Disposición	Costo
0.371 (óptima)	288.233
1	309.545

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tasa de Disposición	Costo
0.05	299.0487061
0.1	296.3773804
0.15	294.0403748
0.2	292.0799866
0.25	290.5427856
0.3	289.4795227
0.35	288.9442139
0.371198247	288.8902893
0.4	288.992981
0.45	289.6819763
0.5	291.0650024
0.55	293.1901855
0.6	296.0968628
0.65	299.6944885
0.7	303.2722473
0.75	306.6648865
0.8	309.7926636
0.85	312.5142212
0.9	314.5391541
0.95	315.0762634

Tasa de disposición óptima (y su costo), devuelta por la implementación

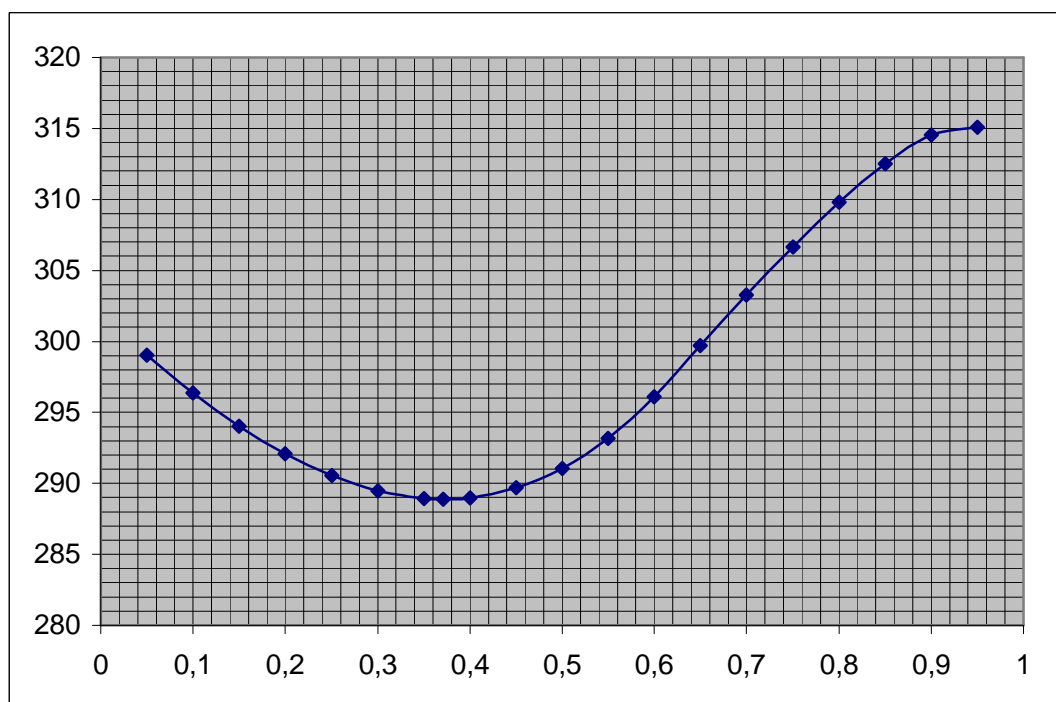
En donde 0,371198247 es el valor de tasa de disposición obtenido con la implementación de la política.

Para una tasa de 1 el valor del costo es 305,161.

OBSERVACIONES

Se obtuvieron los resultados esperados, teniendo en cuenta que el valor de la tasa de la demanda es calculada a mano a partir del ejemplo. Además la forma de la función es muy próxima a la dada en el ejemplo.

La gráfica que sigue a continuación fue obtenida para valores que van desde 0,5 hasta 0,95 a intervalos de 0,5 y también para el valor óptimo 0,371 dado y el valor óptimo 0,371198247 obtenido



TIEMPOS DE EJECUCIÓN

- ? Acceso Local: un segundo
- ? Acceso Red Local: dos segundos

7.1.4. Políticas de Reemplazo

DESCRIPCIÓN

Se probará la funcionalidad de *reemplazo de varios equipos*, en un caso simple que consta de 2 máquinas que deben mantenerse durante 2 períodos (no se cuentan el período inicial ni el final).

OBJETIVO

Este caso intenta probar que el reemplazo de varios equipos funciona correctamente en un caso relativamente sencillo.

DATOS DE ENTRADA

Horizonte de Planeamiento: 4 períodos (2 intermedios + 1 inicial + 1 final)

Precio de un equipo nuevo:

Período 1: 1000
Período 2: 1000

Costos de Mantenimiento:

Período 1: 500
Período 2: 700

Valor de recuperación:

1 Período de vida: 450
2 Períodos de vida: 400
3 Períodos de vida: 300

RESULTADOS ESPERADOS

Períodos en los que se debe reemplazar:

Período 1:
Equipo A: Reemplazar
Equipo B: Mantener
Período 2:
Equipo A: Mantener
Equipo B: Reemplazar
Período 3:
Equipo A: Reemplazar (venta final)
Equipo B: Reemplazar (venta final)

Costo del Plan: 1300

RESULTADOS OBTENIDOS

Períodos en los que se debe reemplazar:

Período 1:

Equipo A: Reemplazar

Equipo B: Mantener

Período 2:

Equipo A: Mantener

Equipo B: Reemplazar

Período 3

Equipo A: Reemplazar

Equipo B: Reemplazar

Costo del Plan: 1300

OBSERVACIONES

Se obtuvieron los resultados esperados, es decir, el algoritmo devuelve un camino de costo mínimo.

Nótese que la siguiente solución también es óptima:

Período 1:

Equipo A: Mantener

Equipo B: Mantener

Período 2:

Equipo A: Reemplazar

Equipo B: Reemplazar

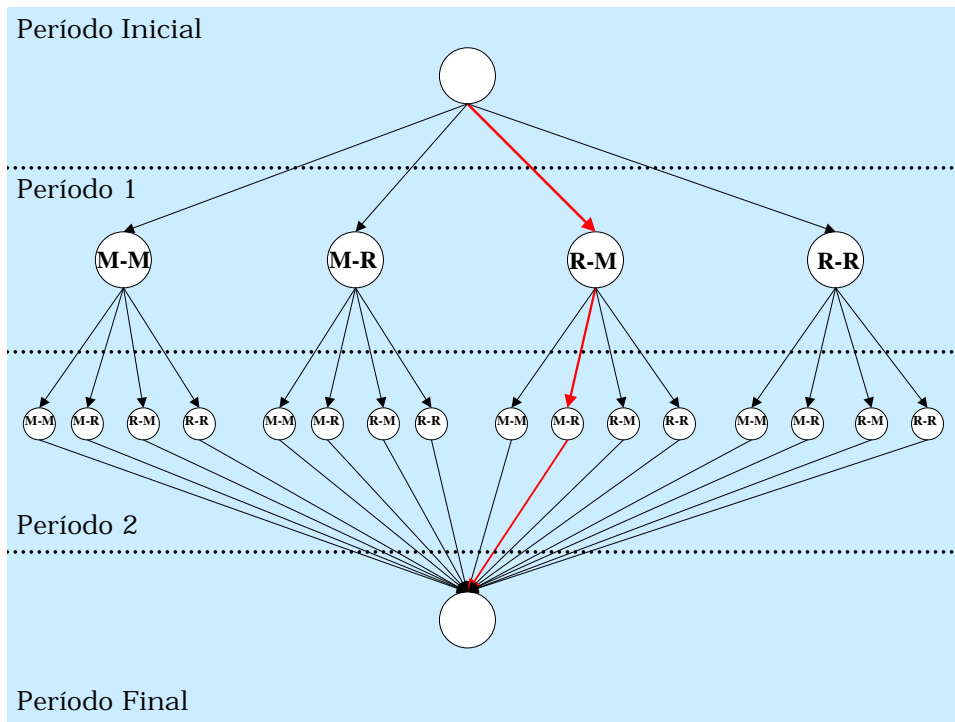
Período 3

Equipo A: Reemplazar

Equipo B: Reemplazar

Costo del Plan: 1300

El algoritmo devuelve la otra solución ya que el criterio elegido es ir manteniendo la mejor solución encontrada, hasta que se esté frente a una solución de costo estrictamente menor.



Representación Gráfica del problema. La solución se destaca en rojo. Dado el tamaño del problema y por claridad del dibujo, se omiten los costos.

TIEMPOS DE EJECUCIÓN

- ? Acceso Local: menos de un segundo
- ? Acceso Red Local: 1 segundo

7.1.5. Pronósticos

DESCRIPCIÓN

Se probará la funcionalidad de *pronósticos de nivel constante y tendencia estacional*.

Este caso se basa en un ejemplo presentado en [\[1.12\]](#).

OBJETIVO

Este caso intenta probar que el pronóstico de nivel constante y tendencia estacional funciona correctamente en un caso obtenido de la literatura de donde también se obtuvieron los modelos y métodos para implementar las funcionalidades.

DATOS DE ENTRADA

- ? Datos Históricos de la demanda correspondientes al periodo estacional anterior:

Valor estacional 1:	2786
Valor estacional 2:	2928
Valor estacional 3:	3025
Valor estacional 4:	3061

- ? Datos Históricos de la demanda correspondientes al periodo estacional actual:

Valor estacional 1:	2800
Valor estacional 2:	2925
Valor estacional 3:	3040

RESULTADOS ESPERADOS

Pronósticos:

Valor estacional 4: 3064

RESULTADOS OBTENIDOS

Pronósticos:

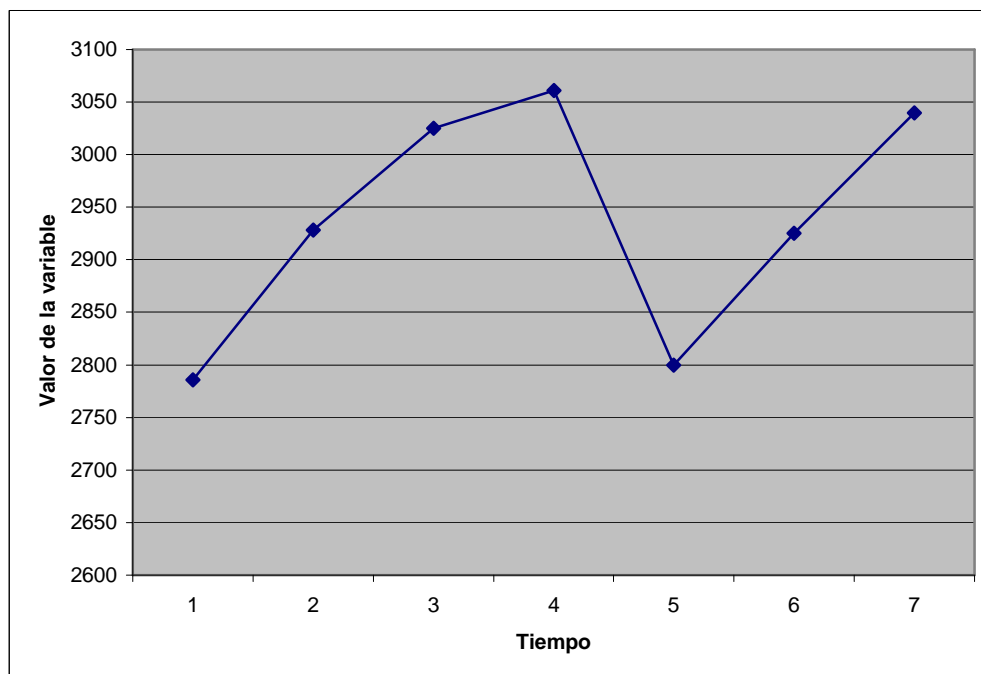
Valor estacional 4: 3063.4814453125

OBSERVACIONES

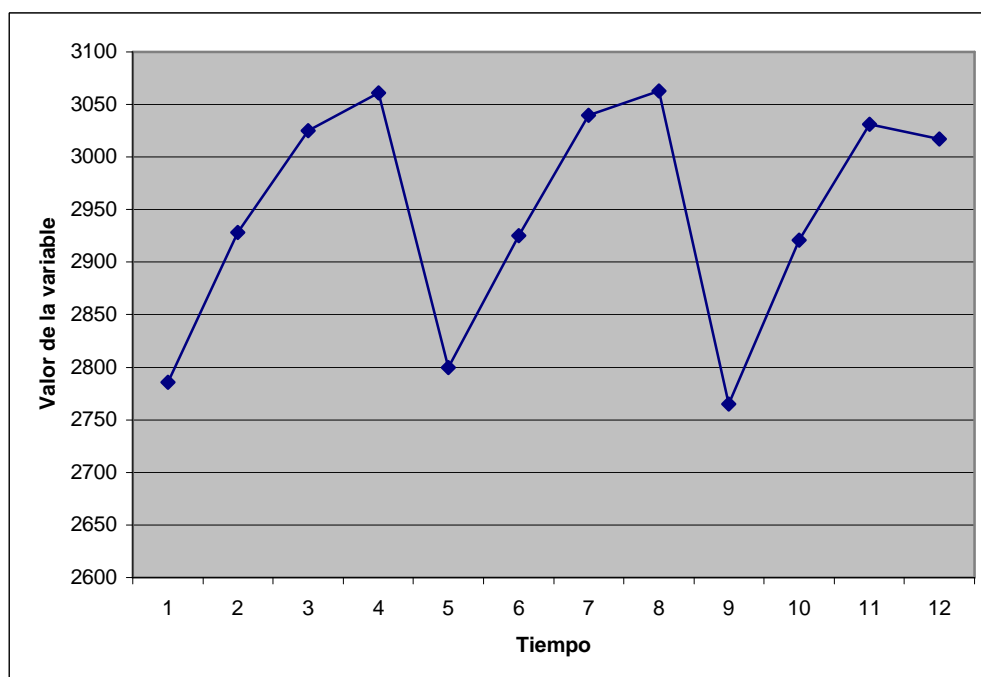
Se obtuvieron los resultados esperados.

La diferencia que se puede observar entre el valor esperado y el valor obtenido se debe a que el ejemplo planteado en el libro, los valores obtenidos a lo largo de los diferentes cálculos son truncados a una precisión de tres cifras a la derecha de la coma decimal, mientras que el programa testeado trabaja con la mayor precisión que le permite la representación interna de la máquina.

En las dos figuras que se presentan a continuación, se presenta cuales son los datos históricos sobre los que se basará el pronóstico a calcular y el resultado de este cálculo; puede verse claramente como se mantiene la tendencia en los siguientes períodos.



Situación histórica (datos de entrada)



Pronóstico del los dos siguientes períodos estacionales.(resultado)

TIEMPOS DE EJECUCIÓN

? Acceso Local:	menos de un segundo
? Acceso Red Local:	un segundo

Para cada grupo de funcionalidades, se incluye un documento donde se presentan de forma breve cuales fueron los errores detectados durante los testeos

Por más detalles, referirse al Anexo Errores del Documento de Testeo (Anexo 10)

7.2. Pruebas de Portabilidad

Se compilaron los códigos de las funcionalidades en diferentes plataformas (Unix, Linux, Windows). Por falta de tiempo, no se realizaron pruebas funcionales en estas plataformas.

7.3. Pruebas de Interoperabilidad

Para comprobar que los *Web Services* implementados pueden ser accedidos desde aplicaciones implementadas en diversos lenguajes, se realizaron pruebas con clientes *Java*, como un ejemplo de lenguaje independiente de la plataforma Windows, la cual fue usada para el desarrollo de este proyecto.

Dada la orientación Web del proyecto, se crearon clientes *ASP (Active Server Pages)* que utilizaran las funcionalidades implementadas accediendo mediante un Web Server.

Por falta de tiempo, no se realizaron todas las pruebas funcionales que se hubiesen deseado; en su lugar, se crearon clientes *ASP* y *Java* muy simples, que permitieran probar algunas de las funcionalidades.

7.4. Pruebas de Acceso

Con el fin de comprobar que las bibliotecas generadas, pueden ser utilizadas tanto de forma remota como local, todas las pruebas funcionales presentadas, se realizaron tanto de forma remota (accediendo mediante SOAP sobre HTTP) como de forma local, resolviendo las referencias a las funciones de las bibliotecas en tiempo de ejecución.

Por más detalles sobre cualquiera de los puntos anteriores, referirse al documento Resultados de los Testeos (Anexo 10)

8. Conclusiones

En un sentido estricto, el objetivo del proyecto era crear una serie de funcionalidades que resolviesen problemas de inventarios (de uno o más artículos, con remanufacturación y disposición final), problemas de mantenimiento de maquinaria y que además permitieran la realización de pronósticos. Dichas funcionalidades deberían tener la característica de ser accesibles de forma remota (a través de la Web, por ejemplo) y permitir su utilización en aplicaciones de forma local.

Estos fueron los objetivos planteados por parte de los tutores como motivo fundamental del proyecto de Taller 5. Quedaba como objetivo implícito del proyecto relevar en que consistía cada uno de los problemas, cuales eran los puntos de interés en cada uno de ellos, que métodos existían para su solución, que adaptaciones realizaríamos a los mismos en caso de considerarlo necesario, y porque y como eran seleccionadas estas soluciones.

Este conjunto de decisiones se fueron quemando etapa por etapa durante el desarrollo del proyecto, comenzando con la etapa de investigación, donde se relevo toda la información disponible relacionada al mantenimiento de inventarios de diversos tipos, mantenimiento de maquinarias y políticas de pronósticos. Es importante destacar que mucho material bibliográfico seleccionado no estaba disponible, muchas veces porque era muy actual y solo se encontró información introductoria en Internet, y otras veces porque los artículos y revistas no estaban disponible en el medio, a la menos no los volúmenes y ediciones que necesitábamos.

A pesar de ello, se relevó una importante cantidad de material, y podemos decir que la etapa de investigación fue lo suficientemente profunda para el trabajo que se realizaría posteriormente, y que se tuvo que decidir muy bien cuales cosas eran las imprescindibles y las más accesibles, ya que este era un proyecto introductorio en estos temas. La profundización de esta etapa nos permitió tomar conocimiento fundamentalmente del estado del arte en políticas y control de inventario, y muchos de estos temas quedaron marcados para trabajos futuros.

En las siguientes etapas de propuestas de solución y análisis de requerimiento se realizó una selección de los problemas y las soluciones existentes que entendimos que eran básicas y que se podían llevar a cabo teniendo en cuenta el tiempo de duración del proyecto. A muchas de estas soluciones tuvimos que hacerles adaptaciones para brindar una solución más amplia y algunas veces para satisfacer los requerimientos de accesibilidad a través de Internet.

Todos estos objetivos fueron alcanzados con éxito, ya que en la finalización del presente proyecto se dispone de un juego de bibliotecas que resuelven los problemas mencionados. Es lógico pensar que como en la inmensa mayoría de los proyectos de software para los que existe una limitación de tiempo para su finalización, algunas funcionalidades debieron dejarse de lado y otras no fueron llevadas adelante de la forma que se hubiese deseado, por lo cual existen diversos puntos en los cuales pueden realizarse optimizaciones y extensiones. *Por más detalles referirse a la [Sección 10 \(Trabajos Futuros\)](#).*

Por otro lado, las funcionalidades implementadas intentaron diseñarse de forma que estas mejoras y optimizaciones (así también como futuras extensiones) puedan realizarse con facilidad, gracias al encapsulamiento de la implementación y la representación interna que proporciona la orientación a objetos. Los impactos de un

cambio de funcionalidad deberían ser mínimos y el impacto de la creación de nuevas funcionalidades debería ser prácticamente nulo.

Del mismo modo en que se intentó crear el diseño más simple y mantenible posible, se trató de que todas las funcionalidades tuviesen el mejor desempeño posible en lo referente a tiempos de computación, por ello se seleccionó C++ sobre otros lenguajes que podrían haber facilitado muchas partes del desarrollo.

Para la exposición remota de las funcionalidades se utilizó la tecnología SOAP para garantizar que las funcionalidades desarrolladas estarán listas para lo que muchos consideran el siguiente paso evolutivo de Internet y el Software: los *Web Services*.

Es importante hacer notar que las exigencias técnicas requirieron de una etapa de investigación ardua y costosa desde el punto de vista temporal y que esto significó una reducción del tiempo de implementación planeado. El proceso de investigación técnica consistió en indagar y evaluar cuales eran los métodos disponibles para la exposición de funcionalidades (CORBA, DCOM, SOAP, entre otros) de forma remota, como tendrían que ser construidas dichas funcionalidades para que permitieran dicha exposición (modelo de componentes COM), lo cual era un ambiente de programación desconocido por nosotros, y el cual tuvimos que aprender para la implementación del proyecto (*Ver Documento de Diseño y su Anexo, y Documentación Técnica (Anexos 5 y 7)*)

De esta forma, se llega a la finalización del proyecto con una serie de funcionalidades para los problemas que en nuestro entender podrían ser considerados como clásicos dentro de la Investigación de Operaciones para los temas de mantenimiento de inventarios, reemplazo de equipos y pronósticos, así como para otros problemas dentro de esos temas que pueden ser de gran utilidad en la vida real y no solo a nivel teórico. Las bibliotecas se entregaron acompañadas de la documentación completa correspondiente a su diseño e implementación, para facilitar la realización de futuras mejoras o modificaciones.

Como se ha mencionado, este proyecto presentó varias dificultades, entre las que se pueden destacar la complejidad matemática de muchos de los métodos de resolución de los distintos problemas. En el aspecto técnico, el uso de ATL – COM presentó dificultades a la hora de generar funciones que pudiesen recibir y devolver tipos complejos de datos, por ello, se intentó simplificar lo más posible las interfaces de las bibliotecas.

Otra dificultad técnica importante, fue lograr una correcta interacción entre el Web Server, las bibliotecas y la aplicación cliente; en particular, la resolución de este problema tomó un tiempo bastante considerable.

Finalmente, es importante destacar que se logró concretar la mayor parte de los objetivos propuestos para este proyecto; estos, apuntaban al desarrollo de una colección de funcionalidades que permitieran resolver problemas de diferentes ramas de la Investigación de Operaciones. Quedan pendientes mejoras y extensiones, pero puede considerarse que el objetivo fue completado.

9. Aportes

Para analizar el aporte realizado por el proyecto, pensamos que es necesario separarlo en dos puntos principales:

- ? Investigación
- ? Implementación de Soluciones

Como se mencionó antes en las conclusiones, la etapa de investigación consumió gran parte del tiempo del proyecto, en la cual se recavó material suficiente como para la implementación de las soluciones realizadas, y para desarrollar posibles mejoras de estas implementaciones, además de otras soluciones a implementar para problemas que pueden ser perfectamente abordados por un proyecto de taller futuro o similar.

Como ejemplo de lo anterior, tanto el documento de Estado del Arte (*Anexo 1*) como el de Propuestas (*Anexo 2*) contienen ambos amplia información sobre los problemas y las soluciones que se implementaron, pero además brindan una completa información sobre posibles mejoras con respecto a los tiempos de los algoritmos que se podrían efectuar, posibles profundizaciones a realizar en relación a los problemas de inventarios (capacidad limitada, variación de costos, etc) y problemas abiertos, de los cuales la información bibliográfica es difícil de obtener, y que requirieron de una búsqueda dedicada tanto en Internet, como en la Facultad de Ingeniería y de Economía de la Universidad de la República.

Sin duda alguna, no figuran en estos documentos citados todos los artículos de revistas, libros y sitios de Internet leídos y analizados, ya que tuvimos que llevar a cabo una tarea de selección, debido a que era la primera vez que nos enfrentábamos a esta clase de problemas y por otro lado porque teníamos un tiempo acotado para el desarrollo del proyecto, pero pensamos que el contenido de los mismos pueden ser un buen punto de partida para aquellos que decidan abordar estos temas y profundizarlos.

Consideramos además que el aporte no son solo los documentos, artículos, revistas y sitios de Internet analizados y referenciados, sino que este proyecto con la investigación realizada abre un camino para la búsqueda de soluciones y nuevos problemas que puedan surgir a partir de este trabajo, ya que el aporte puede verse como la base informativa para la investigación de nuevos casos de problemas de inventario, reemplazo y pronósticos.

El segundo aporte es sobre la elaboración de algoritmos para las soluciones que decidimos implementar a los problemas comprendidos por el proyecto.

Dado que el objetivo del proyecto era implementar un conjunto de funcionalidades para los problemas de inventario, de reemplazo de equipos, y de pronósticos, tuvimos que llevar a cabo el desarrollo explícito de algoritmos para aquellos métodos con los cuales solo se contaba con una descripción y ejemplos simples de los mismos. El desarrollo de los algoritmos comprendió:

- ? La especificación de los datos de entrada
- ? La elaboración de un procedimiento basado en el método
- ? La especificación de los datos de salida

En el caso de inventario con remanufacturación y disposición final fue necesario reunir la bibliografía seleccionada para poder armar un algoritmo, realizando un trabajo dificultoso en términos matemáticos, ya que el modelo presenta complejidades considerables.

Sobre otros temas se realizaron extensiones a algunos de los métodos encontrados en la bibliografía ya que los mismos presentaban soluciones puntuales, por lo que se decidió implementar soluciones generales (cuando la complejidad de la misma lo permitiera) o si esto no fue posible, se llevó adelante la implementación de otros casos particulares que ampliaran la funcionalidad.

A continuación resumimos para cada uno de los problemas las soluciones implementadas y en los casos que corresponda las extensiones realizadas:

? **Inventario de un artículo:** En esta área de mantenimiento de inventario es donde encontramos la mayor información, ya que es la base para los demás temas de inventario. Esto no significa que los métodos encontrados sean simples, ya que muchos de ellos están planteados para situaciones en donde los datos pueden ser distribuciones de probabilidad complejas o desconocidas, o problemas donde se requiera de métodos más elaborados, como por ejemplo algoritmos genéticos y redes neuronales. Se decidió entonces implementar un conjunto de soluciones para los problemas más comunes en estos casos:

1. Modelos de Revisión Continua

a. Demanda Determinística

- i. No se permiten Faltantes y Sin Descuentos por Cantidad
- ii. Se permiten Faltantes y Sin Descuentos por Cantidad
- iii. No se permiten Faltantes y Con Descuentos por Cantidad

b. Demanda Estocástica Conocida

- i. Modelo de un Período
- ii. Modelos de varios períodos con cumplimiento tardío de la demanda insatisfecha
- iii. Modelos de varios períodos sin cumplimiento tardío de la demanda insatisfecha

c. Demanda Estocástica Estimada

- i. No se permiten faltantes y Sin Descuentos por Cantidad

2. Modelos de Revisión Periódica

a. Demanda Determinística Variable

i. Soluciones Optima:

1. Algoritmo de Wagner-Whitin

ii. Soluciones Aproximadas

1. Heurístico de Silver-Meal
2. Lot for Lot, L4L
3. Lot Fix Size, LFS

4. Less Unit Cost, LUC
5. Less Total Cost, LTC
6. Part Period Balance, PPB

b. Demanda Probabilística

1. Modelo de varios períodos sin costo de preparación

c. Demanda Probabilística Estimada

1. No se permiten faltantes y sin descuentos por cantidad

Los casos de Revisión Continua que no se implementaron se fundamentan en las complejidades matemáticas de los modelos. En el caso de Revisión Periódica las Soluciones Aproximadas que se implementaron fueron las que se entendieron más comunes y útiles en la práctica. Para el caso de Demanda Estocástica también los modelos eran complejos.

- ? **Inventario de varios artículos:** En este caso se abordaron soluciones para dos problemas: demanda dependiente y demanda independiente. Para la demanda dependiente se implementó el método clásico de MRP^* con las características más generales del mismo: manejo de inventario inicial, manejo de recepciones asignadas y manejo de artículos finales independientes. Es importante marcar aquí que la bibliografía disponible sobre este tema no es fácil de encontrar a pesar de la difusión del método de MRP^* y que se debió recurrir a estudiantes de Ingeniería Industrial Mecánica con conocimientos del tema, para solicitar referencia bibliográfica. A pesar de esto la bibliografía encontrada no era del nivel deseado, y fue necesario adaptar las descripciones encontradas sobre el mecanismo de MRP^* para elaborar un algoritmo completo como el que se implementó.

Para el caso de artículos independientes se implementó una solución basada en EOQ^* (el método más utilizado para problemas de inventario) con la restricción de espacio de almacenamiento común limitado para los artículos.

- ? **Inventario con Remanufacturación y Disposición Final:** Este fue el problema en donde se llevo a cabo el mayor trabajo para realizar la elaboración de un algoritmo, ya que se contaba con un conjunto reducido de artículos, y de un nivel académico avanzado. Como se explica en el documento de Análisis de Requerimientos (*Anexo 3*), en este problema hay una relación muy fuerte entre lo que es el beneficio económico y el beneficio ecológico, o sea la solución de costo mínimo no siempre produce el mejor resultado ecológico. En este sentido podemos marcar que los aportes realizados para este problema fueron dos:

1. Desarrollar un algoritmo que comprendiera todos los casos posibles del modelo presentado para el problema y la determinación de una solución para cada caso.
2. La introducción al problema del concepto que nosotros denominamos **radio de beneficio ecológico**. Con este término definimos la porción del costo de la solución de costo mínimo (óptima) que estamos dispuestos a sacrificar para obtener una solución más ecológica. Por ejemplo con un

radio de 0,1 estamos aceptando una solución 10% más cara, pero con más preferencia a la reparación que la original, asumiendo claro está que los procesos de reparación son ecológicamente menos dañinos que los de producción.

Sin duda alguna la introducción del concepto del radio ecológico ofrece un análisis más amplio de las posibles soluciones, que permiten definir una solución económicamente aceptable y ecológicamente más beneficiosa, siempre y cuando el problema lo admita.

- ? **Reemplazo de equipos:** Se elaboraron soluciones para dos problemas: reemplazo de un equipo y reemplazo de varios equipos. Para el primero, se propuso el método de costos variables, en el cual, los costos de mantener y reemplazar el equipo pueden variar a lo largo de los períodos a considerar, de esta forma. Para el segundo, se propuso la totalidad del método basándose en la formulación del problema como un grafo, el cual es recorrido para encontrar la solución óptima.

Por más detalle sobre aporte del proyecto ver los documentos de Estado del Arte, Propuestas y Análisis de Requerimientos (Anexos 1, 2 y 3)

A continuación enumeramos las experiencias y conocimientos adquiridos a lo largo del proyecto:

- ? Adquirimos experiencia en el proceso de llevar adelante un proyecto desde sus etapas iniciales, ya que se comenzó realizando una importante investigación de una serie de temas que eran desconocidos para todos los involucrados en el mismo. A esto, podemos agregar una profundización en el resto de las etapas del proceso de desarrollo de software, las cuales, en mayor o menor medida, ya conocíamos y habíamos puesto en práctica en cursos anteriores.
- ? Al tener que realizar un estudio y posterior selección de los métodos más comunes y representativos de los problemas de *inventarios*, *reemplazo* y *pronósticos*, se obtuvieron amplios conocimientos sobre estos temas, que consideramos de gran importancia para la formación profesional y académica.
- ? Moviéndonos a un terreno más técnico, podemos decir que durante las etapas de Diseño e Implementación, obtuvimos experiencia en desarrollo orientado a objetos (UML) y componentes (COM).
- ? Para el apropiado desarrollo de componentes, fue necesaria una etapa de capacitación la cual requirió aumentar los conocimientos que ya poseíamos en el lenguaje C++ para poder implementar estos componentes, así como el aprendizaje de nuevas herramientas de desarrollo como lo son Visual Basic, y Java entre otras.
- ? Obtuvimos experiencia en desarrollo de Web Services, que están tomando una importancia elevada en desarrollo de soluciones en la actualidad, más específicamente, adquirimos nociones de protocolos de comunicación (SOAP, http), XML, y Arquitectura Cliente-Servidor.

10. Trabajos futuros

Como ya se mencionó, en todo proyecto de software, existen puntos que quedan pendientes luego de la finalización del mismo, o diferentes aspectos que debieron ser eliminados durante la definición del alcance de dicho proyecto; consideramos que algunos de los siguientes puntos pueden ser de interés para trabajos futuros de taller o similares.

10.1. *Objetivos no cumplidos*

Se plantean a continuación aquellas partes del proyecto que pese a que fueron tenidas en cuenta como parte del desarrollo final, no pudieron ser alcanzadas.

Inventarios:

- ? Se tomó en consideración realizar una política de inventario en donde se tenían varios artículos que se trataban de forma independiente. Durante el transcurso del proyecto se decidió no implementar dicha política ya que no aportaba ningún tipo de conocimiento adicional porque la funcionalidad se puede obtener tratando cada uno de los artículos por separado.

Reemplazo:

- ? No se implementó la solución heurística para varios equipos ya que los mismos se trataban de forma independiente, por lo cual no aportaba ninguna funcionalidad adicional.

MRP:

- ? En el momento de elaborar las propuestas, se pensó en una funcionalidad para armar la Lista de Materiales, BOM para MRP pero durante el desarrollo de MRP se entendió que el mismo es un dato de entrada y no una funcionalidad a parte.

10.2. *Optimizaciones y mejoras*

En lo que sigue, se presentan lo que consideramos que pueden ser mejoras interesantes para aumentar el rendimiento de las funcionalidades que forman parte de las distintas bibliotecas.

- ? Aunque durante la etapa de análisis especificó que se suponía una correcta invocación a las bibliotecas por parte de las potenciales aplicaciones, igualmente se realizaron una serie de chequeos menores que permiten asegurar una cierta consistencia de los datos.

Adicionalmente, se brindó un documento de interfaces en donde se especifica el orden y las restricciones sobre los parámetros. A pesar de esto y como consideración general, se podría realizar un control más estricto de los parámetros con que se invocan a las bibliotecas. Como consecuencia de esto, también se podría realizar un mejor manejo de excepciones al momento de realizar las operaciones matemáticas, un ejemplo claro de esto es la excepción de DIVIDE BY ZERO, entre otras.

- ? Puede aumentarse el control sobre el manejo dinámico de memoria, más específicamente al momento de solicitar la misma.
- ? Debido a la orientación a objetos seguida en la implementación, con la utilización de estructuras de memoria dinámicas puede haber un bajo desempeño de los algoritmos, debido por ejemplo a las funciones de *get* y *set* y las asignaciones. Se puede reducir el impacto de tales funciones minimizando la utilización de las mismas en el código, por ejemplo copiando los objetos a estructuras locales como arrays y listas dinámicas una única vez.
- ? Para diversos métodos, pueden realizarse mejoras de performance mediante el uso de estructuras especialmente optimizadas para este fin como el *Array de Monge* [11] para las políticas de inventario.

10.3. Extensiones y nuevas funcionalidades

Lo que sigue a continuación son posibles extensiones a los problemas y soluciones ya implementadas, y problemas y soluciones que quedaron fuera de este proyecto por motivos de tiempo, o por su complejidad para el marco del mismo. Para la selección de los problemas y soluciones que se implementaron (*Ver Documento de Propuesta (Anexo 2)*), se tuvo en cuenta que al no existir antecedentes de talleres anteriores sobre este tema, seleccionar aquellos problemas más representativos y generales posibles, y el mismo criterio se usó para sus soluciones.

Inventario:

- ? En algunos de los modelos estocásticos se realizó una restricción en el tipo de demanda aceptada (exponencial y uniforme). Puede realizarse una extensión de estos métodos para soportar cualquier tipo de demanda o resolver algún otro caso en forma particular para aumentar la cantidad de distribuciones de demanda que se puedan seleccionar.
- ? Para muchos de los casos de inventario se puede ampliar el método implementado y realizar un estudio para los casos en que alguno de los costos de compra, producción o de inventario sufran variaciones con el tiempo de acuerdo a funciones no lineales o distribuciones de

probabilidad. Como es de esperarse esto agrega una complejidad importante a los métodos.

- ? Para algunos problemas podrían ampliarse las soluciones implementadas para permitir faltantes (*backlogging*^{*}), descuentos por cantidad (economía de escala) o artículos deteriorables.
- ? En los problemas de inventario abordados se asume una capacidad de compra o producción infinita, lo cual no siempre es verdad. No se tuvo en cuenta la capacidad de compra o producción, lo cual es un parámetro de importancia en estos casos, ya que indudablemente agrega complejidad a los modelos.
- ? Otra de las asunciones realizadas es que se supone un único depósito físico donde el o los artículos son mantenidos en inventario. Existen políticas que tienen en cuenta la existencia de varios depósitos geográficamente distribuidos, para determinar un plan de costo mínimo, las cuales obviamente son más complejas desde el punto de vista estructural y de tiempo de ejecución. Más aún cuando existe una relación de jerarquía entre estos depósitos, y la demanda puede ser tanto externa como inter-depósito. Este último caso es llamado Inventario Multi-Escalón, o *MultiEchelon Inventory System* en inglés [12].
- ? Los métodos heurísticos que se implementaron para los problemas de inventarios de revisión periódica son las que consideramos más importantes de las relevadas en la etapa de investigación. Sin ninguna duda existen otras que no se tuvieron en cuenta o que escaparon al proceso de investigación, pero que pueden ser incorporadas fácilmente a la implementación realizada.
- ? En el caso de inventario con remanufacturación y disposición final, la solución planteada es una ampliación del método clásico de *EOQ*^{*}, el cual se aplica para inventarios de revisión continua. También se puede realizar una ampliación del algoritmo de Wagner-Whitin para inventarios de revisión periódica, teniendo en cuenta que es un modelo más complejo que el primero.
- ? Los algoritmos presentados como solución, están basados en un estilo de programación clásico, orientado a objetos, pero existen para dichos problemas algoritmos basados en redes neuronales y algoritmos genéticos, entre otros, que pueden ser interesantes para problemas de inventario donde la solución óptima es difícil de obtener.
- ? Para el caso de varios artículos dependientes se puede extender la funcionalidad de *MRP*^{*} para políticas de revisión continua, por ejemplo *EOQ*^{*}. También se puede ampliar la implementación para políticas de inventario más complejas, como por ejemplo donde se

considera la capacidad de producción, o la posibilidad de remanufacturación para ciertos artículos.

- ? Para el caso de inventario de varios artículos dependientes se puede investigar sobre una política que determine un plan para cada artículo y que dicha solución sea de costo mínimo global, no como *MRP** que obtiene óptimos locales, lo cual no asegura la optimalidad global.

Reemplazo:

- ? Adaptar el algoritmo de varios equipos para que pueda aceptar costos por cada equipo de forma individual en vez de asumir que todos los equipos tienen similares características, y por tanto, iguales costos de mantenimiento y reemplazo.
- ? Adicionar criterios para cargar la matriz de costos en el caso de un equipo, además de costos constantes y costos variables. Los algoritmos que solucionan estos problemas, se basan en la carga de una matriz de costos; definiendo distintos criterios de carga de esta matriz, se tienen diferentes tipos de problemas.
- ? Algunos de los algoritmos de reemplazo (tanto de uno como de varios equipos) devuelven una única solución óptima aunque exista un conjunto de las mismas. Para estos casos, es posible llegar a devolver el conjunto de soluciones óptimas, de forma que el usuario pueda elegir la que más se adapte a sus necesidades

Pronósticos:

- ? Puede crearse una funcionalidad que calcule el error en que se incurre al generar un pronóstico para determinar la metodología que más se ajusta (minimiza el error) a un problema dado [1.13].
- ? Es posible lograr una interacción de las funcionalidades de pronósticos con las de inventarios de demanda probabilística, para que cuando la demanda es desconocida permita que sea pronosticada con el método apropiado.

Para una descripción más detallada de las extensiones y nuevas funcionalidades ver el documento de Estado de Arte y el de Propuestas

11. Índice de Anexos

A continuación se listan los documentos que figuran como anexos (los mismos se encuentran disponibles en el CD que forma parte de la entrega del proyecto, en archivos cuyos nombres coinciden con el nombre del documento).

- ? **Anexo 1: Estado del Arte**
- ? **Anexo 2: Documento de Propuestas a Implementar**
- ? **Anexo 3: Análisis de Requerimientos**
- ? **Anexo 4: Casos de Uso**
- ? **Anexo 5: Diseño**
- ? **Anexo 6: Casos de Uso Reales**
- ? **Anexo 7: Documentación técnica**
- ? **Anexo 8: Estándar de programación**
- ? **Anexo 9: Especificación de interfaces**
- ? **Anexo 10: Testeos**
- ? **Anexo 11: Definición y planificación del proyecto**
- ? **Anexo 12: Actas de Reuniones**

De la misma forma están presentes en el CD, identificados adecuadamente, los documentos que forman parte de las referencias aquí utilizadas, junto con otras que se utilizaron para el proyecto.

12. Referencias

[1]

Titulo: Introducción a la Investigación de Operaciones, (5ta. Edición)

Autores: Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman

Fuente: Editorial McGraw-Hill, ISBN 968-422-993-3

- [1.1] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.3 – Modelos Determinísticos – Revisión Continua, Demanda Uniforme
- [1.2] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.3 – Modelos Determinísticos – Revisión Continua, Demanda Uniforme – No se permiten faltantes
- [1.3] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.3 – Modelos Determinísticos – Revisión Continua, Demanda Uniforme – Se permiten faltantes
- [1.4] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.3 – Modelos Determinísticos – Revisión Continua, Demanda Uniforme – Descuentos por cantidad, no se permiten faltantes
- [1.5] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.4 – Modelos Estocásticos – Modelo de un período sin costo de preparación
- [1.6] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.4 – Modelos Estocásticos – Modelo de varios períodos - Revisión Global – Modelo de revisión continua con tiempos de entrega fijos
- [1.7] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.4 – Modelos Estocásticos – Modelo de varios períodos - Revisión Global – Modelo de revisión continua con tiempos de entrega fijos, sin faltantes
- [1.8] Capítulo 18 – Teoría de Inventarios
Sección 18.4 – Modelos Estocásticos – Modelo de varios períodos - Revisión Global – Variación del modelo de varios períodos - Sin costo de preparación
- [1.9] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.3 – Series de Tiempo
- [1.10] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.4 – Técnicas de pronósticos para modelos de nivel constante
- [1.11] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.5 – Técnicas de pronósticos para modelos de tendencia lineal
- [1.12] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.6 – Técnicas de pronósticos para modelos de nivel constante con efecto estacional
- [1.13] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.7 – Errores de pronóstico
- [1.14] Capítulo 19 – Pronósticos
Sección 19.9 – Regresión Lineal – Método de Mínimos Cuadrados

[2]

Titulo: *Investigación de Operaciones - El arte de la toma de decisiones*

Autores: Kamlesh Mathur, Daniel Solow

Fuente: Prentice Hall – 1996 – ISBN: 968-880-698-6

- [2.1] Capítulo 12 – Modelos de Inventarios
Sección 12.3 – El Modelo de inventarios de cantidad de Pedidos Económicos (EOQ)
- [2.2] Capítulo 12 – Modelos de Inventarios
Sección 12.6 – Sistemas de Inventarios con Demanda Probabilística: El Modelo de Revisión Continua.
- [2.3] Capítulo 12 – Modelos de Inventarios
Sección 12.7 – Sistemas de Inventarios con Demanda Probabilística: El Modelo de Revisión Periódica.

[3]

Titulo: *Material Requirements Planning Production & Inventory Management* (2da. Edición)

Autores: Donald W. Fogarty, Jhon H. Blackstone, Thomas R. Hoffmann

Fuente: South Western Publishing Co., Cincinnati, Ohio- ISBN: 0-538-07461-2

[4]

Titulo: *Métodos y modelos de investigación de operaciones*

Autores: Dr. Juan Pradwa Witenberg

Fuente: Editorial Limusa México, ISBN 968 – 18 – 1247 – 6

- [4.1] Sección 2.1, Elementos de un sistema de inventarios
- [4.2] Sección 2.2.3, Inventario de varios productos con demanda constante, revisión continua y limitaciones de espacio de almacenamiento
- [4.3] Sección 2.2.4.2, Modelo Especial de Wagner-Whitin

[5]

Titulo: *Analysis of the EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers*

Autores: Knut Richter

Fuente: *European Journal of Operational Research* 96 (1996) 313 - 324

[6]

Titulo: *Pure and mixed strategies for the EOQ repair and waste disposal problem*

Autores: Knut Richter

Fuente: *OR Spektrum* (1997) 19: 123 - 129

[7]

Titulo: *The EOQ repair and waste disposal model with integer setup numbers*

Autores: Knut Richter

Fuente: *International Journal of Production Economics* 59 (1999) 463 - 467

[8]

Titulo: The extended EOQ repair and waste disposal model

Autores: Knut Richter

Fuente: International Journal of Production Economics 45 (1996) 443 - 447

[9]

Titulo: Investigación de Operaciones – Aplicaciones y Algoritmos

Autores: Wayne L. Wingstone

Fuente: Grupo Editorial Iberoamericano, ISBN: 970 – 625 – 029 – 8

- [9.1] Capítulo 20 – Programación Dinámica Determinística
Sección 20.5 Problemas de Reemplazo de Equipo
- [9.2] Capítulo 20 – Programación Dinámica Determinística
Sección 20.5 Problemas de Reemplazo de Equipo – Representación en
forma de Red del problema de Reemplazo de Equipo

[10]

Titulo: Silver Meal Heuristic

Autores: Desconocido

Fuente: <http://www.tsrcom.com/users/jfschm/silver-meal.htm>
<http://www.mcs.vuw.ac.nz/courses/STAT131/2000/problems/inventory/lectures/DPinventory.html>

Fecha último acceso: 19/09/2001, 17:15

[11]

Titulo: Improved Algorithms for Economic Lot Size Problems

Autor: Alok Aggarwall, James K. Park

Artículo: Operations Research, 41 N° 3, May-June 1993

- [11.1] Sección 1.1. –The Basic Model
- [11.2] Sección 1.2. – The Backlogging Model

[12]

Titulo: Multi-Echelon Models for Repairable Items: A Review

Autores: Angel Díaz, Michael C. Fu

Fuente: <http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/905/http:zSzzSzwww.mbs.umd.edu:zSzMSSzSzmfuzSzwpaperszSzdziazfu.pdf/multi-echelon-models-for.pdf>

Fecha último acceso: 28/06/2002, 11:05

Glosario

A

Administración de Inventarios: Técnica que intenta definir cuando debe reabastecerse un *inventario* y cuantos *productos* deben ordenarse.

Artículo. Cualquier bien que puede ser producido (fabricado) u ordenado (mediante una compra).

B

BOM (Bill of Materials): Estructura que indica como se compone un producto final a partir de sus subpartes o *componentes*. Indica como se compone cada una de estas subpartes de forma recursiva hasta llegar a las *materias primas* o *productos básicos*.

Backlogging Demand: Extensión de los modelos básicos de inventarios en los que se permite que la *demanda* de un período sea satisfecha por la producción de *períodos* siguientes.

C

Componente: *Artículo* que toma parte en el ensamblaje de una unidad de otro artículo. Un artículo que es componente, puede ser también un *producto final*, en este caso la demanda del período es la suma de la *demanda* por producto final más la determinada por los *requerimientos de red*.

Conjunto Convexo: Un conjunto S es convexo cuando $x, y \in S$ y $\alpha \in [0,1]$ se cumple que $\alpha x + (1-\alpha)y \in S$.

Costo de Almacenamiento (o almacenaje): Véase *Costo de Mantenimiento*.

Costo de Capital Invertido: Porcentaje del valor en moneda de la cantidad total de artículo en inventario que se ganaría si el mismo monto estuviera generando intereses en una entidad bancaria.

Costo de Mantenimiento: Costo por mantener los *artículos* en *inventario*

Costo de Preparación: Costo fijo por colocar una *orden* de producción o un *orden* de compra.

Costo por Faltantes: Costo en que se incurre al no poder satisfacer la *demanda*.

Costo por Unidad (o unitario): Costo por producir un artículo que luego será mantenido en inventario.

Costos de Producción (ordenamiento) cóncavos: los costos cóncavos son característicos de todos los procesos de producción donde existen economías de escala, es decir, donde el proceso se hace más eficiente (los costos marginales tienden a disminuir) con el tiempo o con el volumen de producción (ordenamiento).

Costo por ingreso perdido: Véase *costo por faltantes*.

D

Demanda: la demanda indica la cantidad de artículos requeridos en un cierto tiempo, para un determinado uso. Existen tres clases de demanda:

1. *Demanda Determinística Constante:* Demanda que se conoce con exactitud a lo largo de todos los períodos de tiempo considerados, y no varía.
2. *Demanda Determinística Variable:* Demanda que se conoce con exactitud a lo largo del tiempo, pero que puede variar de un período a otro.
3. *Demanda Probabilística Conocida:* Demanda que no se conoce con exactitud a lo largo del tiempo, pero se conoce su distribución de probabilidad.
4. *Demanda Probabilística Desconocida:* Demanda que no se conoce con exactitud a lo largo del tiempo y que debe aproximarse o ajustarse a una distribución de probabilidad conocida.

Demanda insatisfecha: Porción de la demanda de un periodo que no pudo ser cubierta con el inventario disponible en dicho periodo.

Descuento Por Cantidad: descuento en el *costo de unitario* que se realiza a un *producto* cuando la cantidad ordenada es mayor a un valor determinado.

Disposición Final: Característica de ciertos sistemas de inventarios en los cuales los productos (o parte de los mismos), luego de ser comprados por los clientes, son devueltos y con un cierto criterio de decisión, son desechados.

E

EOQ: Modelo de *Inventario con Demanda Determinística de Revisión Continua*, en que se tiene un único *artículo*, los *tiempos de entrega* son Determinísticos y no existen *costos por faltantes*, pero presenta *costos de preparación, unitario y de mantenimiento*.

Economía de Escala: Característica que indica que los procesos de producción son más eficientes, o sea los costos marginales tienden a disminuir, cuando el

volumen de producción o el tiempo aumentan.

ELSP: En español, Problema del Lote Económico. Se le denomina al modelo propuesto por Manne, Wagner y Whitin, para la resolución del problema de inventarios de revisión periódica de horizonte de planeación finito.

Equipo: Cualquier elemento (por ejemplo maquinaria) que envejece con el uso y que tiene asociado un costo al operar normalmente.

Existencias de Seguridad: Véase *Stock de Seguridad*.

F

Faltantes: porción de la *demanda* que no puede ser satisfecha en un *período* de tiempo dado.

Función Convexa: Una función $f(x)$ definida sobre un *conjunto convexo* S es convexa cuando verifica la siguiente condición: $\forall x, y \in S, \forall \lambda \in [0,1]$ se cumple $f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)$

Función Cóncava: Una función $f(x)$ es cóncava si y solo si su opuesta es convexa, o sea $-f(x)$ es convexa

H

Heurístico: Método o procedimiento alternativo que lleva a una solución no necesariamente óptima de un problema, pero que se espera que sea suficientemente adecuada para satisfacer ciertos criterios establecidos.

Horizonte de Planeamiento: Cantidad unidades de tiempo para las cuales se desea generar un Plan.

I

Inventario: conjunto de artículos o productos que serán utilizados o comprados por algún cliente y que son almacenados hasta el momento de su utilización. Este almacenamiento involucra costos para la empresa.

Inventario con Remanufacturación y Disposición Final: Es un caso *inventario* donde la demanda puede ser satisfecha con artículos reparados, y donde los artículos son desechados sino pueden ser reparados. Tanto la reparación como la disposición insumen costos positivos.

Inventario inicial: Es el inventario disponible al principio de un *período*.

L

Liberación de Orden: momento en el tiempo en que se considera enviada una orden al proveedor del artículo.

Limitación de Espacio: Restricción que se aplica a la cantidad de *artículos* que pueden ser mantenidos en *inventario*, dada por la capacidad del lugar donde estos son almacenados.

M

MRP (Material Requirement Planning): En español, Plan de Requerimiento de Materiales. Técnica para determinar una *política de inventario*, aplicable a sistemas de inventarios de varios *artículos* en los que la *demanda* de dichos artículos es dependiente (algunos artículos son partes componentes de otros).

Mantenimiento: Decisión que consta de no sustituir un equipo con un determinado tiempo de uso por un equipo nuevo.

Mantenimiento de Equipos (Problema de): Conjunto de problemas que intentan determinar cuando es conveniente reemplazar uno o más equipos usados por uno o más equipos nuevos, de forma de lograr un plan de recambio de costo mínimo

N

Nivel de Inventario: Medida que expresa la cantidad en inventario de un *artículo* en un período dado. Esta medida puede ser un promedio del volumen de *stock* durante el período, o puede ser un valor arbitrario, por ejemplo, cantidad al final o al comienzo de un *período*.

Nivel de Servicio: Valor porcentual que indica que porcentaje de la *demanda* se quiere satisfacer cuando se está frente a una *Demanda Probabilística*.

NP-Duros: Un problema es NP-duro cuando se puede reducir en forma polinomial a un problema NP, o sea es tan o más duro que un problema NP.

NP: Es la clase de problemas de decisión donde podemos verificar las soluciones en tiempo polinomial pero no determinar cuales son en este tiempo.

O

Orden de Manufacturación (o de compra): Cantidad de *artículos* que se solicita

sea producida (o comprada) en un momento dado del tiempo..

P

Pedido: Véase *Orden*.

Período: Intervalo de tiempo tras el cual debe tomarse una decisión (mantener, reemplazar, ordenar, etc).

Período de Decisión: Período en el cual se libera una *orden* por una determinada cantidad de *artículos*.

Plan: Conjunto de acciones a tomarse en cada uno de los períodos $1..T$, con $T?I$.

Política de Inventarios: Técnica que determina un *plan* a seguir para la *Administración de Inventarios*.

Política de Mantenimiento: Véase *Política de Reemplazo*.

Política de Reemplazo: Técnica que permiten decidir hasta cuando es conveniente mantener en funcionamiento con el *costo de mantenimiento* correspondiente, un *equipo* antes de reemplazarlo por uno nuevo.

Política de Revisión: Técnica utilizada para controlar los *artículos* existentes en el *inventario*.

Producto: Véase *Artículo*.

Producto Final: *Artículo* para el cual se establece la *demand*a en un *período* independientemente de la demanda de los demás artículos, y que determina la demanda de otros artículos llamados *componentes*, en los casos que se requiera de otros artículos para formar una unidad del *producto final*.

Producto Primario: *Artículo* que no determina demanda periódica sobre otros artículos.

Pronóstico: Técnica mediante la que se intenta predecir cual será el comportamiento futuro de alguna variable aleatoria de interés.

Punto de Nuevos Pedidos: Véase *Punto de Reorden*.

Punto de Reorden: *Nivel de Inventario* en el cual es necesario colocar una nueva *orden* para poder cubrir la *demand*a.

R

Recepción Asignada: se le denominan recepciones planeadas, a aquellas recepciones que no se relaciona con una liberación de orden llevadas a cabo en

un plan anterior al buscado.

Recepción Planeada: se le denominan recepciones planeadas, a aquellas recepciones que se corresponden con una orden liberada durante el plan buscado.

Reemplazo: Decisión que consta de sustituir un equipo con un determinado tiempo de uso por un equipo nuevo.

Remanufacturaación: Característica de ciertos sistemas de inventarios en los cuales los productos luego de ser comprados por los clientes, son devueltos y reprocesados de forma que pueden volver a ser considerados como productos nuevos.

Requerimiento Bruto: Demanda de un artículo que se obtiene como la diferencia entre la demanda original y el nivel inicial de inventario del artículo.

Requerimientos de Red: Demanda de un artículo originada por la demanda de otro artículo del cual el primero es componente.

Revisión Continua: Política de revisión en la cual el inventario se controla continuamente en el tiempo.

Revisión Periódica: Política de revisión en la cual el inventario se controla en puntos fijos del tiempo.

S

Stock: Véase *Inventario*.

Stock de Seguridad: Cantidad de artículos que se mantienen en inventario como respaldo para poder cubrir una *Demanda Estocástica* con un *Nivel de Servicio* dado.

Serie de Tiempo: Representación de una variable aleatoria de interés a lo largo de un período fijo, registrada a intervalos igualmente espaciados.

T

Tasa de Disposición: Porcentaje de los artículos de un lote devuelto al establecimiento de producción que deben ser desechados.

Tasa de Remanufacturaación: Porcentaje de los artículos de un lote devuelto al establecimiento de producción que pueden ser acondicionados para su futura reutilización.

Tendencia Constante: Comportamiento de una variable aleatoria cuando sus valores oscilan alrededor de un valor medio.

Tendencia Estacional: Comportamiento de una variable aleatoria cuando sus valores se repiten en forma periódica de forma predecible.

Tendencia Lineal: Comportamiento de una variable aleatoria cuando sus valores presentan un comportamiento creciente oscilando alrededor de una recta con pendiente positiva..

Tiempo de Entrega (o líder): Tiempo que transcurre entre la emisión de una *Orden* de compra o manufacturación de un producto y el momento en que este llega al *Inventario*.

Tiempo entre pedidos: Tiempo que transcurre entre la liberación de dos *ordenes* consecutivas.

Tiempo Líder: Véase *Tiempo de Entrega*.

V

Valor de Recuperación: Valor en el que puede ser vendido un *equipo* luego de ser usado por un cierto *período* de tiempo.

Valor de Salvamento: Véase *Valor de Recuperación*.