



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA
DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA APLICADA
Y ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS



TESIS DOCTORAL

**EL SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA EN LA
EMPRESA: ANÁLISIS Y APLICACIONES**

Sergio Rubio Lacoba

Directores:

Dr. D. Tomás M. Bañegil Palacios

Dr. D. Albert Corominas Subias

Edita: Universidad de Extremadura

Servicio de Publicaciones

c/ Pizarro, 8

Cáceres 10071

Correo e.: publicac@unex.es

<http://www.pcid.es/public.htm>

*Memoria presentada para optar al título de Doctor por la
Universidad de Extremadura en el Departamento de Economía
Aplicada y Organización de Empresas.*

Badajoz, 5 de mayo de 2003.

AGRADECIMIENTOS

Como todos sabemos, la realización de una tesis doctoral puede ser un largo camino en el que vamos intentado superar problemas y dificultades, no siempre con éxito. Pero, afortunadamente, también resulta ser un camino de encuentro con personas que te ayudan y animan a seguir caminando y a los que hoy tengo que agradecer su amistad y su afecto.

En primer lugar, gracias a mis directores de tesis que han contribuido, de manera decisiva, a que este proyecto llegara a buen término. Gracias Tomás por abrirme las puertas del área y por contar conmigo para el proyecto de trabajo en el que estamos inmersos. Gràcies Albert per accedir a participar en aquesta investigació i, sobretot, per la teva disponibilitat contínua i la teva proximitat, a pesar dels quilòmetres.

Gracias a mis amigos y compañeros del Departamento de Economía Aplicada y Organización de Empresas y especialmente a Víctor, Antonio, Francis, Javi, Jesús, Juan, Luisre, María, Miguel Ángel, Óscar y Ramón, con los que seguiré “alimentando mi colesterol”.

Gracias al profesor Santiago Zapata por ofrecerme la posibilidad de iniciar mis estudios de tercer ciclo y con ello conocer a mis amigos Baltasar, Jesús y José Luis, gracias a los cuales sigo escribiendo estas líneas.

Gracias a mi gente de Cáceres por seguir estando ahí, a pesar de mi falta de dedicación a ellos durante los últimos meses.

Gracias a mis padres, Carmen y Ginés, auténticos promotores de esta tesis, y a mis hermanos, María, Titín y Mariano, que tan importantes son en mi vida. Este trabajo es un poco, o un mucho, fruto de todos vosotros y a todos vosotros va dedicado el mismo, pero especialmente ...

a Inma, mi compañera de vida.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	2
1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	7
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	16
CAPÍTULO II: LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO Y SU GESTIÓN EMPRESARIAL	19
2.1. INTRODUCCIÓN	20
2.2. RAZONES PARA LA RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS FUERA DE USO	21
2.2.1. Motivos legales	22
2.2.2. Motivos económicos	27
2.3. LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA	30
2.3.1. Logística de devoluciones y Logística para la recuperación	36
2.3.2. Opciones para la gestión empresarial de PFU	38
2.3.2.1. Opciones de gestión para las devoluciones	38
2.3.2.2. Opciones de gestión para los productos recuperados	40
2.4. IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS, TÁCTICAS Y OPERATIVAS DE LA RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS FUERA DE USO	46
2.5. EL DISEÑO DE LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA.....	53

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO	60
3.1. INTRODUCCIÓN	61
3.2. SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA: CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIONES	62
3.3. MODELOS CUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA	70
3.3.1. Modelos para la reutilización	71
3.3.2. Modelos para el reciclaje	73
3.3.3. Modelos para la refabricación	78
3.4. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA	82
3.4.1. El diseño de modelos de logística inversa.....	82
3.4.2. Incertidumbre en los sistemas de logística inversa	89
3.4.3. Dinámica en los sistemas de logística inversa	94
3.5. PROPUESTAS PARA LA MODELIZACIÓN DE SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA	98

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS CUANTITATIVO DE UN SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA	102
4.1. INTRODUCCIÓN	103
4.2. MODELOS DE GESTIÓN DE INVENTARIOS CON FLUJO DE RETORNO	105
4.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	107
4.3.1. Modelo Forward	114
4.3.2. Modelo Reutilización	116
4.3.3. Modelo Refabricación	127
4.4. SIMULACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN DE INVENTARIO CON FLUJO DE RETORNO DE PFU	129
CAPÍTULO V: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: ANÁLISIS DESCRIPTIVO	135
5.1. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	136
5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DESCRIPTIVO	138
5.2.1. Modelo Forward	138
5.2.2. Modelo Reutilización	143
5.2.3. Modelo Refabricación	154

CAPÍTULO VI: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

ANÁLISIS COMPARATIVO	171
6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO	172
6.1.1. Cambios en el tamaño de lotes de originales (Q).....	178
6.1.2. Cambios en los plazos de entrega	179
6.1.2.1. De originales: LT_{FAB}	179
6.1.2.2. De refabricados: LT_{PFU}	181
6.1.2.3. De ambos simultáneamente	183
6.1.3. Cambios en el tiempo de consumo (n).....	185
6.1.4. Cambios en la tasa de recuperación de PFU (p)	189
6.1.5. Cambios en el coste de la demanda insatisfecha (C_F).....	193
6.2. VARIACIONES EN EL MODELO	200
6.2.1. El papel de las expectativas de retorno de PFU	200
6.2.2. Demanda estacional	208
CAPÍTULO VII: RESUMEN Y CONCLUSIONES	215
7.1. RESUMEN	216
7.2. CONCLUSIONES	218
7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	221
APÉNDICE GRÁFICO.....	223
BIBLIOGRAFÍA	269

ÍNDICE DE CUADROS.....	285
ÍNDICE DE TABLAS	285
ÍNDICE DE FIGURAS	286
ÍNDICE DE GRÁFICOS	286

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

- 1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.**
- 1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.**
- 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.

El objetivo principal de esta investigación es describir y analizar la denominada *Logística Inversa o Función Inversa de la Logística*, estudiando las principales consideraciones que una empresa debe tener presente en el diseño, desarrollo y control de esta actividad para la obtención de ventajas competitivas de carácter sostenible.

El origen de esta investigación reside en la existencia de un interés, cada vez mayor, por las relaciones entre empresa y medio ambiente (Burgos y Céspedes, 2001), que en muchas ocasiones suscita una percepción crítica de las mismas por parte de los agentes sociales (Aragón-Correa, J. A., en Morcillo, P. y Fernández J., 2002). Entre todos los aspectos que podemos considerar a la hora de analizar el papel que desempeña la empresa en su relación con el entorno ambiental, uno de los más estudiados, quizá por su importancia para el bienestar actual y futuro de la sociedad, es la gestión de los residuos generados por las empresas en el ejercicio de su actividad. Éstas, a lo largo de

su proceso de operaciones (aprovisionamiento, producción, almacenaje, distribución), realizan múltiples tareas en las que generan una serie de subproductos que, en un primer momento, no tenían otro destino final que el vertedero. Hasta no hace mucho tiempo, existía muy poca preocupación por la cantidad y calidad de estos subproductos que en su mayor parte eran directamente desechados, convirtiéndose así en residuos industriales con importantes efectos negativos sobre el medio ambiente.

Desde hace ya algunas décadas se ha empezado a observar la importancia que tiene, desde el punto de vista ambiental y desde el punto de vista económico, la gestión responsable y adecuada de los residuos industriales. Las empresas, inducidas principalmente por una legislación cada vez más restrictiva en términos de generación de residuos, empiezan a considerar la utilización de procesos productivos más limpios en los que se reduzca la cantidad de materias primas empleadas, se generen menos residuos, se racionalice el uso de las fuentes de energía, etc., obteniéndose así mayores cotas de bienestar medioambiental. Indudablemente aún no se han conseguido avances significativos en términos absolutos, existiendo cuestiones en las que resulta cada vez más complicado obtener compromisos firmes por parte de ciertos colectivos y entidades.

Quizá una de las principales razones por las que aún no se han logrado resultados exitosos en este sentido, sea que la gestión de los residuos comporta unos costes económicos para las empresas que, en muchas ocasiones, prefieren *pagar por contaminar* y de esta forma evitar la, en principio, onerosa gestión de los residuos que generan. Esto nos parece, sin embargo, una visión demasiado simple y miope del problema aquí planteado. No es descabellado pensar que con las actuales tasas de producción y consumo, donde los recursos naturales son cada vez más escasos, la generación de residuos es cada vez mayor y las posibilidades de eliminación directa se reducen, puede llegar un momento de colapso al estilo del previsto por Meadows,

Meadows y Randers (1972 y 1992), en donde se pronosticaba que, al ritmo actual de consumo de recursos naturales y de acuerdo con las tasas de crecimiento económico y demográfico, se produciría una situación de insuficiencia de recursos alimenticios, agotamiento de los minerales más importantes, superpoblación, contaminación y en general un profundo deterioro de la calidad de vida, para mediados de este siglo. Ciertamente que este informe puede ser criticado ferozmente, como de hecho así ha sido, pero debe ser una invitación a la reflexión serena sobre este tema.

La industria es uno de los actores principales en la generación de residuos y de hecho numerosos autores, aun asumiendo la existencia de una responsabilidad compartida entre, al menos, empresas, gobiernos y consumidores, señalan que el papel de las empresas en la lenta degradación del planeta es particularmente relevante (Schmidheiny, 1992; Hawken, 1993; Klassen, 1993; Shrivastava, 1995). De esta forma, parece razonable pensar que la empresa debe tener también un papel protagonista en las actividades de gestión de los residuos y subproductos generados en sus procesos industriales y empresariales, para lo cual es fundamental que la gestión de éstos no menoscabe la posición competitiva de aquélla. Así, la empresa no actuaría mediatizada por presiones sociales ni por imposiciones normativas, sino que estaría desarrollando una actividad, la gestión de sus residuos, con el objetivo de obtener un beneficio económico.

Sin embargo, la empresa no sólo debe responsabilizarse de la adecuada gestión de los subproductos y residuos generados en el ejercicio de su actividad sino que también es responsable, como veremos más adelante, de aquellos productos puestos en manos del consumidor y que han dejado de satisfacer las necesidades de éstos: los denominados *Productos Fuera de Uso* (PFU). Éstos pueden aún incorporar un valor añadido susceptible de ser recuperado por la empresa y reintroducido en su ciclo de operaciones, de manera que por una parte se obtenga un beneficio económico al

aprovechar el valor del PFU y por otra, se contribuya a mejorar las condiciones ambientales de nuestro entorno. La problemática que subyace en el proceso de recuperación y aprovechamiento de estos PFU es lo que, grosso modo, analiza el concepto de logística inversa y que constituye el objetivo principal de nuestro trabajo.

La posibilidad de recuperar y aprovechar los residuos generados en los procesos productivos se comenzó a considerar realmente a partir de la década de los años 70 del siglo XX. Desde entonces, las empresas se han preocupado, en mayor o menor medida, por adaptar su proceso de operaciones para reducir el consumo de materias primas, disminuir la generación de residuos e intentar recuperar la mayor parte de éstos a través, principalmente, de actividades de reciclaje.

Puede resultar natural que la propia empresa se responsabilice de la gestión de los residuos generados durante los procesos de aprovisionamiento, fabricación, almacenamiento y distribución ya que, a fin de cuentas, es ella la que desarrolla esas funciones obteniendo por ello un rendimiento económico; pero además, y esta es una de las propuestas que hacemos, la empresa debe ser co-responsable en el proceso de gestión de los residuos generados por sus productos una vez que éstos han sido consumidos por los clientes. Las empresas, ya sean de forma individual o colectivamente, se encuentran más y mejor dotadas para hacer frente a la adecuada gestión de los residuos que se generan a lo largo de su cadena de suministro, incluidos los de la fase de consumo, por lo que sus compromisos para con estas actividades deberían ser mayores que los del resto de participantes en la cadena. Naturalmente no debemos, ni queremos tampoco, plantear una responsabilidad exclusiva de las empresas en este sentido (tampoco creo que pudiéramos) y por eso, a lo largo de todo este trabajo de investigación haremos especial hincapié en el hecho de que la gestión de estos residuos es una tarea común a toda la sociedad y en la que todos los miembros de la

cadena de suministro deben asumir un papel esencial, cada uno en su justa medida, pero sin eludir responsabilidades.

Sin embargo, esta asunción de responsabilidades por parte de las empresas no tiene porqué constituir una gravosa carga que afecte a sus resultados. Naturalmente, las empresas desarrollan su actividad con el fin de alcanzar determinados objetivos, entre ellos, la obtención de un beneficio empresarial que pretenden sea máximo; por lo tanto, las actividades que se planteen deben ser económicamente rentables para que sean llevadas a la práctica. En este sentido, nuestro trabajo justificará la tesis de que las actividades empresariales encaminadas a la recuperación y gestión de los productos que finalizan su vida útil, suponen una oportunidad de negocio para las empresas y permiten la consecución de ventajas competitivas sostenibles, por lo que estas actividades de recuperación deben contemplarse a la hora de formular el plan estratégico de la organización.

Desde hace ya algunos años, las empresas han ido tomando conciencia de las oportunidades que plantean los productos desechados por los consumidores: envases y embalajes, aparatos eléctricos y electrónicos, vehículos, neumáticos, etc. La recuperación de estos productos fuera de uso estaría generando un beneficio para las empresas y, simultáneamente, se estaría dando solución al problema de la adecuada eliminación de los residuos resultantes en el consumo.

En definitiva, nuestro objetivo es estudiar y analizar los procesos de recuperación de los productos desechados por los consumidores (productos fuera de uso, PFU) y las opciones de que disponen las empresas para la adecuada gestión de éstos, de manera que se obtenga un valor añadido para la empresa, en términos económicos, y para la sociedad en términos medioambientales. Estableceremos, asimismo, las implicaciones estratégicas, tácticas y operativas motivadas por la

recuperación de estos PFU, generadoras de ventajas competitivas sostenibles para la empresa. A través de un enfoque integral, describiremos como un todo la actividad operativa de las empresas, tanto en el sentido productor-consumidor (función directa de la logística) como en el sentido consumidor-productor (función inversa de la logística). De esta forma pretendemos justificar la realización de esta tesis doctoral y el desarrollo de nuevas líneas de investigación en el área de organización de empresas.

Para ilustrar este trabajo realizaremos un análisis cuantitativo de distintos sistemas logísticos en los que se considera esta función inversa y que nos permitirán explicar los mecanismos de funcionamiento existentes, y cómo afrontar los retos que plantea la recuperación de los productos fuera de uso por parte de las empresas.

1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.

La recuperación de productos usados o desechados no es algo nuevo y, seguramente, sea tan antiguo como el propio hombre que ya en la Edad de Piedra utilizó las esquirlas obtenidas en la fabricación de sus herramientas como puntas para sus flechas. Las antiguas culturas mesopotámica, inca, azteca, griega o romana ya utilizaban habitualmente técnicas de reciclaje en su actividad cotidiana. Por ejemplo, las monedas locales de las ciudades conquistadas eran fundidas en nuevas monedas, aunque en ocasiones, dichas monedas ni siquiera eran sometidas a un proceso de reciclaje, volviendo a ser puestas en circulación una vez se estampaba en ellas el sello del nuevo regente. Otros ejemplos los podemos encontrar en las armas utilizadas en la batalla que se reconvertían en instrumentos agrícolas o se fundían para la fabricación de nuevas armas. No estamos inventando nada nuevo, sencillamente intentamos volver a rentabilizar parte de nuestro sentido común.

Con la Revolución Industrial se inicia el proceso de crecimiento económico basado en la tecnología. La Revolución Industrial desató, no sólo, el auge económico, científico y técnico, sino que, con ésta, se promulgó el uso intensivo, extensivo e irracional de los recursos naturales en busca de modelos de acelerado crecimiento económico.

Durante muchos años, y antes de que la Revolución Industrial marcara para siempre el desarrollo de la humanidad, la industria primitiva no se constituía como un factor importante de deterioro ambiental. Las primeras industrias utilizaban el carbón como principal fuente energética y aunque provocaban grandes cantidades de gases resultaban poco significativas. Igualmente, los procesos tradicionales de producción y explotación del suelo y subsuelo, permitían la renovación y conservación natural de los mismos, ya que tales procesos eran extremadamente rudimentarios, y no provocaban devastación ni aniquilamiento de los recursos.

Sin embargo, con la Revolución Industrial, los nuevos mecanismos y formas de producción, junto con la explotación intensiva y sistemática de los recursos naturales, se fueron generalizando sin prever los efectos de la misma sobre el medio ambiente. Durante muchos años la imagen de cientos de chimeneas arrojando humo ha representado el símbolo del progreso y la consolidación del poderío económico.

Aunque a finales de los años 50 y principios de los 60 empezó a manifestarse una conciencia medioambiental, no es hasta la década de los 70 cuando los procesos de deterioro ambiental y agotamiento de los recursos naturales se hacen evidentes, así como los costes asociados. De esta forma, se empiezan a buscar, por un lado, formas alternativas de crecimiento y desarrollo económico que eviten continuar con los procesos de deterioro ambiental, y por otro lado, mecanismos que permitan la recuperación y saneamiento del medio ambiente.

A partir fundamentalmente de los años 80, la sociedad intenta modificar progresivamente actitudes y normas de conducta que le permitan obtener mejoras en su entorno ambiental, o al menos reducir el impacto negativo que ejerce sobre el medio ambiente. De esta forma, términos tales como contaminación, impacto ambiental, efecto invernadero, residuos, reciclaje, agricultura ecológica o ahorro energético se han hecho habituales en nuestras conversaciones. El mundo industrial y empresarial no han sido ajenos a esta situación y han comenzado a considerar los aspectos ambientales y ecológicos como variables de decisión a la hora de formular su estrategia empresarial. Un dato significativo de este interés de las multinacionales y los grandes grupos empresariales por el medio ambiente, es la inclusión de una memoria medioambiental dentro de la información que ofrecen a sus accionistas. Bien es cierto que esta actuación viene condicionada, principalmente, más por imperativos legales que de mercado pero, en cualquier caso, cada vez son más las empresas que incorporan en su gestión consideraciones medioambientales realizadas tanto por los mercados como por la legislación actual: “el modelo socioeconómico se está transformando en un modelo económico socio-ecológico por lo que la empresa actual, para ser competitiva, debe conseguir entrelazar bien la calidad, la innovación y el medio ambiente” (Bañegil y Rivero 1998, 97).

Del mismo modo, las administraciones públicas han comenzado a asumir las demandas sociales planteadas al respecto, adoptando medidas tendentes a reducir el impacto negativo de la actividad humana sobre su entorno natural. Entre estas acciones destacan las destinadas a disminuir la generación de residuos, incentivando las actividades de recuperación, reciclaje y reutilización de los productos. En este sentido, la Unión Europea ha formulado el *VI Programa de Medio Ambiente*, para el periodo 2001-2010, en el que se establecen, entre otras cuestiones, unos objetivos concretos con relación a la gestión de residuos y una estrategia para alcanzarlos.

De acuerdo con las recomendaciones realizadas por la Unión Europea a sus estados miembros, España ha desarrollado en los últimos años un conjunto de normas y leyes que intentan alcanzar estos objetivos. Entre otras cabe citar la *Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases*, la *Ley 10/1998, de 22 de abril, de Residuos* y el *Plan Nacional de Residuos Urbanos*. Del mismo modo, las distintas Comunidades Autónomas incorporan a su repertorio normativo estas consideraciones ambientales. La Comunidad Autónoma de Extremadura, por ejemplo, ha elaborado el *Plan Director de Gestión Integrada de Residuos* (Diario Oficial de Extremadura nº 20 de 17 de febrero de 2001), en el que se establecen las actuaciones a desarrollar para la adecuada gestión de los residuos en el ámbito regional. Todas estas leyes y normativas se fundamentan en la jerarquía para la gestión de los residuos establecida por la Unión Europea: prevención, recuperación y eliminación.

Como podemos comprobar, no se trata de una moda por lo verde ni de algo temporal o pasajero, ya que las consideraciones e implicaciones medioambientales son parámetros que autoridades, empresas y consumidores han incorporado a su proceso de toma de decisiones. Concretamente, la gestión de residuos se ha revelado como uno de los principales campos de actuación para las empresas, que han comenzado a considerar cuestiones tales como producción limpia, reducción de consumo de materias primas, diseño para el medio ambiente, reutilización de productos, envases y embalajes, etc., con el objetivo de disminuir la cantidad final de los residuos generados durante su actividad económica y gestionar adecuadamente su eliminación.

La gestión de residuos es un área de investigación demasiado amplia en la que se entremezclan distintas áreas de conocimiento. El planteamiento de esta investigación limita su campo de actuación, centrándolo en las posibilidades que presentan para la empresa, los productos usados y desechados por el consumidor y sobre los que el productor tiene determinadas responsabilidades legales.

Los primeros trabajos académicos sobre la recuperación de productos fuera de uso en el ámbito de la empresa, datan de la década de los años 90, aunque ya en los años 70 se publican algunos trabajos en los que se analizaba el problema de la distribución en la industria del reciclaje. Gultinan y Nwokoye (1975) y Ginter y Starling (1978) dan los primeros pasos en este sentido estudiando la estructura de los canales de distribución para el reciclaje. En estos primeros trabajos se hace referencia explícita a algunas de los aspectos que caracterizan las redes de distribución inversa como, por ejemplo:

- 1) la existencia de muchos orígenes (consumidores) y pocos destinos (recuperadores) en la red de distribución,
- 2) un conjunto de intermediarios muy numeroso y con nuevas funciones,
- 3) importancia que tienen las actividades de clasificación de los bienes recuperados.

En el trabajo de Ginter y Starling (1978) ya se señalaba como motivo principal del desarrollo de canales de distribución inversa, la existencia de una legislación medioambiental que condiciona o influye en el esquema operativo tradicional de las empresas.

Sin embargo, no es hasta lo años 90 cuando se comienza a estudiar con mayor profundidad la gestión de los productos fuera de uso. En esta década se realizan una serie de trabajos en los que se aborda la problemática de la escasez de recursos y materias primas, así como las oportunidades que la recuperación y reutilización de productos usados representan para la empresa y para la sociedad.

Uno de los primeros trabajos es el de Stock (1992) en el que se analizan, entre otras cuestiones, los procesos logísticos relacionados con el retorno de productos desde el consumidor al productor, el reciclaje, la reutilización de materiales y componentes, la

eliminación de residuos y las operaciones de restauración, reparación y refabricación. En este trabajo se comienza a utilizar ya el concepto de *Logística Inversa*.

Otro trabajo significativo es el de Thierry, Salomon, Van Nunen y Van Wassenhove (1995) en el que se define el concepto de *Gestión de Productos Recuperados*, cuyo objetivo es “recuperar tanto valor económico (y ecológico) como sea posible, reduciendo de esta forma las cantidades finales de residuos”. Estos autores defienden la idea de que las empresas deben desarrollar una política efectiva para la gestión de productos recuperados, sin que esto afecte significativamente a su estructura de costes. Es en este artículo donde se clasifican y analizan, por primera vez, las opciones de que disponen las empresas para gestionar eficientemente el flujo de productos desde el consumidor hasta el productor, sugiriendo un conjunto de elementos que favorecen la implantación de un sistema de recuperación de los productos fuera de uso.

Para la recuperación eficiente de estos productos resulta imprescindible establecer sistemas logísticos capaces de poner en manos del recuperador los productos desechados por los consumidores. De esta forma se empieza a utilizar el concepto de Logística Inversa para referirse al conjunto de actividades logísticas necesarias para recuperar y aprovechar económicamente los productos fuera de uso.

La Logística Inversa es un concepto poco conocido, o al menos novedoso, para muchos profesionales. Aunque en un primer momento, las referencias a este término aparecieron en revistas profesionales y de divulgación (sobre transporte y distribución principalmente) en los últimos años la Logística Inversa se ha abierto un hueco, pequeño aún, dentro del ámbito académico

Carter y Ellram (1998) realizan una completa revisión de la literatura existente sobre Logística Inversa hasta esa fecha, analizando las principales aportaciones realizadas en tres temas claramente diferenciados:

- 1) Aspectos generales y desarrollos teóricos
- 2) Transporte y embalaje
- 3) Mercados finales.

Estos autores señalan que la mayor parte de los trabajos analizados son “de tipo descriptivo y anecdótico” y publicados en revistas comerciales, detectando la ausencia de desarrollos teóricos que permitan construir un marco de investigación.

Stock (1998) recupera el tema de la Logística Inversa en lo que pretende ser un Libro Blanco sobre esta materia. Este autor analiza el papel que desempeña la logística en aspectos tales como la devolución de productos, reducción en la generación de residuos, reciclaje, reparación y refabricación, desarrollando para ello modelos de gestión que combinan las técnicas de ingeniería logística y los modelos de decisión empresarial con objeto de rentabilizar el flujo de retorno de los productos fuera de uso.

Dowlatshahi (2000) agrupa los estudios y trabajos realizados sobre Logística Inversa en cinco categorías:

- 1) Conceptos Generales
- 2) Modelos Cuantitativos
- 3) Distribución, Almacenaje y Transporte
- 4) Perfiles Empresariales
- 5) Aplicaciones Industriales

Este autor detecta ciertas deficiencias en los trabajos, principalmente en cuanto a la existencia de una estructura común sobre la que se sustenten, es decir, no se ha desarrollado una teoría de la Logística Inversa que dé fundamento a los distintos elementos que la componen. El autor da un paso en este sentido, identificando factores estratégicos y operativos que considera esenciales para un desarrollo efectivo de los sistemas de logística inversa. Entre los factores estratégicos señala el coste de estos sistemas, la calidad de los productos recuperados, el servicio al consumidor, aspectos medioambientales y condicionantes legales. Entre los factores de carácter operativo Dowlatshahi identifica las funciones propias de los sistemas logísticos, transporte, almacenaje, producción (refabricación y reciclaje), embalaje, etc.

Junto con el desarrollo teórico del concepto de Logística Inversa, se han sucedido algunos trabajos empíricos que han permitido construir un marco de trabajo y de análisis de la cuestión mucho más adecuado. Estos casos prácticos se caracterizan por utilizar, en el diseño y resolución de los modelos, distintas técnicas de investigación operativa.

Bloemhof-Ruwaard, Van Beek, Hordijk, y Van Vassenhove (1995), analizaron por primera vez las relaciones e interacciones existentes entre la investigación operativa y la gestión medioambiental desde dos perspectivas:

- 1) El impacto sobre la cadena de suministro, analizando cómo los aspectos medioambientales afectan a la planificación de la producción, distribución, inventarios, localización y en general, al conjunto de las actividades logísticas.
- 2) El impacto sobre la cadena medioambiental, estudiando cómo las técnicas de investigación operativa pueden contribuir a una mejor formulación y resolución de las cuestiones medioambientales. En este trabajo pionero, ya

se concluía acerca de la importancia que la recuperación de productos recuperados tiene en la gestión de la cadena de suministro.

Fleischmann, Bloemhof-Ruwaard, Dekker, Van der Laan, Van Nunen y Van Vassenhove (1997) recopilan un conjunto de modelos cuantitativos diseñados para el análisis de la función inversa de la logística, agrupándolos en tres categorías claramente diferenciadas:

- 1) Sistemas de distribución.
- 2) Gestión de inventarios.
- 3) Modelos de planificación de la producción.

En este trabajo se hace referencia a más de 30 modelos cuantitativos, en su mayor parte diseñados y resueltos a través de técnicas de investigación operativa. Los autores concluyen que la Logística Inversa es un campo científico muy joven en el que las aportaciones realizadas son aún demasiado parciales. Señalan que existe un enorme desequilibrio entre el importante número de trabajos empíricos relacionados con la reutilización o el reciclaje de productos y los pocos, por el momento, desarrollos teóricos que den una visión integral de esta cuestión.

Más recientemente, Fleischmann (2001) estudia, entre otras cuestiones, cómo pueden describirse las características de los sistemas de logística inversa a través de modelos cuantitativos y, de esta forma, mejorar nuestro proceso de toma de decisiones.

El desarrollo de la Logística Inversa empieza a ser una realidad: la elaboración de tesis doctorales (Thierry, 1997; Krikke, 1998; Fleischmann, 2001), las publicaciones realizadas en prestigiosas revistas académicas (European Journal of Operational

Research, International Journal of Production Economics, Interfaces, Omega, etc.), la apertura de nuevas líneas de investigación o la constitución de grupos de investigación específicos sobre esta materia (REVLOG European Working Group, RELOOP, Reverse Logistics Executive Council), entre otros, están contribuyendo a que la Logística Inversa empiece a cobrar importancia dentro del mundo académico y profesional. En España los trabajos y estudios de investigación realizados son pocos y tocan el tema tangencialmente (Delgado, Insa y Carrasco, 1999; Irasarri, Larrauri, Miguel, y Arnaiz, 1999; González Benito y González Benito (2001)), si bien a nivel profesional sí se han desarrollado algunos proyectos interesantes: Campaña de Recuperación de teléfonos móviles “Tragamóvil”, Campaña de Recuperación de Electrodomésticos de Aniel e Industria de la madera en Valencia. En mayo de 2001 se desarrolló en Zaragoza el Foro Internacional PILOT sobre Logística Inversa, en el que se realizó la “presentación en sociedad” del concepto de Logística Inversa. Los participantes en este Foro, fundamentalmente profesionales de la logística en España, tuvieron la oportunidad de conocer, de primera mano, las oportunidades que la función inversa de la logística ofrece a las empresas. En cualquier caso, nos encontramos en los albores de la investigación sobre este tema y queda un apasionante camino por recorrer.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

La propuesta de tesis doctoral que presentamos se estructura en siete capítulos agrupados en dos partes: la primera (capítulos I a III) delimita el marco teórico sobre el que vamos a basar nuestro trabajo, mientras que la segunda parte (capítulos IV a VI) es, fundamentalmente, de contenido empírico y recoge los modelos y aplicaciones que desarrollamos para el análisis de los sistemas de logística inversa. El capítulo VII se dedica a presentar las conclusiones.

En este primer capítulo, de carácter introductorio, hemos presentado las motivaciones que nos llevan a desarrollar esta tesis doctoral, justificándola y analizando la evolución histórica del concepto de logística inversa, y presentando el estado en que se encuentra actualmente la investigación sobre este tema. Además hemos formulado la tesis que vamos a defender y el procedimiento que utilizaremos para ello.

En el capítulo II se presentan los conceptos y fundamentos relevantes para el estudio de la gestión empresarial de los productos fuera de uso, analizando las implicaciones estratégicas, operativas y tácticas que se originan. Además se analiza en profundidad el concepto de logística inversa dentro del marco general en el que se integra.

En el capítulo III recopilamos los modelos más significativos que se han propuesto para el análisis de los sistemas de logística inversa, los cuales emplean, habitualmente, técnicas de investigación operativa en su formulación y resolución. Llevaremos a cabo un análisis de estos sistemas y presentaremos propuestas de mejora de los mismos, principalmente referidas a su comportamiento dinámico.

El capítulo IV presenta una modelización de diferentes sistemas de logística inversa a través de los cuales se analizan las implicaciones que conlleva el establecimiento de esta estructura de flujo inverso. Para la realización de este análisis de carácter cuantitativo, consideramos un escenario de trabajo bien conocido en el ámbito de la función logística como es la gestión de inventarios.

Los capítulos V y VI recogen los resultados derivados de la modelización propuesta y la realización de un análisis de escenarios a través del cual realizar una comparación entre los distintos modelos considerados. Se presentan los resultados en

dos capítulos debido, primero, a la extensión de los mismos y, segundo, a la diferente perspectiva que damos a los resultados en cada capítulo: en el capítulo V presentamos un análisis descriptivo de los modelos empleados en la simulación, mientras que en el capítulo VI desarrollamos un análisis comparativo entre los mismos.

Por último, en el capítulo VII, se presentan las principales conclusiones obtenidas y se exponen futuras líneas de investigación en el ámbito de la función inversa de la logística.

CAPÍTULO II

LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO Y SU GESTIÓN EMPRESARIAL

- 2.1 INTRODUCCIÓN.**
- 2.2 RAZONES PARA LA RECUPERACIÓN DE PFU.**
 - 2.2.1 Motivos legales.**
 - 2.2.2 Motivos económicos.**
- 2.3 LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA.**
 - 2.3.1 Logística de devoluciones y Logística para la recuperación.**
 - 2.3.2 Opciones para la gestión empresarial de PFU.**
 - 2.3.2.1 Opciones de gestión para las devoluciones.**
 - 2.3.2.2 Opciones de gestión para los productos recuperados.**
- 2.4 IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS, TÁCTICAS Y OPERATIVAS DE LA RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS FUERA DE USO.**
- 2.5 EL DISEÑO DE LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA.**

CAPÍTULO II

LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO Y SU GESTIÓN EMPRESARIAL

2.1. INTRODUCCIÓN.

En un mundo donde los recursos naturales son limitados y además escasos, las tasas de producción y consumo crecientes, y las posibilidades para deshacernos de los residuos que generamos cada vez menores, la idea de recuperar y aprovechar económicamente los bienes que desechamos, debiera ser una obligación. Sin embargo, aún la sociedad occidental parece estar inmersa en la cultura del “Usar y Tirar”, que se desarrolló durante el boom industrial de los años 50, y que nos sigue afectando.

En los últimos años las sociedades de los países más desarrollados están demandando a las empresas comportamientos medioambientalmente más positivos, principalmente en aspectos relacionados con la generación y gestión de los residuos.

Durante muchos años ha existido una máxima acerca de la incompatibilidad existente entre los objetivos empresariales y la preservación del medio ambiente. Esto, que puede haber sido cierto en el pasado, comienza a cuestionarse en el presente (Porter, 1990, Porter y van der Linde, 1995a) y, posiblemente, en un futuro próximo podamos hablar, al menos, de una relación neutra entre empresa y medio ambiente.

Pensamos que las empresas deben empezar a ser conscientes de que el desarrollo de su actividad no tiene porqué generar efectos negativos sobre el medio ambiente. Cuestiones tales como la reducción de emisiones contaminantes, la minimización de los residuos generados, la producción limpia o el reciclaje, empiezan a ser elementos considerados en la formulación de la estrategia empresarial y así aparece reflejado en las, cada vez más frecuentes, memorias medioambientales. Las empresas comienzan a descubrir las posibilidades económicas de estos “residuos”, cuya gestión se configura, en muchos casos, como una nueva actividad empresarial. Tal y como señalábamos en la introducción de esta investigación, sostenemos firmemente la idea de que la recuperación de los productos y materiales desechados por los consumidores presentan grandes oportunidades para las empresas, que pueden lograr ventajas competitivas sostenibles a través de una gestión eficiente de los mismos.

2.2. RAZONES PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO.

El establecimiento de mecanismos para la recuperación y el aprovechamiento de los productos desechados por los consumidores viene originado, principalmente, por dos tipos de motivos:

2.2.1. **Motivos legales.**

Las presiones realizadas por diferentes grupos sociales en demanda de un mayor respeto hacia el medio ambiente han provocado que, en los países más desarrollados, las administraciones públicas estén promoviendo un conjunto de buenas prácticas medioambientales, cuyo reflejo es el vasto ordenamiento jurídico que, sobre esta materia, se ha promulgado en los últimos años¹. Actualmente, la Unión Europea ha elaborado el “*VI Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente*”, para el periodo 2001-2010, como Propuesta de Decisión del Parlamento Europeo y la Comisión, en el que se determinan las prioridades y objetivos principales en la política medioambiental y se describen las medidas que deberán adoptarse². Este Programa tiene cuatro áreas de actuación prioritaria que son:

- 1) Cambio climático.
- 2) Naturaleza y biodiversidad.
- 3) Medio ambiente y salud.
- 4) Utilización sostenible de los recursos naturales y gestión de residuos.

La estrategia comunitaria en cuestión de residuos tiene como meta reducir, durante el periodo de vigencia de este plan, en un 20% la cantidad de residuos destinados a eliminación, por tanto, no recuperables. Para lograr este objetivo, se utiliza un principio fundamental que establece una jerarquía para la gestión de los residuos, dando preferencia en primer lugar a la *Prevención*, seguidamente a la *Recuperación* de los residuos (con prioridad de la reutilización frente al reciclaje y de éste frente a la valorización o aprovechamiento energético de los residuos) y por último, a la *Eliminación* de los residuos mediante su deposición en vertederos.

¹ En el periodo enero de 1995 a junio de 2002 se promulgaron un total de 395 disposiciones en materia de residuos, en los ámbitos autonómico (161), estatal (101) y europeo (133). Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Medio Ambiente (www.mma.es).

² http://europa.eu.int/comm/dgs/environment/index_es.htm

A nivel estatal, las medidas adoptadas han ido dirigidas a cumplir los objetivos propuestos por la Unión Europea. En este sentido han ido apareciendo, entre otras, las siguientes leyes y resoluciones:

- 1) Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases (BOE nº 99 de 25 de abril) que tiene como objetivo “prevenir y reducir el impacto sobre el medio ambiente de los envases y la gestión de envases a lo largo de todo su ciclo de vida”.
- 2) Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos (BOE nº 96 de 22 de abril) cuyo objetivo es “prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización, así como regular los suelos contaminados, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas”.
- 3) Plan Nacional de Residuos Urbanos (Resolución de 13 de enero de 2000 de la Secretaría General de Medio Ambiente, BOE nº 28 de 2 de febrero), que tiene entre sus objetivos específicos “estabilizar, en términos absolutos, la producción nacional de residuos urbanos, implantar la recogida selectiva, reducir, recuperar, reutilizar y reciclar los residuos de envases, valorizar la materia orgánica y eliminar de forma segura las fracciones no recuperables o no valorizables de los mismos”.
- 4) Plan Nacional de Vehículos Fuera de Uso (Resolución de 25 de septiembre de 2001 de la Secretaría General de Medio Ambiente, BOE nº 248 de 16 de octubre de 2001) que establece la responsabilidad de los operadores económicos en la recuperación del vehículo al final de su vida útil y cifra los niveles mínimos de reutilización, reciclaje y valorización a alcanzar en 2005, para lo cual deberán crearse estructuras adecuadas que gestionen estos productos fuera de uso.

- 5) Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (Resolución de 8 de octubre de 2001 de la Secretaría General de Medio Ambiente, BOE nº 260 de 30 de octubre de 2001) que desarrolla un programa de actuación para la recuperación, reutilización, reciclaje y valorización de los neumáticos fuera de uso en el periodo 2001-2006.

De entre toda esta legislación, hemos incluido la redacción del artículo 7.1 de la Ley 11/1998, de 21 de abril, de Residuos que hace referencia a las obligaciones de los productores y los distribuidores en cuanto a lo que hemos denominado productos fuera de uso (PFU):

“Sin perjuicio de las normas adicionales de protección que, en su caso, dicten las Comunidades Autónomas, el productor, importador o adquirente intracomunitario, agente o intermediario, o cualquier persona responsable de la puesta en el mercado de productos que con su uso se conviertan en residuos, podrá ser obligado de acuerdo con las disposiciones que reglamentariamente apruebe el Gobierno a:

- a) Elaborar productos o utilizar envases que, por sus características de diseño, fabricación, comercialización o utilización, favorezcan la prevención en la generación de residuos, favorezcan su reutilización o el reciclado o valorización de sus residuos, o permitan su eliminación de la forma menos perjudicial para la salud humana y el medio ambiente.
- b) Hacerse cargo directamente de la gestión de los residuos derivados de sus productos o participar en un sistema organizado de gestión de dichos residuos o contribuir económicamente a los sistemas públicos de gestión de residuos en medida tal que se cubran los costos atribuibles a la gestión de los mismos.
- c) Aceptar, en el supuesto de no aplicarse el apartado anterior, un sistema de depósito, devolución y retorno de los residuos derivados de sus productos, así como de los propios productos fuera de uso, según el cual, el usuario,

al recibir el producto, dejará en depósito una cantidad monetaria que será recuperada con la devolución del envase o producto.

- d) Informar anualmente a los órganos competentes de las Comunidades Autónomas donde radiquen sus instalaciones, de los residuos producidos en el proceso de fabricación y del residuo cualitativo y cuantitativo de las operaciones realizadas.”

Del mismo modo, en el ámbito autonómico se ha ido desarrollando una legislación específica para la gestión de residuos. Actualmente, catorce de las diecisiete Comunidades Autónomas tienen su propio Plan Gestor de Residuos Urbanos³.

Todas estas leyes y normativas se fundamentan sobre el Principio de Jerarquización de Opciones para la Gestión de los Residuos establecido por la Unión Europea en su VI Programa sobre Medio Ambiente, y que ya mencionamos en la introducción de este trabajo.

De esta forma, el motivo legislación se impone como principal impulsor del desarrollo de políticas medioambientalmente correctas por parte de las empresas y por tanto, de su participación en sistemas de gestión y aprovechamiento de residuos, existiendo, en este sentido, un amplio consenso al respecto⁴.

Este imperativo legal se ha observado tradicionalmente como un elemento negativo para la capacidad competitiva de las empresas, debido a la asunción de costes que supone la adaptación de procesos y operaciones industriales a dicha normativa. Sin embargo, tal y como exponen Porter y van der Linde (1995b, 97) “la idea de una batalla

³ Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (www.mma.es)

⁴ Libro Blanco de la Gestión Medioambiental en la Industria Española (Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente, 1998)

inevitable entre ecología y economía parte de una visión estática de la regulación medioambiental en la que tecnología, productos, procesos y necesidades del consumidor aparecen predeterminados”. Debido al carácter dinámico de la competitividad, la cual está basada en la innovación, los autores defienden el hecho de que una legislación medioambiental, correctamente diseñada, generará innovaciones capaces de compensar el coste derivado del cumplimiento de dicha legislación. Estas “*compensaciones por innovación*” no sólo disminuirían el coste neto de cumplimentar la legislación sino que podrían generar ventajas competitivas sostenibles a través de reducciones en los costes totales de fabricación, en el *time-to-market* o incrementando el valor del producto para el consumidor. Los autores examinan el concepto de *productividad de los recursos* indicando que se producen ineficiencias (y con ello, mermas en la competitividad) cuando existe una utilización incompleta de los recursos productivos y/o cuando se emplean sistemas de control inapropiados que generan residuos innecesarios, defectos y stocks de materiales. Además existirán ineficiencias y costes ocultos en los productos desechados por distribuidores y consumidores, ya que éstos suponen una mala utilización de los recursos y una fuente adicional de costes. “Los consumidores soportan costes adicionales cuando emplean productos que contaminan o que malgastan energía”. (Porter y van der Linde, 1995a, 121).

En este sentido, Mohr (2002) construye un modelo de equilibrio general que sustenta la hipótesis de Porter (1990) y de Porter y van der Linde (1995a) acerca de que el establecimiento de una regulación medioambiental puede desencadenar beneficios para las empresas afectadas que compensen, total o parcialmente, los costes derivados de cumplimentar dicha normativa. Aunque existen en la literatura económica otros modelos que apoyan esta hipótesis (entre otros, Simpson y Bradford III, 1996 y Ulph, 1996), este modelo de equilibrio general es el menos restrictivo y asume la mayoría de los supuestos realizados por Porter en su formulación. De esta forma, la “hipótesis de Porter” sería consistente con los fundamentos de la teoría económica.

Por tanto, además de un motivo legislación o normativo, la posibilidad de conseguir ventajas competitivas a través del cumplimiento de dicha legislación puede considerarse como una razón adicional para la adopción de políticas medioambientalmente correctas por parte de las empresas, entre ellas, la implantación de sistemas de recuperación y aprovechamiento de productos fuera de uso.

2.2.2. Motivos económicos.

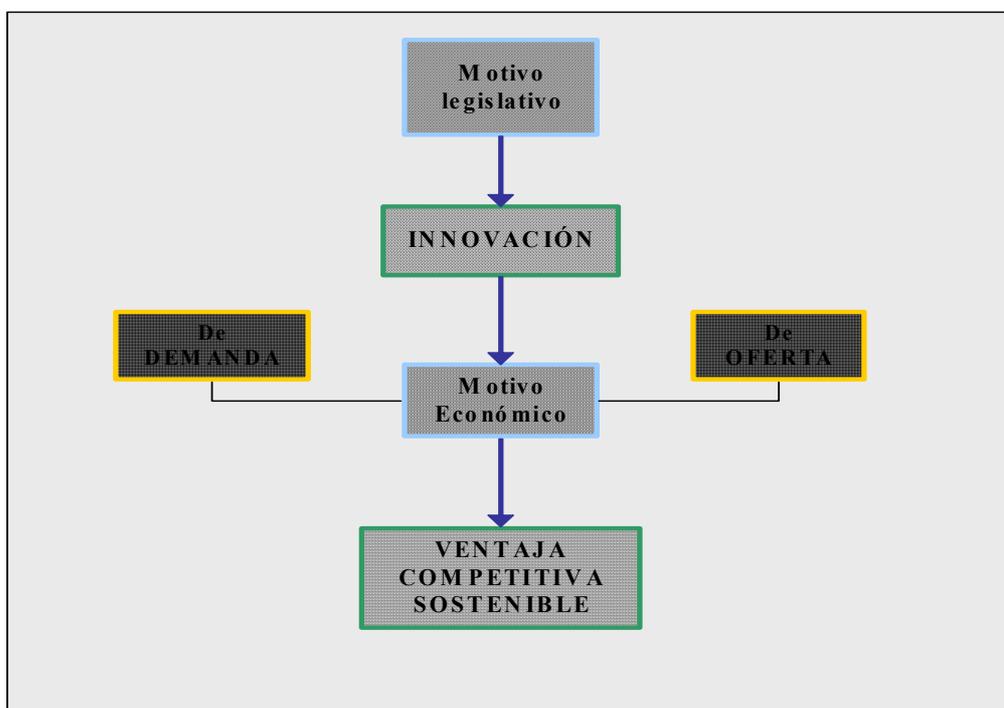
La empresa, naturalmente, buscará en la ejecución de sus actividades un valor añadido y una oportunidad de negocio. En este sentido, las razones de tipo económico que impulsan a las empresas hacia la recuperación y el aprovechamiento de los productos fuera de uso pueden analizarse desde dos puntos de vista:

- 1) **Desde el punto de vista de la demanda**, la recuperación de productos fuera de uso y su reintroducción en el proceso productivo de la empresa, puede ser utilizado por ésta como un instrumento de marketing y, de hecho, es uno de los aspectos que integran el denominado marketing ecológico (Bañegil y Rivero, 1998). La empresa podría generar diferencias competitivas a través de una estrategia de posicionamiento (Kotler, 1994) buscando una imagen de empresa medioambientalmente responsable, que fabrica productos reciclables, a partir de materiales recuperados, en los que se minimiza la generación de residuos y la utilización de materias primas no renovables, empleando tecnologías limpias e integrando a la cadena de suministro en su estrategia medioambiental (proveedores, suministradores, distribuidores y clientes).
- 2) **Por el lado de la oferta**, la recuperación de materiales y productos fuera de uso, supondría la sustitución de las materias primas y componentes originales por estos artículos recuperados, lo que podría generar una

disminución en los costes de fabricación y/o en el precio de venta de estos productos⁵.

De esta forma, las empresas no estarían considerando la gestión de los productos fuera de uso, únicamente, como una necesidad motivada por presiones legislativas, sino que encontrarían en estas actividades formas de lograr ventajas competitivas sostenibles y con ello la consecución de sus objetivos empresariales.

Figura 2.1: Razones para la recuperación de PFU.



Fuente: Elaboración propia

⁵ El grupo Electrolux fabrica, en sus instalaciones de Motala (Suecia), electrodomésticos en los que utiliza componentes recuperados y materiales reciclados, consiguiendo una reducción tal de los costes de fabricación que les permite disminuir el precio de venta entre un 25 y un 50% con respecto a los “productos originales”. Realf, Ammons y Newton (1999, 549) señalan que la razón más poderosa para establecer un sistema de recuperación de textiles es la existencia de un enorme valor económico en los productos fuera de uso.

De este modo, y teniendo en cuenta todo lo comentado hasta ahora, definimos el concepto de *Recuperación Económica* como aquel *proceso de recogida de PFU que tiene por objeto aprovechar el valor añadido que aún incorporan éstos, a través de la opción de gestión adecuada, de manera que se obtenga con ello una rentabilidad económica o se provoque la consecución de ventajas competitivas de carácter sostenible.*

La recuperación económica de los productos fuera de uso requiere el diseño, desarrollo y control eficiente de un sistema logístico capaz de recoger el producto fuera de uso y conducirlo hasta el recuperador, el cual aplicará la opción de gestión más adecuada para un óptimo aprovechamiento. Este sistema logístico fluye en sentido contrario al existente en los sistemas logísticos tradicionales, desde el productor hacia el consumidor; es por ello que, a la consideración de este flujo de materiales, productos y subproductos desde el consumidor hasta el productor o recuperador, se le denomine *Sistema de Logística Inversa (SLI)*.

Tal y como señala Guide Jr. (2000), el desarrollo de los SLI supone enfrentarse a un problema complejo en el que se deberán tomar decisiones relativas, entre otras cuestiones, al número y localización de los centro de recogida de los productos fuera de uso, métodos de transporte para estos productos, si éstos serán propios o ajenos, sistemas de incentivos para la recuperación de los productos, nuevas tareas logísticas que se plantean (inspección de los productos retornados, control de la calidad de los PFU, clasificación de los mismos, eliminación de los no satisfactorios,...). Como vemos, el diseño, desarrollo y control de los SLI presentará implicaciones a nivel estratégico, táctico y operativo que afectan a todos los sistemas funcionales de la empresa y que se analizan, con mayor detalle, en el apartado 2.4 de este trabajo.

2.3. LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA

El desarrollo de la función logística en la empresa durante estos últimos años ha sido muy significativo debido, fundamentalmente, a la posibilidad de obtener ventajas competitivas a través de ella (Porter, 1987). La función logística se enmarca dentro del conjunto de actividades primarias que componen la cadena de valor⁶ de una empresa y puede ser, por tanto, fuente de ventajas competitivas. La consideración de un flujo inverso en la función logística amplificaría las capacidades competitivas de la empresa, en el sentido de incrementar los recursos sobre los que poder desarrollar las potencialidades de la misma y conseguir, de esta forma, la ansiada ventaja competitiva sostenible.

Siguiendo a Heene (1997) por lo general, una ventaja competitiva se refiere a una capacidad distintiva de la empresa; una empresa crea una ventaja competitiva si tiene éxito en obtener una diferenciación de sus competidores que sea reconocida y valorada por el mercado. Esta ventaja competitiva será sostenible si crea una “ventana temporal” de una duración suficiente que le permita a la empresa recoger los resultados de las diferencias creadas, en términos de beneficios financieros o de oportunidades para la obtención de recursos que le permitan crear nuevas ventajas competitivas.

Por otra parte, y de acuerdo con la Teoría de recursos y capacidades, “la ventaja competitiva sostenible se deriva de los recursos y capacidades que controla una empresa y que son valiosos, únicos, difíciles de imitar y de sustituir” (Barney, Wright y Ketchen Jr. 2001, 625). Estos recursos y capacidades pueden considerarse como un conjunto de activos tangibles e intangibles que incluyen las habilidades de gestión de la empresa, sus

⁶ La cadena de valor es una conocida teoría de la empresa que divide a ésta en un conjunto de actividades estratégicas, relevantes para comprender el comportamiento de los costes y las fuentes de diferenciación existentes y potenciales. Una empresa obtiene una ventaja competitiva, realizando estas actividades estratégicas a un menor coste o de una forma más eficaz que sus competidores. (Porter, 1987, 51)

procesos y rutinas operativas y la información y el conocimiento que controla. Esta moderna teoría de la empresa señala que la posibilidad de obtener una ventaja competitiva radica dentro de la propia empresa, en activos que son valiosos e inimitables. Las capacidades de la empresa y las habilidades de gestión para ordenar estos activos y obtener un desempeño superior determinan la ventaja competitiva.

El hecho de haber enfocado las posibilidades de la función logística para generar ventajas competitivas utilizando el concepto de la cadena de valor se debe, básicamente, a que éste contempla como actividad primaria dicha función logística, confiriéndole, por tanto, la capacidad para generar estas ventajas. No obstante, pensamos que esto no es incompatible con un análisis de la función logística basado en los recursos que permitiría corroborar su potencial competitivo en el marco de esta significativa teoría. Un análisis de la logística basado en este enfoque de recursos deberá considerar tanto su función directa (productor-consumidor) como la función inversa de la misma. En este sentido inverso, podemos dar algunas pautas de qué elementos podrían considerarse bajo el enfoque de recursos y capacidades. Recordemos que esta teoría clasifica los recursos de una empresa en activos tangibles (instalaciones, equipos, stocks, recursos financieros) e intangibles (reputación, conocimiento, cultura, experiencia y formación de los trabajadores, lealtad, compromiso) los cuales serán ordenados, integrados y gestionados a través de las capacidades de la organización para conseguir una ventaja competitiva sostenible (Grant, 1991). En este sentido, y siguiendo a Russo y Fouts (1997), podríamos considerar las siguientes combinaciones de recursos y capacidades para el análisis de la función inversa de la logística:

- 1) Activos físicos y tecnologías para la recuperación de PFU y las habilidades necesarias para su uso: considerando las actividades de recuperación económica de los PFU desde las más tempranas fases de diseño del sistema de operaciones de la empresa, de manera que se consiga algo más que un simple cumplimiento de las obligaciones legales existentes al

respecto y se consiga imbuir a la organización desde el principio en la cultura de la recuperación de PFU.

- 2) Recursos humanos y capacidades organizativas: que incluirán la cultura empresarial, el compromiso y la lealtad de los trabajadores y las capacidades de integración y comunicación. Los procesos de recuperación económica de los PFU requieren, entre otras consideraciones, una interacción mucho más significativa con los consumidores, desarrollar nuevas habilidades en los trabajadores para recuperar el valor económico de los PFU y hacerles partícipes de los beneficios económicos y medioambientales que se consigan. Estas actividades de recuperación de PFU están muy ligadas al ámbito medioambiental, y como tales pueden llegar a constituir parte de la imagen y la identidad de la organización y una guía para las acciones de sus miembros (Dutton y Dukerich, 1991).
- 3) Recursos intangibles como la reputación y el talento. La reputación de empresa líder en actividades de recuperación positivas para el medio ambiente reforzaría la posición de la empresa en el mercado, incrementando las ventas entre los consumidores más sensibilizados con estas cuestiones.

Naturalmente, este análisis basado en los recursos debería completarse y contrastarse empíricamente para establecer los fundamentos estratégicos de la logística, aunque esto queda fuera de los objetivos de esta investigación.

En cualquier caso, parece innegable el desarrollo experimentado por la función logística, fundamentalmente, a partir de la década de los años 90. Según Gutiérrez y Prida (1998, 65) este desarrollo ha venido originado por determinados factores de tipo externo e interno a la organización:

- 1) **Globalización de los mercados y las empresas**, lo cual supone un grado de complejidad mayor de las actividades logísticas de estas firmas multinacionales, que orientan su estrategia logística hacia la integración de los mercados nacionales e internacionales.
- 2) **Rediseño de las estrategias de fabricación**, entre las cuales podemos mencionar la Fabricación Enfocada y la Fabricación Flexible que lanzan nuevos desafíos logísticos en cuanto a operaciones de aprovisionamiento, gestión de inventarios, distribución física y servicio a los clientes.
- 3) **Cambios políticos y legislativos**, originando procesos de desregulación que han contribuido a fomentar la eliminación de barreras físicas, técnicas y arancelarias que hasta entonces habían restringido el comercio internacional. De esta forma la logística adopta un papel más activo en el desarrollo y mantenimiento de estrategias competitivas.
- 4) **Reestructuración de empresas y de la distribución comercial**, fomentándose procesos de integración de empresas (fusiones, adquisiciones, absorciones, etc.) y la aparición de estrategias logísticas que se adapten a las exigencias que requiere la nueva dimensión de la empresa. Por su parte, la distribución comercial ha experimentado un proceso de concentración en la mayor parte de los países industrializados generándose nuevas necesidades logísticas.
- 5) **Aceleración de los avances tecnológicos**, en particular de los sistemas y aplicaciones informáticas que han contribuido a generar eficiencias en la función logística: códigos de barra, intercambio electrónico de datos (EDI), automatización de almacenes, nuevos sistemas de envase y embalajes, etc.

Son muchas las definiciones que se han formulado sobre el concepto de logística (entre otras muchas, Bowersox, 1974, Council of Logistics Management, 1985, Chase y

Aquilano, 1994, Gutiérrez y Prida, 1998) y en todas ellas, se establece un único sentido para el flujo de materiales y productos que circula, a través del sistema logístico, desde el productor hacia el consumidor⁷. Tradicionalmente, por tanto, se ha obviado la existencia de un flujo inverso (consumidor-productor) en los sistemas logísticos, el cual debe ser considerado como parte integrante de los mismos y co-generador de las ventajas competitivas que, con carácter sostenible, pueden lograrse a través de la función logística.

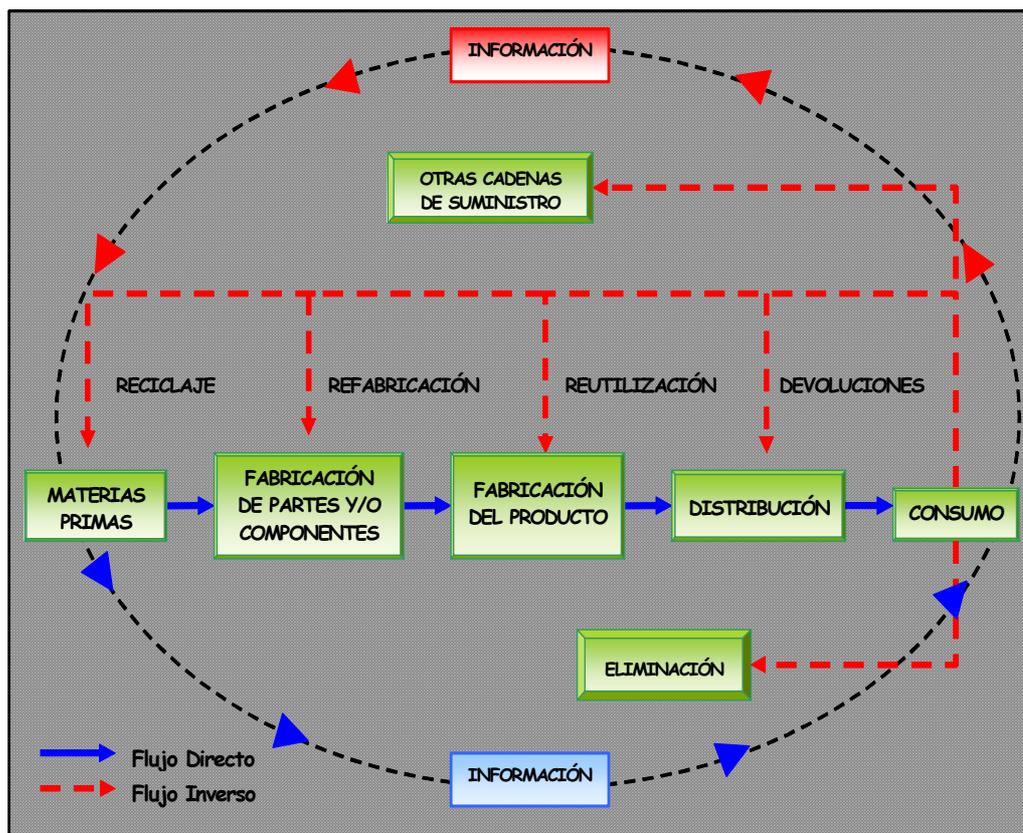
Esta función inversa de la logística estará presente en la formulación de la estrategia de operaciones de la empresa analizando detenidamente el diseño, desarrollo y control eficiente del sistema logístico. Sólo mediante una visión integral de la función logística se obtendrán ventajas competitivas sostenibles y con ello la consecución de los objetivos propuestos.

En general, los autores que han estudiado el concepto de Logística Inversa (Stock, 1992; Pohlen y Farris, 1992; Stock, 1998; Fleischmann, 2000) suelen definirla con independencia del flujo directo, del mismo modo que en las definiciones tradicionales del concepto de logística se omite la función inversa o de retorno de la misma. Así pues, proponemos una definición de Logística en la que se integren claramente ambas funciones, por lo que apoyándonos en la definición de Rogers y Tibben-Lembke (1999), podemos definir la Logística como *el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el de consumo de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de tal manera que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor añadido y/o consiguiendo una adecuada eliminación del mismo*. En esta definición ya tenemos presente los dos flujos existentes en la función logística de las empresas:

⁷ Sánchez, Durán y Gutiérrez (2001, 1) proporcionan una definición de logística en la que se añade, como coletilla final, la función inversa de la misma.

- 1) **Flujo directo o hacia adelante**, que engloba el conjunto de actividades relacionadas con el flujo total de materiales, productos e información desde el *productor* hasta el *consumidor*, desde el aprovisionamiento de materias primas hasta la entrega del producto al cliente.
- 2) **Flujo inverso o hacia atrás**, que hace referencia tanto a la recuperación como a la devolución de los productos, subproductos y materiales susceptibles de ser reintroducidos en el proceso productivo de la empresa o en otros procesos diferentes, a las actividades necesarias para ello y al flujo de información que se establece desde el *consumidor* hasta el *recuperador*.

Figura 2.2: Flujos en el Sistema Logístico de la Empresa.



Fuente: Elaboración propia

2.3.1. Logística de devoluciones y Logística para la recuperación.

Hasta el momento sólo hemos considerado la existencia de un flujo de materiales y productos desde el consumidor hacia el productor, con objeto de recuperar los productos desechados por el consumidor y reintroducirlos en la cadena de suministro o para proceder a su adecuada eliminación. Sin embargo, existe otra situación en la que se produce también un flujo de retorno de productos desde el consumidor hacia el fabricante: *las devoluciones*. Aquellos productos que, por distintos motivos, no satisfacen las necesidades del cliente son susceptibles de devolución, generando de esta forma una casuística similar a la analizada hasta este momento, al menos en lo referente a la existencia de un flujo de productos desde el cliente al fabricante.

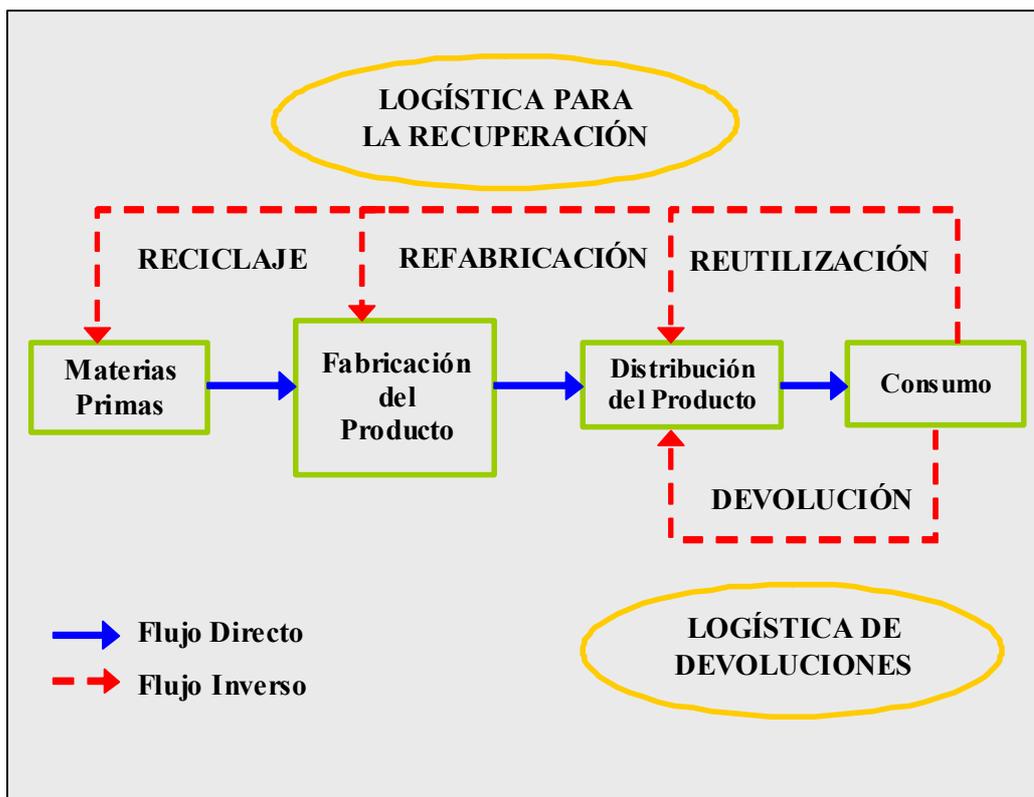
Las referencias al concepto de Logística Inversa se realizan tanto desde el punto de vista de las devoluciones como desde la perspectiva de la recuperación de productos y, generalmente, de una manera excluyente; es decir, la consideración de una función inversa de la logística para la gestión eficiente de las devoluciones, no contempla la posibilidad de utilizar dicho sistema de retorno para recuperar los productos fuera de uso y viceversa. De esta forma, podemos hablar de una logística de devoluciones (return logistics) y de una logística para la recuperación (recovery logistics) como dos realidades que coexisten en el concepto de Logística Inversa.

El concepto de logística de devoluciones está muy asentado en Estados Unidos, donde existe una tradición muy consolidada en cuanto a la posibilidad de que los clientes devuelvan los productos cuando éstos no satisfacen sus necesidades. Las devoluciones suponen la pérdida de esa venta por lo que se le confiere un carácter de “no deseada” a este tipo de logística.

Uno de los principales trabajos sobre logística de devoluciones es el realizado por Rogers y Tibben-Lembke (1999) en el que se describe el estado de la cuestión en

Estados Unidos, determinando tendencias y líneas de actuación en esta materia. Según este estudio, el coste estimado de las devoluciones llevadas a cabo en EEUU durante 1997 ascendió a 37.000 millones de dólares, si bien el impacto de la logística de devoluciones depende en gran medida de la actividad industrial de que se trate. Así, Rogers, Larson y Tibben-Lembke (2001) y Stock (2001) cifran en un 6% del total de ventas, el volumen de devoluciones en Estados Unidos, si bien este porcentaje se incrementa significativamente para determinadas actividades como editoriales (10-30%), distribuidores de productos electrónicos (10-12%), venta por catálogo (18-35%) o fabricantes de ordenadores (10-20%).

Figura 2.3: Logística para la Recuperación y Logística de Devoluciones



Fuente: Elaboración propia

En Europa, sin embargo, la Logística Inversa se entiende desde la perspectiva de la recuperación y aprovechamiento económico de materiales y productos usados, sobre los que el fabricante tiene determinadas responsabilidades. La existencia de una legislación más rigurosa que en Estados Unidos, en cuanto a protección del medio ambiente, ha sido el punto de partida para el desarrollo de este concepto en Europa, en el que no se contemplan, inicialmente, las devoluciones que los consumidores no satisfechos realizan. Tan acentuada es esta doble acepción del concepto de Logística Inversa, que Rogers y Tibben-Lembke (1999) hablan en su estudio sobre la Logística Inversa de una “Logística Inversa Europea”.

De cualquier forma, es cierto que tanto la logística de devoluciones como la logística para la recuperación, suponen un flujo de materiales y productos desde el consumidor al fabricante o al recuperador, por lo que ambas deberán formar parte del concepto de Logística Inversa

Una vez que los productos se reintroducen en la cadena de suministro, la empresa deberá realizar una gestión eficiente de los mismos de manera que obtenga un valor añadido por ello y/o posibilite su adecuada eliminación.

2.3.2. Opciones para la gestión empresarial de PFU.

El análisis de las opciones de gestión existentes lo realizaremos de acuerdo a las diferentes características que presentan los productos retornados desde el consumidor, ya sea antes de su uso (devoluciones) o después de él (recuperaciones):

2.3.2.1. Opciones de gestión para las devoluciones.

Las devoluciones suponen aproximadamente el 6% del volumen total de ventas de una empresa (Rogers et al., 2001; Stock, 2001), aunque esta cifra varía dependiendo del sector y del mercado que consideremos. Del total de productos devueltos,

aproximadamente la mitad son defectuosos, generalmente debido a fallos de fabricación (más de un 90%) o a desperfectos sufridos durante la distribución del producto (transporte, almacenaje, exposición, etc.). El otro 50% de los productos devueltos no presentan defectos o fallos de funcionamiento que motiven su devolución, sino que se corresponden con errores de compra (talla, tamaño, especificaciones, etc.), motivos contractuales (“Si no queda satisfecho, ...”, “El cliente siempre tiene la razón”, ...) o por ajustes de inventario (insuficiencia de la demanda, obsolescencia del producto, rotación de existencias, etc.). Toda esta diversidad de circunstancias hacen muy difícil establecer una relación exhaustiva de opciones de que dispone la empresa para gestionar estos productos devueltos. En cualquier caso, podemos mencionar las siguientes:

- 1) **Reutilización de los productos en otros mercados:** es la opción más utilizada y la que genera mayores ventajas puesto que supone la venta definitiva del producto. Dependiendo de si el producto devuelto presenta o no fallos de funcionamiento, se contemplan actividades intermedias de mantenimiento, reparación e incluso refabricación. Un ejemplo interesante es el de la multinacional Genco⁸: esta empresa ha desarrollado un sistema de recuperación de activos (Asset Recovery Service) en el que se proporcionan nuevos mercados a los productos devueltos, a través de una red de más de 1000 compradores en todo el mundo. Esto supone un nuevo ciclo de vida para estos productos devueltos por el cliente. La reutilización engloba distintas posibilidades de actuación para las empresas; desde el reciclaje de los materiales que constituyen el artículo devuelto, hasta su reparación, su refabricación o directamente su reutilización en mercados secundarios.
- 2) **Eliminación:** hasta hace pocos años era la opción más utilizada y en algunos sectores como el agroalimentario, sigue siendo la principal. Supone deshacerse, por medios propios o ajenos, del producto devuelto a

⁸ Multinacional del sector de la distribución con amplia presencia en Estados Unidos, Europa y Australia: www.genco.com

través, básicamente, del vertido directo o de la incineración. Las posibilidades para recuperar parte del valor económico de los productos devueltos, además de representar una oportunidad de negocio para las empresas, generan también beneficios medioambientales para la sociedad debido a la reducción de los vertidos finales. Estée Lauder Companies Inc⁹. eliminaba anualmente un tercio de los productos devueltos por valor de 60 millones de dólares. El desarrollo de un sistema de logística inversa a través del cual se generan opciones de reutilización de los productos usados, ha supuesto la reducción a la mitad de esos vertidos, un ahorro anual de más de 2 millones de dólares en costes operativos y de personal, además de recuperar la inversión inicial en los nueve meses siguientes a la implantación de este sistema.

- 3) **Donación:** Algunas empresas destinan parte de sus devoluciones a entidades benéficas, organizaciones no gubernamentales, fundaciones, etc.; de esta forma se realiza una labor social a la vez que la empresa se beneficia de las deducciones fiscales que, en determinados países, existen por estas operaciones.

Distintos estudios sobre Logística Inversa en EEUU realizados por el Reverse Logistics Executive Council (www.rlec.org) señalan que la *Reutilización*, en sus distintas modalidades de reparación, refabricación o reciclaje, se aplica al 70% del total de productos devueltos, la *Eliminación* en vertederos aún se utiliza en el 20-25% de los casos y las *Donaciones* suponen entre el 5 y el 10% de las operaciones .

2.3.2.2. Opciones de gestión para los productos recuperados.

Las posibilidades de recuperación económica de los productos fuera de uso varían de unos productos a otros existiendo casos en los que la mejor opción a

⁹ Empresa líder en el mercado de cosméticos y productos de belleza: www.esteelauder.com

considerar será la adecuada eliminación del mismo. Además no todos los productos podrán ser sometidos a las mismas operaciones para recuperar el valor que incorporan.

Thierry et al. (1995, 114) definen el concepto de *Gestión de Productos Recuperados* como “la gestión de todos los productos, componentes y materiales desechados por los consumidores, sobre los que el fabricante tiene algún tipo de responsabilidad, y cuyo objetivo es recuperar tanto valor económico (y ecológico) como sea posible, reduciendo de esta forma la cantidad final de residuos”. Estos autores establecen una clasificación en la que señalan cinco opciones que puede utilizar la empresa para maximizar el valor económico de los productos fuera de uso:

- 1) **Reparación:** su objetivo es volver a poner al producto usado en condiciones de funcionamiento. Estas operaciones se suelen desarrollar en el domicilio del cliente o en los servicios técnicos de reparaciones y por lo general la calidad de estos productos reparados suele ser inferior a la de los productos nuevos. Pequeños aparatos eléctricos y electrónicos son ejemplos conocidos de esta opción de recuperación.
- 2) **Restauración:** supone devolver al producto usado unos niveles específicos de calidad que, generalmente, suelen ser inferiores a los de los productos originales pero amplian su vida útil. En ocasiones estas operaciones de restauración suelen acompañarse de otras en las que se mejora tecnológicamente alguno de los componentes del producto. Ejemplos de esta opción de recuperación los podemos encontrar en la industria de la aviación civil y militar.
- 3) **Refabricación:** esta opción proporciona al producto usado unos estándares de calidad tan rigurosos como los de los productos originales consiguiendo unos costes de fabricación que, en ocasiones, pueden ser entre un 30 y un 50% inferiores al de los originales¹⁰. Ejemplos de esta opción los

¹⁰ Heeb (1989), citado en Thierry et al. (1995, 119) y Lund (1996)

encontramos en fotocopiadoras (Xerox), electrodomésticos (Electrolux) o en cámaras fotográficas desechables (Kodak, Fuji).

- 4) **Canibalismo:** se suele dar este nombre a aquella opción de recuperación de productos fuera de uso en la que únicamente se recupera una pequeña parte de los componentes reutilizables que se destinarán a las opciones de reparación, restauración y refabricación. Determinados componentes electrónicos, los circuitos integrados o los metales preciosos son algunos ejemplos de elementos recuperables a través de esta opción.
- 5) **Reciclaje:** consiste en recuperar el material con el que está fabricado el producto fuera de uso, para utilizarlo en la fabricación de nuevos productos. Es la opción más conocida y la de mayor aplicación: vidrio, papel, cartón, latas, etc.

Otra clasificación para las opciones de gestión de productos fuera de uso es realizada por Fleischmann et al. (1997), de acuerdo con el grado de descomposición que sufre el producto en el proceso de recuperación. De esta forma podemos establecer una analogía entre el grado de descomposición del producto recuperado y la pérdida de identidad del mismo:

- 1) **Reutilización:** El producto mantiene su identidad existiendo una nula o muy escasa descomposición del mismo.
- 2) **Reparación:** La necesidad de sustituir los componentes averiados o defectuosos determina el grado de descomposición, aunque generalmente éste será bajo, manteniéndose en esencia la identidad del producto.
- 3) **Refabricación:** Al recuperarse solamente las partes y componentes cualitativamente válidos, serán éstos los que únicamente conserven su identidad, existiendo por tanto un nivel de descomposición medio-alto.

- 4) **Reciclaje:** supone la recuperación de la materia prima con la que está elaborado el producto, perdiéndose de este modo la estructura e identidad del mismo.

Estas clasificaciones señalan la reparación de productos como una opción de gestión de los productos recuperados, cuando más bien parece ser la actividad habitual de cualquier servicio técnico. Aunque esta actividad supone el retorno del producto desde el consumidor a la cadena de suministro, quizá fuera más adecuado no incluir la reparación de productos como una opción en la gestión de productos fuera de uso, en primer lugar, porque basamos la recuperación de PFU en la idea de aprovechamiento del valor que incorporan dichos productos y la actividad de reparación no recupera sino sustituye. En segundo lugar, la reparación no constituye un nuevo ciclo de vida para el producto retornado o para alguno de sus componentes sino, simplemente, un alargamiento del mismo. Las demás opciones (Reutilización, Refabricación y Reciclaje) sí satisfacen esta premisa. Por último, en la reparación ni siquiera podríamos hablar de productos fuera de uso, ya que el cliente desea seguir utilizando dicho producto y por eso pretende su reparación.

Por ello, proponemos una clasificación para las opciones de gestión de los PFU en la cual, cada una de las categorías satisfacen las siguientes premisas:

- 1) que se trate realmente de un producto fuera de uso, es decir, que el producto haya finalizado su vida útil o que no pueda seguir satisfaciendo las necesidades del consumidor,
- 2) que se produzca un aprovechamiento económico del valor añadido del PFU y
- 3) que se obtenga un nuevo ciclo de vida para el PFU o para alguno de sus componentes o materiales.

De esta forma, proponemos la siguiente clasificación de las opciones de gestión para los productos fuera de uso:

- 1) **Reutilización:** existe un aprovechamiento integral del producto retornado una vez realizadas pequeñas operaciones de limpieza y mantenimiento. La calidad de los productos reutilizados es totalmente equiparable a la de los productos originales, aunque generalmente existe un límite en cuanto al número de reutilizaciones.
- 2) **Refabricación:** se recuperan partes y componentes del PFU para su utilización en la fabricación de nuevos productos, de manera que la calidad de los productos refabricados sea igual a la de los productos fabricados con componentes originales.
- 3) **Reciclaje:** se realiza una recuperación del material con el que está fabricado el PFU, de manera que éste pierde su identidad durante el proceso. Los niveles de calidad del producto elaborado con materiales reciclados pueden alcanzar a los de los productos originales.

Consideramos que esta clasificación resume, de un modo más directo, las diferentes opciones con que cuenta la empresa para recuperar el valor que incorporan los PFU, por lo que será la que utilizaremos como referencia a lo largo de esta tesis. Estas opciones de gestión de PFU quedarán agrupadas bajo la denominación “3-R”: Reutilización, Refabricación, Reciclaje.

Cuadro 2.1: Opciones de gestión de los PFU

LOGÍSTICA INVERSA		CARACTERÍSTICAS	OPCIONES DE GESTIÓN
	LOGÍSTICA DE DEVOLUCIONES	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de voluntad en el recuperador: "Logística No Deseada" - No existe la venta del producto - Opciones de Gestión en cadenas de suministro diferentes a la original 	<ul style="list-style-type: none"> - Reutilización en segundos mercados - Eliminación - Donación
	LOGÍSTICA PARA LA RECUPERACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Existe voluntad de recuperación - Existe la venta del producto - Opciones de Gestión en la propia cadena o en cadenas similares 	<ul style="list-style-type: none"> - Reutilización - Refabricación - Reciclaje

Fuente: Elaboración propia

La logística de devoluciones, como ya hemos mencionado, presenta un carácter de "Logística No Deseada" debido a que se pierde la venta de ese producto devuelto. La empresa debe realizar esta función logística no sólo por motivos contractuales, sino por no perder, además de la venta, también al cliente. En cualquier caso, la empresa deberá poner todos los medios a su alcance para minimizar el número de devoluciones a través de, por ejemplo, controles de calidad que dificulten el acceso de productos defectuosos al mercado, sistemas de transporte apropiados que eviten desperfectos durante la distribución del producto, mejoras en los envases y embalajes, políticas de devoluciones más rigurosas y cualesquiera otros que acerquen a la empresa a un nivel cero de devoluciones.

La gestión empresarial de los PFU tiene ante sí un futuro esperanzador, aunque su éxito dependerá, fundamentalmente, de la existencia de un compromiso por parte de todos los miembros de la cadena de suministro para desarrollar eficientemente esta actividad, desde los proveedores y suministradores hasta los distribuidores, los consumidores, los recuperadores e incluso los propios competidores. El establecimiento

de objetivos cuantificables en las operaciones de recuperación, la selección de la opción más adecuada, así como un diseño detallado del producto y del proceso contribuirán al éxito de este proyecto.

Aunque tanto la logística de devoluciones como la logística para la recuperación generan un flujo de materiales y productos desde el consumidor hacia el fabricante (teniendo ambas por tanto la consideración de Logística Inversa) a partir de este momento centraremos nuestro trabajo en lo que hemos denominado logística para la recuperación de los productos fuera de uso, analizando a continuación las implicaciones que tiene sobre el diseño, el desarrollo y el control de la función logística en la empresa.

2.4. IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS, TÁCTICAS Y OPERATIVAS DE LA RECUPERACIÓN DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO.

La gestión de productos recuperados introduce, como ya hemos mencionado, consideraciones de tipo estratégico, táctico y operativo que condicionarán el diseño y el funcionamiento, no sólo del sistema de operaciones de la empresa, sino de toda ella en su conjunto. Esta diferenciación entre la estrategia, la táctica y las operaciones, resulta muy adecuada a la hora de abordar el proceso de planificación y control del sistema de operaciones en la empresa y es seguida por numerosos autores¹¹. De esta forma, las decisiones logísticas pueden clasificarse de acuerdo con esta estructura y así podemos considerar:

- 1) **Decisiones estratégicas:** tienen un efecto duradero en la empresa y son tomadas por la alta dirección para establecer los objetivos y los planes logísticos a largo plazo. Las principales decisiones estratégicas son:

¹¹ Ver , por ejemplo, Domínguez Machuca, Álvarez, Domínguez, García y Ruiz (1995, 6) quienes citan a Dilworth (1993, 146), Aquilano y Chase (1991, 532), Heizer y Render (1991, 532) y Anthony (1990, 20). También puede consultarse Slats, Bhola, Evers y Dijkhuizen (1992, 5) y Bramel y Simchi-Levi (1997, 3)

- Número, localización y capacidad de las diferentes instalaciones: almacenes, plantas de fabricación, centros de distribución, centros de recuperación de PFU, etc.
 - Diseño de la red logística: flujo de materiales a través de la red.
 - Procesos tecnológicos a emplear.
- 2) **Decisiones Tácticas:** aquellas con una temporalidad a medio plazo que conectan los objetivos y planes a largo plazo, establecidos en la etapa estratégica, con los planes operativos, facilitando que la consecución de estos últimos supongan el logro de los primeros, por ejemplo:
- Decisiones de producción en el Plan Agregado de Producción.
 - Decisiones de compra y de inventarios.
 - Decisiones de asignación de productos terminados a centros de distribución, de éstos a puntos de venta, de los PFU a los centros de recogida y de éstos a las instalaciones donde se llevará a cabo su recuperación económica.
 - Medios de transporte.
- 3) **Decisiones Operativas:** en donde se concretan los planes estratégicos y los objetivos globales del sistema logístico con un alto grado de detalle, de manera que las actividades a desarrollar quedarán determinadas a corto plazo, entre otras:
- Programación de la producción en el Programa Maestro.
 - Establecimiento de las rutas de transporte.
 - Configuración de la carga en los medios de transporte.

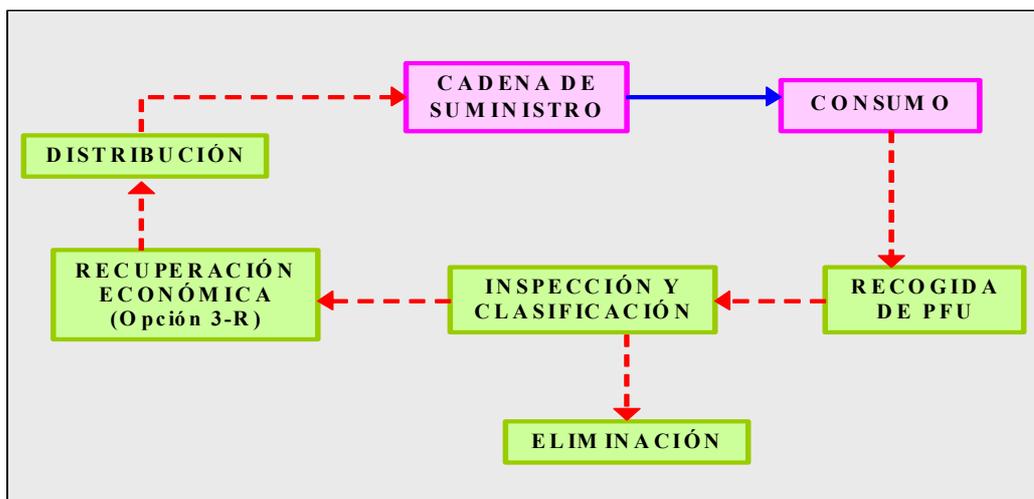
Estas implicaciones estratégicas, tácticas y operativas, en cuanto a la función inversa de la logística se refieren, dependen en gran medida de la red o sistema que

utilicemos para la recuperación de los productos fuera de uso, sistema de logística inversa, así como de la opción de gestión de PFU que se aplique en los mismos (reutilización, refabricación o reciclaje). Los diferentes sistemas de logística inversa (SLI) que pueden desarrollarse para la recuperación y el aprovechamiento de los productos fuera de uso es una cuestión que analizamos en profundidad en el capítulo III.

No obstante, estos SLI comparten aspectos funcionales que nos permitirán analizar las implicaciones que el desarrollo de los mismos tienen para la empresa. Estos factores comunes hacen referencia a las actividades necesarias para el desarrollo de la función inversa de la logística y son los siguientes:

- 1) Recogida de los productos fuera de uso.
- 2) Inspección y clasificación.
- 3) Proceso para la recuperación económica del PFU: Opciones 3-R.
- 4) Distribución.
- 5) Eliminación.

Figura 2.4: Actividades básicas en un SLI



Fuente: Elaboración propia

Cualquier sistema de logística inversa quedará diseñado de manera que integre cada una de las tareas anteriores por lo que, a través del estudio de cada una de estas actividades, podremos analizar las decisiones de carácter estratégico, táctico y operativo que caben tomar a la hora de abordar la recuperación económica de los PFU:

- 1) **Recogida de los productos fuera de uso:** Es una actividad crítica en todo proceso de recuperación ya que en ella se genera la mayor parte de la incertidumbre asociada a los SLI. La recogida de los PFU genera incertidumbres en cuanto a la cantidad de artículos que se recuperarán (*Incertidumbre Cuantitativa*) y en cuanto al momento de su recuperación (*Incertidumbre Temporal*)¹². La eficiencia de los procesos de recuperación de PFU es muy sensible al volumen de productos recuperados por lo que deberemos prestar especial atención al diseño de esta actividad intentando conseguir altas tasas de recuperación y, con ello, la obtención de economías de escala. En esta primera etapa del proceso de recuperación de PFU se adoptan ciertas decisiones de carácter estratégico; entre otras, las referidas a la localización y el número de instalaciones de recogida (centros de recuperación), la dimensión y capacidad de las mismas, la tecnología que se empleará o el diseño de dichas instalaciones. Se realizarán además tareas complementarias como el transporte de los artículos recuperados hasta los centros de recuperación y el manejo y almacenamiento de los mismos, por lo que existirán decisiones de nivel táctico como la asignación de PFU a los distintos centros de recogida, medios de transporte a utilizar o la gestión de stocks de productos recogidos. En cuanto a decisiones de carácter operativo podemos mencionar, por ejemplo, el establecimiento de las rutas de recogida de productos o la configuración de los lotes de recogida.

¹² Van Hillegersberg, Zuidwijk, van Nunen y van Eijk (2001, 77) describen además una incertidumbre asociada con el lugar donde se recuperarán los PFU, que podríamos denominar “Incertidumbre espacial o de localización”.

- 2) **Inspección y Clasificación:** hace referencia al conjunto de operaciones necesarias para determinar si los productos recogidos, o alguno de sus componentes, son susceptibles de recuperación económica y, en tal caso, qué opción de gestión se le aplicará (3-R). Hasta que el PFU no llega a esta etapa no se pueden conocer, con total certeza, las posibilidades económicas que tiene el PFU, ya que éstas dependerán del nivel de calidad que presenten los componentes recuperados (*Incertidumbre Cualitativa*). En esta fase del proceso de recuperación se desarrollarán tareas tales como el desmontaje y limpieza del producto, la realización de pruebas de calidad, la separación de los componentes para su recuperación o el almacenamiento de estos componentes y materiales. Se tomarán, por tanto, decisiones relativas a la selección y formación de los trabajadores para la realización de estas tareas, determinación de los lotes de trabajo y secuenciación de tareas, tecnologías a emplear, asignación de almacenes, control de los inventarios de productos recuperados, etc. Estas decisiones pertenecen a los niveles táctico y operativo. En el caso de que se requieran instalaciones específicas para la realización de estas actividades será necesario determinar el número, localización, capacidad y diseño de las mismas. (Decisiones estratégicas).
- 3) **Proceso de recuperación económica del PFU (3-R):** supone la utilización del producto recuperado, o de alguno de sus componentes, en el proceso productivo de la empresa. Esta actividad tiene repercusiones en los inventarios de materias primas (reciclaje), de productos en curso (refabricación) y de productos terminados (reutilización) que deberán ser analizados previamente. La recuperación de productos fuera de uso y su reintroducción en la cadena de suministro de la empresa, genera una problemática concreta que abordaremos posteriormente y que está relacionada con el diseño de la función logística tradicional (productor - consumidor). En esta fase se adoptarán además decisiones en cuanto a la

gestión de stocks de los componentes y materiales recuperados y su relación con los inventarios de elementos originales. En este sentido, es necesario señalar que los procesos de recuperación de PFU requieren, en el caso de la refabricación de productos principalmente, un análisis detallado de la situación generada y sus consecuencias sobre el proceso de Planificación y Control de la Producción, tanto en lo referente al Plan de Producción a Largo Plazo, como al Plan Agregado de Producción, el Programa Maestro de Producción o a la confección de la Lista de Materiales.

- 4) **Distribución:** Una vez que el PFU ha sido económicamente recuperado se estará en condiciones de proceder a su distribución a través de los medios que se consideren más apropiados. En esta fase, por tanto, se plantearán decisiones respecto a los medios de transporte a emplear, propios o ajenos (estratégica), el tamaño de la flota de transporte, mercados a los que se dirigirán estos productos (táctica), rutas de distribución y tamaño de los lotes (operativa), etc.
- 5) **Eliminación:** afectará a aquellos productos recuperados que no presenten los niveles de calidad requeridos para su recuperación, o bien ésta sea técnica o económicamente inviable, o bien en el caso de residuos tóxicos o peligrosos. Esta actividad exigirá decidir acerca de la forma de eliminación más conveniente, (vertedero o incineración), los medios de transporte a emplear (estratégica), almacenamiento provisional de estos residuos (táctica), manejo de los mismos (operativa), etc., de manera que su impacto sobre el medio ambiente sea mínimo.

Las decisiones que han de tomarse durante el proceso de diseño, desarrollo y control de una red logística no son independientes entre sí, sino que presentan múltiples interacciones. Esto refuerza, si cabe aún más, nuestro convencimiento sobre un diseño

integral e integrador de la función logística, en cuanto a la consideración conjunta de los flujos que la conforman.

Cuadro 2.2: Decisiones estratégicas, tácticas y operativas durante el proceso de recuperación de PFU.

	DECISIONES		
ACTIVIDADES	ESTRATÉGICAS	TÁCTICAS	OPERATIVAS
RECOGIDA PFU	<ul style="list-style-type: none"> - Localización, número y capacidad instalaciones de recogida - Dimensión y Diseño - Tecnologías a emplear 	<ul style="list-style-type: none"> - Asignación de PFU a Centros de Recogida - Gestión de Inventarios de PFU recogidos - Medios de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> - Rutas de Recogida - Lotes de Recogida - Configuración de la Carga
INSPECCIÓN Y CLASIFICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Localización, número y capacidad instalaciones de inspección y clasificación - Formación Trabajadores 	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión de Inventarios de Productos Recuperables - Asignación de tareas - Secuenciación de tareas: Desmontaje, Limpieza, Reparaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Opción 3-R a aplicar: Reutilización, Refabricación, Reciclaje
PROCESO RECUPERACIÓN VALOR (3-R)	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología - Efectos sobre el Plan de Producción a Largo Plazo 	<ul style="list-style-type: none"> - Efectos sobre el Plan Agregado de Producción - Lotes de Recuperación - Gestión de Inventarios de Productos Recuperados 	<ul style="list-style-type: none"> - Efectos sobre el Programa Maestro de Producción - Lista de Materiales
DISTRIBUCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Canales de Distribución - Mercados de destino 	<ul style="list-style-type: none"> - Asignación de productos a mercados - Medios de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> - Rutas de distribución - Lotes de distribución
ELIMINACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de eliminación - Destino productos eliminados 	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión de Inventarios de Productos No Recuperables - Medios de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> - Manipulación de los residuos

Fuente: Elaboración propia

2.5. EL DISEÑO DE LA FUNCIÓN INVERSA DE LA LOGÍSTICA

La recuperación económica de los PFU requiere el establecimiento de un sistema de logística inversa capaz de desarrollar eficientemente esta tarea. El diseño de este sistema deberá realizarse en el marco de referencia del diseño integral de la función logística (Design for Logistics, DFL). EL DFL es un tema ampliamente tratado en la literatura desde distintos puntos de vista (Corbett, 1986; Foo, Clancy, Kinney y Lindemulder, 1990; Mather, 1992). Uno de los más novedosos (Dowlatshahi, 1999) analiza las interacciones entre el diseño del producto y la función logística presentando un marco conceptual que describe, a través de un enfoque sistémico, los diferentes subsistemas en que puede descomponerse el diseño de la función logística:

- 1) Ingeniería Logística.
- 2) Logística de Fabricación.
- 3) Diseño de Envasado y Embalaje.
- 4) Diseño para el Transporte.

Naturalmente, desde nuestra perspectiva integral, consideraremos el flujo inverso de productos como parte del diseño de la logística. El hecho de que los productos tengan una posibilidad de recuperación económica al final de su vida útil, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar y desarrollar el producto en cuestión, y así incorporaremos un quinto subsistema al Diseño de la Función Logística que denominaremos “*Diseño de la Función Inversa de la Logística*” (DFIL), cuyo objetivo será optimizar la recuperación económica de los PFU. De esta forma los subsistemas contemplados en este análisis serían:

- 1) **Ingeniería Logística** Comprende el proceso en el que se establecen todos los requerimientos que la configuración final del producto debe cumplir:

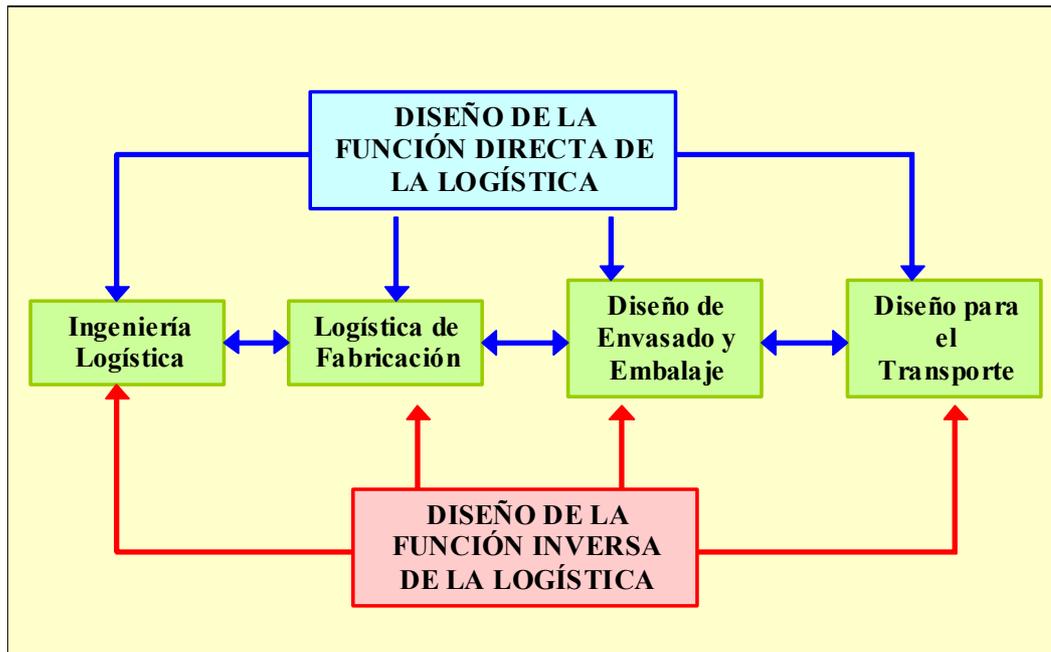
funcionamiento, tamaño, peso, seguridad, fiabilidad, coste, impacto medioambiental, etc.

- 2) **Logística de Fabricación.** Se caracteriza por el diseño y análisis de las principales actividades del sistema logístico: tipo de proceso productivo, dimensiones físicas del producto, materiales a emplear, localización y distribución de la unidad productiva, etc.
- 3) **Diseño de Envasado y Embalaje.** Determinará las especificaciones correspondientes en el proceso de diseño del producto. El envase de un producto se considera un importante instrumento de marketing, que crea o mejora la imagen del producto. Un envase inadecuado podría repercutir en un menor nivel de ventas, provocar desperfectos en el contenido, no ser capaz de satisfacer las necesidades del consumidor, aumentar los costes de manejo de materiales, transporte, almacenamiento, inventarios, etc.
- 4) **Diseño para el Transporte.** Los costes de transporte representan un porcentaje muy significativo en el total de los costes de la logística de muchas empresas. Un diseño eficiente de esta tarea comportará un incremento de la competencia en diferentes áreas geográficas, provocará economías de escala y reducciones en el precio final de los bienes y servicios.
- 5) **Diseño de la Función Inversa de la Logística.** El diseño del sistema logístico en una empresa deberá incluir este quinto subsistema referido a la recuperación de los productos fuera de uso. El objetivo de este subsistema será maximizar la recuperación económica de estos PFU y que se generen situaciones competitivamente favorables para la empresa.

El diseño de la función inversa de la logística estará íntimamente relacionado con el resto de subsistemas, afectando a su diseño, desarrollo y control. A continuación

analizamos las principales consecuencias que la consideración del flujo inverso tiene sobre el diseño de la función logística.

Figura 2.5: Componentes del diseño para la logística



Fuente: Adaptado de Dowlatshahi (1999, 64)

En su relación con el subsistema de *Ingeniería Logística*, el DFIL tiene como objetivo que en la etapa de diseño del producto se contemple la posibilidad de recuperar económicamente el producto después de su uso. Entre otros aspectos, se requerirá la reducción del número de materiales distintos a utilizar, generando una mayor estandarización de los componentes, evitar el uso de materiales tóxicos o peligrosos o, en su defecto, identificar adecuadamente dichos materiales. También es necesario aplicar conceptos de Diseño para el Desmontaje y de Diseño Modular que permitan identificar más rápidamente los elementos del PFU susceptibles de recuperación económica. Otro aspecto a tener en cuenta sería la utilización de materiales capaces de ser recuperados o al menos de ser eliminados de manera correcta desde un punto de vista medioambiental. Actualmente suele utilizarse la técnica del Análisis del Ciclo de

Vida (LCA, Life Cycle Analysis) para realizar una evaluación de las consecuencias medioambientales de un producto durante cada una de las etapas de su ciclo de vida. El objetivo de esta técnica es, grosso modo, cuantificar tanto la cantidad de energía y materiales que consume un producto, como los residuos que genera a lo largo de su vida, valorando, de esta forma, el impacto sobre el medioambiente. En cualquier caso esta interacción no debiera provocar incrementos en los tiempos de desarrollo del producto, por lo que el enfoque deberá ser integrador.

En cuanto a la *Logística de Fabricación*, las consideraciones del flujo inverso hacen referencia a aquellos procesos que permitirán recuperar el valor añadido de los PFU, a las instalaciones en las que se realizarán dichas actividades, las tecnologías a emplear, etc. Entre los aspectos ligados al DFIL que inciden sobre este subsistema, podemos señalar los siguientes:

- 1) Los procesos productivos deberán estar diseñados para dar cabida a los componentes recuperables de los PFU, siendo preferibles procesos de tipo continuo frente a procesos productivos por lotes, debido a que en los primeros, por lo general, se tiende a generar menores cantidades de residuos.
- 2) El flujo inverso de materiales generará una problemática específica en cuanto a la gestión de inventarios de estos PFU y de sus componentes recuperables, y de éstos con los inventarios de los productos originales.
- 3) Además deberán contemplarse nuevas actividades propias de la recuperación económica de los PFU tales como desmontaje, limpieza, inspección, clasificación, realización de controles de calidad, etc., todas ellas intensivas en mano de obra y que planteará, en muchos casos, una problemática específica.
- 4) Los stocks de componentes recuperados, aptos para su reutilización, refabricación o reciclaje, afectarán a la relación de la empresa con sus

proveedores habituales, los cuales pueden ver disminuidos sus pedidos, por lo que será necesario un proceso negociador con todos los miembros de la cadena de suministro, aspecto crucial para el correcto desarrollo del SLI.

La consideración de la Función Inversa de la Logística en el subsistema de *Diseño de Envasado y Embalaje*, supondrá estudiar la posibilidad de recuperar dichos envases y reciclar los embalajes ya sea dentro de la propia cadena de suministro o en otras cadenas paralelas. Se impone, por tanto, la necesidad de un menor uso de estos “elementos” o, al menos, una utilización más racional de los mismos, contemplando su sustitución por otros que contengan menor número de materiales distintos, más estandarizados, que se puedan reutilizar o, cuando menos, reciclar y que eviten los componentes tóxicos o peligrosos para el entorno.

En cuanto al *Diseño de la función de Transporte*, debería analizarse en primer lugar, el establecimiento de puntos de recogida de los PFU y de los medios que se emplearán en esta actividad: tecnología, sistemas de almacenaje, medios de transporte, etc. En este sentido, resultará determinante la posibilidad de generar sinergias entre la red de distribución directa (productor-consumidor) y la red inversa (consumidor-productor), así como desarrollar sistemas que motiven e incentiven a los “proveedores” de PFU (los consumidores) a participar en los sistemas de recuperación, de manera que los volúmenes recogidos sean elevados y generen eficiencias en el sistema de logística inversa.

Tal y como señalábamos en la introducción de este trabajo, la empresa será un actor principal en el proceso de recuperación económica de los PFU aunque no debe ser el único. Todos los miembros de la cadena de suministro (consumidores incluidos, naturalmente) deberán asumir su responsabilidad en este proceso, participando

activamente en el mismo, mediante la puesta a disposición del recuperador de los PFU. Esta será una de las claves para el éxito del sistema de logística inversa.

Cuadro 2.3: La función inversa de la logística en el DFL.

SISTEMAS DEL DFL	INTERACCIONES CON EL DISEÑO PARA LA LOGÍSTICA INVERSA (DFIL)
INGENIERÍA LOGÍSTICA	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar el número de materiales diferentes: Estandarización - Evitar materiales tóxicos y peligrosos: Identificación adecuada en caso de ser imprescindible su uso - Diseño para el desmontaje - Diseño modular
LOGÍSTICA DE FABRICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos capaces de reutilizar PFU - Gestión de materiales: Interacción Originales-Recuperados - Procesos intensivos en mano de obra - Preferencia de procesos continuos frente a procesos por lotes (menos desechos)
DISEÑO PARA EL ENVASADO Y EMBALAJE	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar número de materiales distintos en las actividades de envasado y embalaje - Evitar materiales tóxicos o peligrosos - Materiales reciclables - Minimizar el empleo de envasado y embalaje
DISEÑO PARA EL TRANSPORTE	<ul style="list-style-type: none"> - Puntos de recogida de PFU - Sistemas de recogida y transporte PFU - Integración redes de distribución directa e inversa - Motivación de los miembros de la Cadena de Suministro (Buy-back Systems, Leasing, ...)

Fuente: Elaboración propia

Como ya hemos señalado, la empresa deberá considerar la función inversa de la logística dentro del plan estratégico de la empresa; sin embargo, no siempre será posible el desarrollo de un SLI propio en el que la empresa controle el diseño y el funcionamiento del mismo y sea, por tanto, la responsable última de dicho sistema. Tal y como se ha indicado, buena parte de los productos que se comercializan no son susceptibles de una recuperación económica, ya sea por parte de la propia empresa o por parte de terceros, aunque en cualquier caso sí deberá analizarse la forma de eliminar adecuadamente, tanto medioambiental como legalmente, los PFU. Recordemos que la logística inversa contempla en su definición las actividades relativas a la eliminación de

los PFU no recuperables económicamente, por lo que el análisis anterior continuaría vigente para estos casos.

El hecho de que no todos los productos fuera de uso sean económicamente recuperables, junto con otras características técnicas y organizativas, hace que no sea posible diseñar un sistema de logística inversa válido para cualquier caso que se presente. En general, el desarrollo de un sistema de logística inversa por parte de la propia empresa dependerá, principalmente, de:

- 1) La existencia o no de un sistema logístico tradicional propio con el que buscar sinergias para la función inversa.
- 2) El tipo de producto de que se trate, en cuanto a su tecnología, facilidad de recuperación, nivel de estandarización, características técnicas, etc.
- 3) La opción de recuperación (reciclaje, refabricación o reutilización) que se aplicará al producto retornado.
- 4) El objetivo del sistema de logística inversa.
- 5) La dimensión de la empresa y sus objetivos empresariales.
- 6) La estructura del canal de distribución.

En cualquier caso, el diseño de los sistemas de logística inversa presenta una problemática específica que le diferencia claramente de los sistemas tradicionales. Nos referimos concretamente a la incertidumbre asociada a los procesos de recuperación de productos fuera de uso, tanto desde el punto de vista de la cantidad de productos recuperados (Incertidumbre Cuantitativa), como desde el punto de vista de la calidad de los mismos (Incertidumbre Cualitativa), en relación con el momento de la recuperación (Incertidumbre Temporal) o debida al lugar de recuperación de los PFU (Incertidumbre de Localización). Sobre estas cuestiones debatiremos ampliamente en el capítulo III.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO

- 3.1. INTRODUCCIÓN.**
- 3.2. SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA: CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIONES.**
- 3.3. MODELOS CUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA.**
 - 3.3.1. Modelos para la reutilización.**
 - 3.3.2. Modelos para el reciclaje.**
 - 3.3.3. Modelos para la refabricación.**
- 3.4. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA.**
 - 3.4.1. El diseño de modelos de logística inversa.**
 - 3.4.2. Incertidumbre en los sistemas de logística inversa.**
 - 3.4.3. Dinámica en los sistemas de logística inversa.**
- 3.5. PROPUESTAS PARA LA MODELIZACIÓN DE SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA.**

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LOS PRODUCTOS FUERA DE USO

3.1. INTRODUCCIÓN.

La consecución de ventajas competitivas sostenibles a través de la recuperación y gestión de los productos fuera de uso requiere analizar la forma en que estos productos llegarán de nuevo a la cadena de suministro.

Naturalmente, será la función logística de la empresa, en su consideración de flujo inverso, la que permita recuperar dichos productos y materiales fuera de uso y gestionarlos para obtener así una rentabilidad económica. Como ya apuntamos en el capítulo anterior, la recuperación económica de productos fuera de uso no siempre será posible y, en caso de que lo fuera, podrían plantearse distintas opciones para llevar a cabo la misma. De esta forma, podemos analizar diferentes sistemas de logística inversa

(SLI) a través de los cuales desarrollar el proceso de recuperación económica del producto fuera de uso, de acuerdo con las características propias del producto, del proceso, de la empresa o de la estructura existente en la cadena de suministro, entre otras.

Para una gestión eficiente de este flujo inverso podemos utilizar modelos cuantitativos que permitan obtener conclusiones acerca del funcionamiento de la función inversa de la logística, tanto en lo referente a su diseño (puntos de recuperación, centros de clasificación, flujos de distribución) como en lo que atañe a las consideraciones económicas (rentabilidad, costes, beneficios).

En este capítulo estudiaremos en primer lugar los diferentes SLI que pueden considerarse a la hora de desarrollar un sistema de recuperación económica de los PFU, estableciendo una clasificación de los mismos. Seguidamente, proponemos una revisión bibliográfica de los diferentes modelos cuantitativos diseñados para apoyar el proceso de toma de decisiones acerca de la función inversa de la logística. En tercer lugar, analizaremos las principales características que presentan estos modelos de logística inversa y señalaremos los problemas y carencias existentes. Por último, formularemos algunas propuestas para la modelización de los sistemas de logística inversa que nos permitan corregir esas limitaciones y reflejar, de una manera más precisa, la situación que se plantea.

3.2. SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA: CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIONES.

Las posibilidades de recuperación económica no son las mismas para todos los productos fuera de uso, e incluso las opciones existentes para la gestión de los productos

recuperados, difieren según el producto de que se trate, los mercados de destino, los canales de distribución existentes, etc. Así pues, se hace imposible establecer un único sistema a través del cual modelizar la función inversa de la logística. La diversidad es tal, que puede hablarse de un sistema diferente para cada empresa en cuestión, por lo que se suele decir que el diseño de la función logística se realiza a medida; sin embargo, en determinados aspectos de esta función inversa intentaremos buscar puntos de encuentro que nos ayuden a simplificar esta tarea.

Uno de los primeros trabajos en el que se aborda la problemática de los sistemas de recuperación de PFU es el de Ginter y Starling (1978) que presentan una descripción genérica de canales de distribución inversa, consumidor-productor, para el reciclaje de residuos sólidos, identificando las principales funciones y características de los mismos. Así los autores identifican dos funciones básicas de estos sistemas:

- 1) Clasificación de los productos recuperados, haciendo especial mención de la importancia que los intermediarios tienen a la hora de desarrollar esta función.
- 2) Concentración de productos similares en lotes homogéneos, en oposición a la función de fragmentación de la producción existente en el canal directo.

Bloemhof–Ruwaard, Fleischmann y van Nunen (1999) realizan un análisis más detenido de los posibles SLI que pueden considerarse en el proceso de recuperación económica de los PFU, estableciendo una clasificación de acuerdo con la opción de gestión a utilizar en este proceso: Reutilización, Refabricación, Reciclaje y Devolución. Por su parte, Fleischmann, Krikke, Dekker y Flapper (2000) describen una tipología de redes logísticas para la recuperación de productos similar a la anterior, en la que distinguen entre tres sistemas de recuperación de acuerdo con la opción de gestión utilizada: Reciclaje, Refabricación, Reutilización.

Dado que estas clasificaciones utilizan el mismo criterio para la descripción de los SLI (la opción de gestión empleada) estudiaremos simultáneamente ambas, presentando las principales características de cada sistema:

- 1) **Redes para el Reciclaje.** Suelen ser estructuras simples, con pocos eslabones y centralizadas que se caracterizan por requerir, para una gestión eficiente de la misma, un elevado volumen de inputs (productos recuperados) generalmente de escaso valor unitario. Los altos costes de transformación determinan la necesidad de altas tasas de utilización de estas redes y la búsqueda de economías de escala.
- 2) **Redes para la Refabricación de Productos.** Su principal objetivo es la recuperación de partes y componentes de productos con alto valor añadido. En estos sistemas los fabricantes originales suelen desempeñar una labor muy importante, siendo en ocasiones los únicos responsables del diseño y la gestión del SLI. El diseño de la red responde a una tipología multi-nivel, de carácter descentralizado, para la que se suelen buscar sinergias con el canal directo.
- 3) **Redes de Productos Reutilizables.** En estos sistemas los productos recuperados se reintroducen en la cadena de suministro una vez realizadas las necesarias operaciones de limpieza y mantenimiento. Suelen ser estructuras descentralizadas por las que circulan simultáneamente productos originales y reutilizados y en las que el coste de transporte aparece como el más significativo.

Cuadro 3.1: SLI según la opción de gestión empleada.

	RED REFABRICACIÓN	RED REUTILIZACIÓN	RED RECICLAJE
Estructura de la red	<ul style="list-style-type: none"> - Closed-Loop - Compleja - Descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> - Closed-Loop - Simple - Descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> - Open-Loop - Simple - Centralizada
Producto	<ul style="list-style-type: none"> - Diferenciado - Alto valor añadido - Tecnología avanzada - Recuperación de partes y componentes del PFU 	<ul style="list-style-type: none"> - Estandarizado - Escaso valor residual - Escasa tecnología - Recuperación del PFU 	<ul style="list-style-type: none"> - Estandarizado - Escaso valor residual - Escasa tecnología - Recuperación del material del PFU
Proceso	<ul style="list-style-type: none"> - Múltiples tareas: <ul style="list-style-type: none"> ~ Recuperación ~ Desmontaje ~ Inspección ~ Clasificación ~ Montaje - Elevados costes operativos 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso Simple - Mínimas operaciones de mantenimiento - Transporte actividad más importante 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos tecnología avanzada - Inversión inicial elevada - Pocas tareas
Incertidumbre	Cualitativa	Cuantitativa y Temporal	Cuantitativa
Mercado	Interacción "Originales-Refabricados"	Mismo Mercado	Mercados Diferentes
Factor de éxito	Integración canal directo y canal inverso	<ul style="list-style-type: none"> - Economías de Escala - Prevención pérdida PFU 	Economías de Escala
Relaciones en el Canal Inverso	Posición dominante de los fabricantes (OEM)	Posición dominante de los fabricantes (OEM)	Posición dominante de suministradores y OEM
Ejemplos	Fotocopiadoras, teléfonos móviles, circuitos impresos, cámaras fotográficas, tóners.	Envases y embalajes	Reciclaje de arena, moquetas y escorias industriales

Fuente: Elaboración propia

Otro criterio para la clasificación de los sistemas de logística inversa en la empresa puede formularse atendiendo a quién desarrolla y gestiona dicho sistema. Quizá, la primera decisión que debe tomarse a la hora de diseñar el SLI a través del cual recuperar económicamente los PFU sea si emplear, para tal fin, medios propios o ajenos a la empresa. De acuerdo con este criterio, establecemos la siguiente clasificación para los SLI:

- 1) **Sistemas Propios de Logística Inversa.** En este caso es la misma empresa la que diseña, gestiona y controla la recuperación y reutilización de sus productos fuera de uso. Las empresas que desarrollan sus propios SLI suelen caracterizarse por ser líderes en sus respectivos mercados, en los que la identificación entre empresa y producto es muy alta. Se trata, generalmente, de fabricantes de productos complejos y tecnológicamente avanzados, diseñados para poder recuperar parte del valor añadido que incorporan (Diseño para el Medio Ambiente, DFE, Diseño para el Desmontaje, DFDA). Aunque el responsable último del sistema sea la propia empresa, suele ser habitual que algunas actividades sean realizadas por terceros ajenos a la empresa, por ejemplo la recogida de productos y su transporte hasta el centro de recuperación. El proceso productivo utilizado para recuperar el valor añadido del producto fuera de uso suele ser un proceso complejo, con múltiples tareas, en los que existe una utilización intensiva de mano de obra. La red logística que se desarrollará para recuperar estos productos se caracteriza por ser una red compleja, con múltiples eslabones, generalmente descentralizada y en las que el producto recuperado vuelve a introducirse en la cadena de suministro original (closed-loop). Empresas como Xerox, IBM, Electrolux o Bosch son algunas de las que cuentan con sistemas propios de logística inversa. Podemos identificar este sistema con la *Red para la Refabricación* de la clasificación anterior.

- 2) **Sistemas Ajenos de Logística Inversa.** En este caso la empresa responsable de la introducción del producto en el mercado no gestiona directamente el proceso de recuperación, sino que esta función es realizada, en su mayor parte, por terceros ajenos a la empresa. De esta manera la empresa puede optar bien por participar en un Sistema Integrado de Gestión (SIG) o bien contratar los servicios de una empresa especializada en la realización de este tipo de actividades:

- 2.1. **Adhesión a un Sistema Integrado de Gestión.** Un SIG es una organización que promueve y gestiona la recuperación de productos fuera de uso para su posterior tratamiento o su adecuada eliminación. Los SIG están constituidos por miembros de la cadena de suministro (proveedores, fabricantes y distribuidores) los cuales financian el sistema de acuerdo con su participación en el mercado. En España existen distintos SIG, entre otros, ECOEMBES (envases y embalajes), ECOPILAS (baterías y pilas de uso doméstico) o ECOVIDRIO (envases de vidrio). Generalmente las empresas adheridas a Sistemas Integrales de Gestión comparten determinadas características: suelen fabricar productos bastante homogéneos, poco complejos tecnológicamente y de escaso valor unitario, en los que se suele recuperar el material o materiales con los que está fabricado el producto (*Red para el Reciclaje*). Estas agrupaciones permiten lograr eficiencias tanto técnicas como económicas a la hora de recuperar y reutilizar los productos fuera de uso. Las redes logísticas suelen ser estructuras centralizadas, de carácter simple, con pocos eslabones y en las que el producto recuperado no se destina, necesariamente, a la cadena de suministro original (open-loop), por lo que los productos originales y los recuperados no suelen compartir los mismos mercados finales.
- 2.2. **Profesionales de la Logística Inversa.** Las empresas pueden también optar por la contratación de empresas especializadas para la prestación de servicios de logística inversa¹³. Por lo general, esta opción suele ser empleada por empresas que diseñan la función inversa desde el final de la cadena para hacer frente, bien a la legislación vigente (residuos peligrosos o tóxicos), o bien a necesidades operativas (logística de devoluciones). Suelen ser

¹³ Ver Sánchez et al. (2001, 17) para una relación de profesionales de la Logística Inversa

empresas cuya función logística tradicional (productor-consumidor) está en manos de profesionales logísticos que desarrollarán también esta función inversa. El objetivo de este SLI es cumplimentar la legislación existente, tanto en lo referente a las garantías de los consumidores (devoluciones), como en cuanto a los residuos de carácter tóxico o peligroso que se generan en la fase de consumo. Este tipo de redes son, por lo general, sistemas logísticos simples, con pocos eslabones, en los que la función de transporte adquiere una importancia determinante y que presentan una estructura descentralizada.

Cuadro 3.2: SLI según quién desarrolla el sistema.

	SISTEMA PROPIO	SISTEMA AJENO	
		Sistema Integrado de Gestión (SIG)	Profesionales de la Logística
EMPRESA	<ul style="list-style-type: none"> - Líder de mercado - Estrategia medioambiental definida - Posición dominante cadena suministro 	<ul style="list-style-type: none"> - PYME - Desarrollo SLI por motivos legales - Necesidad de agruparse con otros miembros cadena suministro 	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo directo logístico subcontratado - Desarrollo de SLI por motivos operativos: devoluciones, residuos tóxicos o peligrosos
PRODUCTO	<ul style="list-style-type: none"> - Muy diferenciado - Alto valor añadido - Tecnología avanzada - Estructura compleja - DFE, DFDA 	<ul style="list-style-type: none"> - Poco diferenciado - Escaso valor añadido y residual - Escasa tecnología - Diseño para el Reciclaje (DFR) 	<ul style="list-style-type: none"> - Diversidad de productos - Obsoletos, con fallos de calidad, dañados, tóxicos o peligrosos
PROCESO	<ul style="list-style-type: none"> - Múltiples tareas - Intensivo en mano de obra - Transporte muy relevante 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso complejo - Tecnología avanzada - Alta inversión inicial 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso simple - Pocas tareas - Intensivo en mano de obra
MERCADO PARA LOS PRODUCTOS RECUPERADOS	Mismo mercado que los originales	Mercado distinto que los originales	<ul style="list-style-type: none"> - Comparten mercado en Reutilización - Distinto mercado en Devoluciones
DISEÑO DE LA RED	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de integrar flujo Directo e Inverso - Descentralizada - Compleja - Closed-Loop - Subcontratación algunas actividades 	<ul style="list-style-type: none"> - Open Loop - Centralizada - Simple, con pocos niveles - Transporte significativo 	<ul style="list-style-type: none"> - Open Loop en Devoluciones y Closed Loop en Reutilización - Simple y descentralizada - Transporte significativo
OBJETIVO DEL SLI	Recuperar elementos de alto valor añadido	Cumplimiento normativa sobre residuos	Cumplimiento normativa sobre residuos y garantías al consumo
OPCIONES DE GESTIÓN 3-R	REFABRICACIÓN	RECICLAJE	REUTILIZACIÓN Y DEVOLUCIONES
EJEMPLOS	<ul style="list-style-type: none"> - Xerox - IBM - Hewlett-Packard 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoembes - Ecovidrio - Ecopilas 	<ul style="list-style-type: none"> - Genco - UPS - GATX Logistics

Fuente: Elaboración propia

Naturalmente, estas tipologías, perfectamente definidas, se consideran puntos de referencia para el diseño de SLI, siendo posible la interacción entre sistemas propios y ajenos, por ejemplo, a través de la subcontratación de determinadas actividades del

proceso de recuperación económica que, por sus especiales características, puedan considerarse críticas y requieran de una gestión especializada.

Es necesario señalar que el diseño de cualquier SLI presentará un alto grado de incertidumbre, principalmente, en la oferta de productos fuera de uso, que condicionará el desarrollo y funcionamiento de estos sistemas. Cabe distinguir cuatro fuentes generadoras de incertidumbre en el canal inverso:

- 1) En cuanto a la cantidad de los PFU: *Incertidumbre Cuantitativa*.
- 2) En cuanto a la calidad de los PFU: *Incertidumbre Cualitativa*.
- 3) En cuanto al momento de la recuperación: *Incertidumbre Temporal*.
- 4) En cuanto al lugar de recuperación: *Incertidumbre Espacial o de Localización*.

El diseño de la función inversa de la logística requerirá contemplar estas incertidumbres, para lo cual parece pertinente el empleo de técnicas cuantitativas que permitan incorporar estas consideraciones.

3.3. MODELOS CUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA.

El estudio de la función inversa de la logística se ha venido desarrollando desde sus inicios junto con la elaboración de modelos cuantitativos, permitiendo así obtener información más precisa sobre el diseño y el funcionamiento de la red inversa y mejorando el proceso de toma de decisiones. De esta forma, resulta necesario considerar, junto con el análisis de los sistemas de logística inversa, los modelos cuantitativos diseñados para su descripción y estudio.

La recopilación de la bibliografía existente sobre determinada cuestión puede ser una tarea muy laboriosa si, de antemano, no se delimita el problema que pretendemos analizar. En nuestro caso, nos interesa comprobar cómo se ha abordado la modelización de los sistemas de logística inversa en la literatura, en lo que se refiere a la recuperación de los productos fuera de uso y a las opciones de gestión existentes para ellos.

Para llevar a cabo esta revisión bibliográfica realizaremos una clasificación de distintos modelos cuantitativos en la que hemos utilizado, como criterio de clasificación, la opción de gestión empresarial que se va a aplicar al producto recuperado (Opción 3-R): Reutilización, Refabricación y Reciclaje.¹⁴

3.3.1. Modelos para la reutilización.

Kroon y Vrijens (1997) analizan un sistema para la reutilización de contenedores en una empresa de servicios logísticos de Holanda. Los autores utilizan el término Sistema Logístico de Devoluciones (Return Logistics System) para referirse a la consideración de la Función Inversa de la Logística en la etapa de la distribución física, ya que, como muy bien apuntan, la logística inversa puede aplicarse a las diferentes etapas de la cadena logística. Para este trabajo plantean un modelo de simulación y un modelo de Programación Lineal Entera Binaria que intenta responder a las siguientes cuestiones: número de contenedores disponibles, localización de los mismos, funcionamiento del sistema y cuotas de recogida, distribución y servicio. Se trata de un modelo clásico de localización de instalaciones, de carácter estático, que se resuelve para distintos escenarios, de manera que se amortigüe el efecto de la incertidumbre asociada a estos modelos. Aunque este modelo no responde a todas las cuestiones planteadas, los resultados obtenidos proporcionan información válida para el proceso de toma de decisiones de la empresa. Los autores, conscientes de las limitaciones del modelo, proponen algunas mejoras consistentes en la utilización de

¹⁴ Una clasificación similar puede verse en Fleischmann et al. (2000)

técnicas más fiables para la determinación de la demanda de contenedores, introducir varios periodos temporales, distintos tipos de contenedores, etc., que reflejen más fielmente la situación.

Krikke, Kooki y Schuur (1999) presentan un modelo de Programación Lineal Entera Mixta, que permite el diseño de una red de logística inversa para la recuperación y refabricación de automóviles. Este modelo supone que el recuperador del automóvil recicla una parte del mismo (30%) y refabrica el resto. Cada una de estas opciones de gestión se llevará a cabo en instalaciones diferentes por lo que será necesario establecer las rutas que seguirán estos productos fuera de uso.

Cuadro 3.3: Modelos cuantitativos para la reutilización.

AUTOR	Kroons y Vrijens (1995)	Krikke et al. (1999)
PRODUCTO	Contenedores Retornables	Industria Automovilística
OPCIÓN 3-R	Reutilización	Reciclaje y Reutilización
MODELIZACIÓN	Optimización PLEB estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
DECISIONES	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: <ul style="list-style-type: none"> ~ Número instalaciones ~ Localización de instalaciones - Tácticas: <ul style="list-style-type: none"> ~ Número de contenedores ~ Asignación de contenedores ~ Cuotas de servicio 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: <ul style="list-style-type: none"> ~ Localización instalaciones recogida ~ Localización instalaciones reproceso - Tácticas: <ul style="list-style-type: none"> ~ Asignación del flujo materiales entre localizaciones
ESTRUCTURA RED	<ul style="list-style-type: none"> - Closed Loop - Flujos logísticos integrados 	Open-Loop
TIPO DE SLI	Propio con participación de profesionales	Propio
ANÁLISIS DE ESCENARIOS	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Modelos para el reciclaje.

Spengler, Püchert, Penkuhm y Rentz (1997) formulan dos modelos de Programación Lineal Entera Mixta con aplicaciones, por una parte, al reciclaje de subproductos industriales (escorias) y, por otra, al desmantelamiento y reciclaje de viviendas. En el primer modelo se estudia el problema de localización de instalaciones y asignación de flujos, de forma similar a un modelo tradicional de localización de almacenes (Warehouse Location Problem) en el que se determinan la localización de la instalación de reciclaje, su capacidad y la opción de reciclaje a utilizar para cada uno de los subproductos obtenidos en el proceso de fabricación del acero. En el segundo modelo se plantea el diseño de un sistema integrado para el desmantelamiento y reciclaje de viviendas, donde ambos procesos son interdependientes; es decir, el desmantelamiento se producirá sólo si las opciones de reciclaje son económicamente viables, mientras que el reciclaje requerirá del conocimiento previo de los materiales obtenidos en el derribo de las viviendas. Se trata de un problema de maximización de una función de beneficios, definida como la diferencia entre los ingresos procedentes de la reutilización de los materiales y los costes de las operaciones de demolición. Los resultados obtenidos muestran que la opción de integrar los procesos de desmantelamiento y reciclaje puede reducir los costes hasta un 20% respecto al procedimiento actual de demolición y vertido de los materiales. En cualquier caso, los autores consideran que sería necesario establecer medidas medioambientales que promuevan la demolición selectiva de edificios, con objeto de incrementar las posibilidades de reciclaje de estos escombros y con ello la rentabilidad económica de estas actividades.

Ammons, Realff y Newton (1997) desarrollan un modelo de Programación Lineal Entera Mixta que sirve de apoyo al proceso de diseño y desarrollo de una red de reciclaje de moquetas en Estados Unidos. Se trata de un modelo estático que maximiza una función de beneficios, definida como la diferencia entre el valor total del material reciclado y los costes generados durante el proceso (transporte y reciclaje), sujeta a

determinadas restricciones de capacidad y de conservación. El modelo determina el número de instalaciones de recogida del material y de reciclaje que serán operativas así como los flujos asignados entre los distintos nodos. Este programa fue utilizado para determinar la conveniencia de abrir nuevas instalaciones para el reciclaje de estos productos fuera de uso en la empresa DuPont.

Barros, Dekker y Scholten (1998) diseñan un sistema para la recuperación y el reciclaje de arena proveniente de construcciones. Se trata de un modelo de localización de instalaciones y asignación de flujos, formulado a través de un problema de Programación Lineal Entera Mixta. Este modelo, de carácter estático, se aplica a un caso real del sector de la construcción en Holanda. El trabajo subraya la importancia que la Teoría de la Localización¹⁵ tiene en la gestión de los residuos, ya que, en primer lugar, proporciona modelos y métodos de solución para manejar eficientemente el problema y, en segundo lugar, ofrece posibilidades para modificar las condiciones originales de la red y así considerar distintos escenarios. Esto último es particularmente importante a la hora de considerar el problema de la incertidumbre de los productos recuperados.

Realf et al. (1999) recuperan el modelo de reciclaje de moquetas de Ammons et al. (1997) utilizando, en este caso, un horizonte temporal que permite considerar la estructura dinámica de la red de reciclaje. Los autores proponen un modelo de Programación Lineal Entera Mixta como sistema de apoyo para la toma de decisiones acerca de la localización de instalaciones de reciclaje, las tareas a realizar en dichas instalaciones y los flujos de materiales que se asignarán entre las instalaciones. El modelo fue validado con datos reales realizándose, posteriormente, un análisis de sensibilidad.

¹⁵ Ver por ejemplo, Vallhonrat y Corominas (1991), Domínguez Machuca et. al (1995) o Fernández y Vázquez (1994).

Cuadro 3.4: Modelos cuantitativos para el reciclaje (I)

AUTOR	Spengler et al. (1997)	Spengler et al. (1997)	Barros et al. (1998)	Ammons et al. (1999)
PRODUCTO	- Demolición de viviendas - Materiales de Construcción	Subproductos del hierro y del acero	Arena para la construcción	Moquetas
OPCIÓN 3-R	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje
MODELO	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
DECISIONES	- Tácticas: ~ Asignación de opciones 3-R.	- Estratégicas: ~ Localización instalaciones ~ Tipo y capacidad procesos - Tácticas: ~ Asignación de subproductos a procesos	- Estratégicas: ~ Número de instalaciones ~ Localización instalaciones - Tácticas: ~ Asignación de PFU a instalaciones	- Estratégicas: ~ Número instalaciones recogida ~ Número instalaciones reciclaje - Tácticas: ~ Asignación entre instalaciones
ESTRUCTURA RED	Open-Loop	Open-Loop	Open-Loop	Open-Loop
TIPO DE SLI	Ejercicio Simulación	Ejercicio Simulación	Ejercicio Simulación	Ejercicio Simulación
ANÁLISIS DE ESCENARIOS	No	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

Louwens, Kip, Peters, Souren, y Flapper (1999) proponen también un modelo de localización y asignación para el reciclaje de moquetas en Alemania y en Estados Unidos. En la Unión Europea se generan al año más de 1,6 millones de toneladas de residuos de este material que son, habitualmente, depositadas en vertederos. En Estados Unidos esta cifra llega a 1,85 millones de toneladas. El Proyecto RECAM tiene como objetivo la constitución de una red europea para el reciclaje de estos materiales o su utilización como combustible. Para ello, se propone un modelo matemático en el que determinar la localización física de las instalaciones, sus capacidades, la asignación de los flujos de materiales a estas instalaciones y los medios de transporte. Este modelo se distingue de otros modelos matemáticos para la localización de instalaciones en que no

restringe inicialmente el conjunto de ubicaciones posibles, siendo la elección completamente libre. El problema se traduce en la minimización de una función general de costes en la que se consideran costes de adquisición, transporte y almacenamiento del material recuperado, los costes originados por el proceso de reutilización, los costes de inventario y transporte del material procesado y los costes de eliminación de los residuos generados. Los resultados obtenidos sugieren que es posible constituir redes económicamente viables para la reutilización de estos materiales.

Fleischmann (2001) describe un “Modelo Genérico para una red de recuperación de productos fuera de uso”, mediante la formulación de un problema de Programación Lineal Entera Mixta. El problema se asemeja bastante con los tradicionales problemas de localización de almacenes o centros de distribución. En concreto, el problema consiste en diseñar una red logística que conecta dos mercados, uno donde se recupera el producto (mercado de eliminación) y otro donde se vende el producto recuperado (mercado de reutilización). Se consideran tres tipos de instalaciones que, situadas en distintos niveles, conectarán ambos mercados. Estas instalaciones son los centros de desmontaje, donde se recogen y clasifican los productos fuera de uso, las instalaciones de refabricación o reciclaje y los centros de distribución. El modelo se propone como un problema de minimización de una función de costes de inversión y operación, en donde se toman decisiones acerca del número y localización de las instalaciones que serán operativas (variables estratégicas de carácter binario) y los flujos que se asignarán a cada instalación (variable táctica de carácter continuo). Este modelo se aplica a dos ejemplos distintos, uno para la refabricación de fotocopiadoras y otro para el reciclaje de papel. En este apartado presentamos los principales resultados obtenidos para la red de reciclaje y en el siguiente apartado presentaremos el modelo de refabricación. Con este ejemplo el autor pretende analizar si la consideración del flujo inverso de la logística, una vez diseñado e implantado el flujo hacia adelante (diseño secuencial), difiere significativamente, en términos de costes, del diseño de la función logística de la empresa que se hubiera realizado integrando los flujos directo e inverso de la función

logística (diseño integral). Así se pone de manifiesto que el diseño integral de la función logística genera una posición más favorable para la empresa, en cuanto que supone menores costes totales, que la secuenciación del diseño de la red logística.

Shih (2001) estudia una red para el reciclaje de equipamiento eléctrico y electrónico en Taiwán, en donde la adecuada eliminación de estos productos fuera de uso. La legislación de este país obliga a fabricantes e importadores a recuperar sus productos y gestionar adecuadamente los residuos que se generan. Para ello se ha creado una red de recuperación y reciclaje de estos productos que cuenta con un conjunto de puntos de recogida, generalmente los propios puntos de venta, desde donde se transportan los productos hasta unos almacenes que actúan como centros de clasificación de los artículos recibidos. Desde aquí se envían a los centros de desmontaje y reciclaje en donde los distintos productos son sometidos a las operaciones necesarias para su apropiada eliminación o su aprovechamiento en mercados secundarios. El diseño planteado para esta red de reciclaje se estructura entre los oferentes (puntos de recogida) y los demandantes (mercados secundarios o eliminación) de los productos fuera de uso, a través de dos niveles por los que circularán dichos productos (almacenes y centros de desmontaje y reciclaje). Se propone un modelo de Programación Lineal Entera Mixta, con el objetivo de maximizar una función de beneficios; los ingresos de este sistema provienen de la venta del material reciclado y de las cuotas satisfechas por fabricantes e importadores para su participación en el sistema de reciclaje. Los costes totales se generan por nuevas instalaciones, transporte, costes operativos, de proceso y de eliminación de los productos recuperados. Esta función de beneficios se maximiza de acuerdo con unas restricciones de carácter técnico y económico. Para tratar con la incertidumbre asociada con los sistemas de recuperación de productos fuera de uso, se realiza un análisis paramétrico en el que se consideran distintos escenarios de funcionamiento del sistema.

Cuadro 3.5: Modelos cuantitativos para el reciclaje (y II).

AUTOR	Realff et al. (1999)	Lowers et al. (1997)	Shih (2001)	Fleischmann (2001)
PRODUCTO	Moquetas	Moquetas	Ordenadores y pequeños aparatos eléctricos	Papel
OPCIÓN 3-R	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje
MODELO	Optimización PLEM estática y determinista	Programación matemática estática y determinista. Algoritmos numéricos	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
DECISIONES	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: - Número instalaciones recogida y reciclaje - Tácticas: ~ Asignación de flujo entre instalaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Número, localización y capacidad de instalaciones ~ Número de puntos de recogida y de destino - Tácticas: ~ Asignación de flujos a través de la red 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Número de almacenes y plantas de reciclaje ~ Localización de dichas instalaciones - Tácticas: ~ Asignación de PFU a almacenes ~ Asignación de almacenes a plantas de reciclaje 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Número y localización de plantas proceso ~ Número y localización de puntos de distribución y de reciclaje - Tácticas: ~ Asignación entre instalaciones
ESTRUCTURA RED	Open-Loop	Open-Loop	Open-Loop	<ul style="list-style-type: none"> - Open-Loop - Flujos logísticos integrados
TIPO DE SLI	SLI Propio	Proyecto para un SIG	SIG	Ejercicio Simulación
ANÁLISIS DE ESCENARIOS	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Modelos para la refabricación.

Krikke (1998) desarrolla un modelo para la recuperación y posterior refabricación de fotocopiadoras en Europa. Se trata de un modelo diseñado para estudiar las decisiones estratégicas tomadas por una multinacional holandesa en cuanto a su sistema logístico. Concretamente el modelo formula una red de logística inversa para

dos modelos diferentes de fotocopiadora, el cual será analizado en diferentes escenarios para así considerar las distintas situaciones planteadas por la gerencia de la empresa. Las características intrínsecas de este problema llevan a considerar redes distintas para cada producto, modelizando cada problema a través de Programación Lineal Entera Mixta.

Jayaraman, Guide y Srivastava (1999) proponen un modelo genérico de logística inversa formulado a través de un problema de Programación Lineal Entera Mixta y su posterior aplicación en la industria de productos electrónicos de consumo (teléfonos móviles según Fleischmann et al., 2000). En este modelo, de carácter estático, una empresa ofrece sus productos refabricados a consumidores localizados en determinadas zonas geográficas a través de unos almacenes o centros de distribución. En concreto, la empresa deberá determinar: 1) el número de instalaciones existentes y si éstas serán operativas o no, 2) qué cantidad de productos se recogerá en cada una de las zonas de consumo existentes y serán transportadas a cada instalación y 3) qué cantidad de producto refabricado se distribuirá desde cada instalación a cada zona de consumo. Se trata de un problema de minimización de una función de costes sujeto a unas restricciones de capacidad. Como muy bien apuntan los autores, los procesos de refabricación se encuentran sometidos a un mayor grado de incertidumbre (cuantitativa, cualitativa y temporal) que los clásicos procesos de fabricación, por lo que se contemplan distintos escenarios que minoren el efecto de la incertidumbre. La principal conclusión del modelo es la constatación de que los resultados obtenidos son muy sensibles a la modelización que se haga tanto de la demanda de productos refabricados como de la cantidad de productos usados (cores) que se recuperen. Los autores proponen medidas para incrementar la cantidad de productos usados recogidos, mediante acuerdos con los consumidores (por ejemplo, contratos de leasing o depósitos) o la imposición de multas por la eliminación directa de los productos fuera de uso.

Klausner y Hendrickson (2000) analizan un programa voluntario de recogida de máquinas herramienta en Alemania, las cuales son recicladas o refabricadas. Dado que la refabricación requiere de un flujo más o menos continuo de productos fuera de uso, el modelo establece un sistema para incentivar la devolución al fabricante de los productos fuera de uso (buy-back system). El objetivo del modelo es determinar el coste óptimo de ese sistema de incentivos y, en general, el coste óptimo del sistema de logística inversa. Se trata de un modelo de simulación en el que se establecen relaciones de carácter lineal entre las variables y parámetros del modelo. De acuerdo con el modelo planteado, los autores concluyen que aunque sería deseable una tasa más elevada de recuperación de productos fuera de uso, los beneficios obtenidos por el proceso de refabricación permitirían afrontar el coste del sistema de incentivos establecido.

Fleischmann (2001) aplica su “Modelo Genérico de Recuperación” a un ejemplo de refabricación de fotocopiadoras en el que, como en el caso de la red para el reciclaje analizado anteriormente, trata de evaluar las ventajas de un diseño integral de la función logística frente al diseño secuencial. En este caso, el establecimiento de una red de logística inversa una vez instalada la red hacia adelante, no genera costes significativamente distintos a los obtenidos en el supuesto de diseñar e implantar, simultáneamente, los flujos directo e inverso de la logística. En cualquier caso, tal y como señala este autor, “la existencia de una red logística hacia adelante no supone una barrera de entrada para el establecimiento de la red inversa”. Nosotros nos permitimos añadir que en cualquier caso, el diseño integral de la función logística generará sinergias entre el flujo directo y el flujo inverso, que redundarán en la consecución de ventajas competitivas sostenibles para la empresa.

Cuadro 3.6: Modelos cuantitativos para la refabricación.

AUTOR	Krikke (1998)	Jarayanan et al. (1999)	Klausner y Hendrickson (2000)	Fleischmann (2001)
PRODUCTO	Fotocopiadoras	Teléfonos móviles	Máquinas herramienta	Fotocopiadoras
OPCIÓN 3-R	Refabricación	Refabricación	Refabricación	Refabricación
MODELO	Optimización PLEM estática y determinista	Programación matemática estática y determinista. Algoritmos numéricos	Simulación estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
DECISIONES	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Localización de plantas de recogida ~ Localización de plantas de refabricación 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Localización de instalaciones - Tácticas: ~ Asignación de materiales entre plantas ~ Decisiones de almacén 	<ul style="list-style-type: none"> - Tácticas: ~ Coste del sistema Buy-back 	<ul style="list-style-type: none"> - Estratégicas: ~ Número y localización de plantas de fabricación, distribución y refabricación - Tácticas: ~ Asignación entre instalaciones
ESTRUCTURA RED	Closed-Loop	Closed-Loop	Closed-Loop	<ul style="list-style-type: none"> - Open-Loop - Flujos logísticos integrados
TIPO DE SLI	SLI Propio	Modelización para un SLI propio	SLI propio	Ejercicio Simulación
ANÁLISIS DE ESCENARIOS	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

Existen más trabajos relacionados con las redes de recuperación de productos fuera de uso que no hemos mencionado aquí, por haber sido diseñados para el análisis de cuestiones más específicas como por ejemplo, el efecto sobre los inventarios (Van der Laan y Salomon, 1997), la planificación de las necesidades de materiales (Thierry, 1997), los canales de distribución para los productos recuperados (Ginter y Starling, 1978), mercados para estos productos (Ferrer, 2000), o el estudio de las actividades asociadas a la logística inversa (Johnson, 1998). Nuestro interés ha sido, principalmente,

presentar los modelos propuestos en la literatura para el diseño de la función inversa de la logística.

3.4. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA.

3.4.1. El diseño de modelos de logística inversa.

El diseño de los modelos para la logística inversa utiliza, como acabamos de ver, la estructura de los tradicionales modelos de localización y asignación, con objeto de explicar el comportamiento y las relaciones que se establecen en los procesos de recuperación de los productos fuera de uso.

Fleischmann (2001, 64) formula un modelo que considera, simultáneamente, el flujo directo e inverso existente en una red logística. Este modelo, mencionado en el epígrafe anterior y denominado “Modelo genérico de recuperación de productos fuera de uso”, se presenta como ejemplo práctico de todo lo analizado hasta ahora en este capítulo, y como punto de referencia para el resto del mismo.

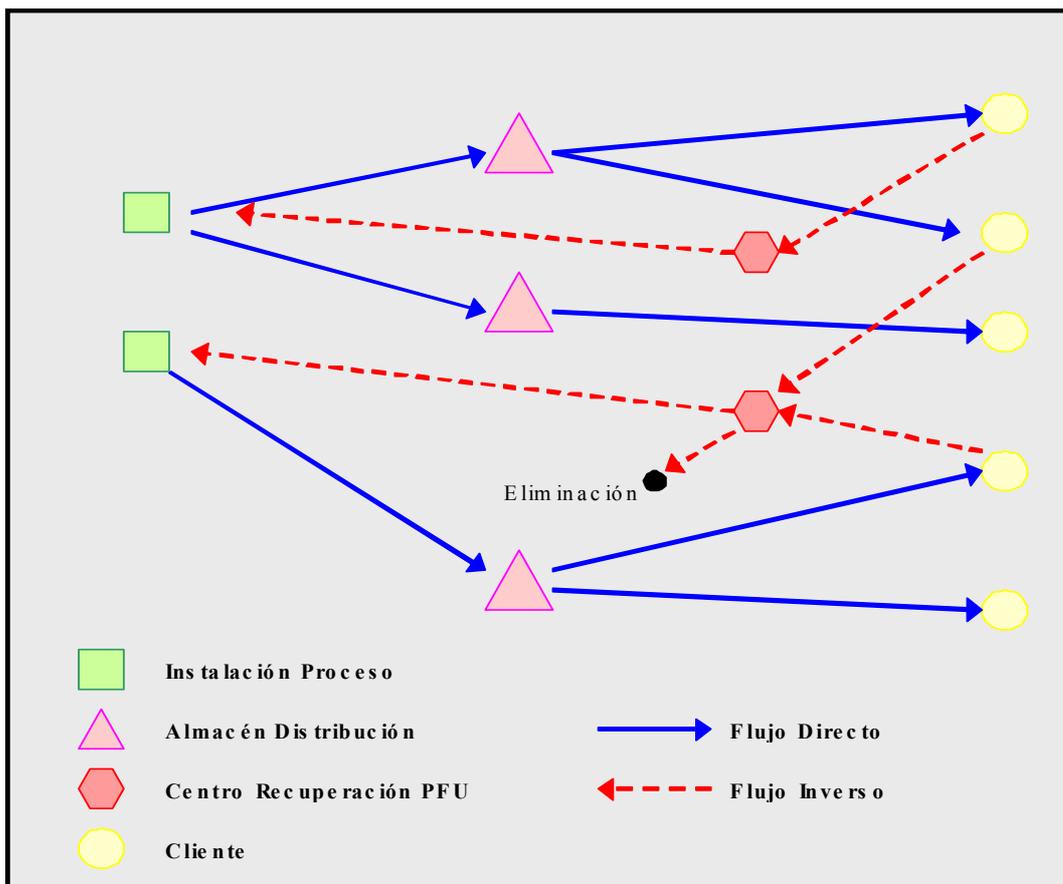
Este “Modelo genérico” presenta, como hemos dicho, una estructura de doble sentido:

- 1) **Flujo inverso:** los consumidores entregan sus productos fuera de uso en unos centros de recuperación, donde se clasifican, bien como válidos siendo enviados a la planta donde se procesan, o bien como no válidos siendo entonces desechados.
- 2) **Flujo directo:** las instalaciones procesan (refabrican, reutilizan o reciclan) los productos recuperados y los distribuyen a los almacenes desde donde se enviarán a los consumidores.

El problema que se plantea es el de determinar el número de instalaciones (plantas, almacenes y centros de recuperación), sus localizaciones y la asignación de los correspondientes flujos. De esta forma estamos considerando un problema clásico de localización y asignación que puede formularse mediante Programación Lineal Entera Mixta, siendo su objetivo la minimización de una función de costes operativos y fijos, sujeto a determinadas restricciones de carácter técnico y económico.

En el siguiente gráfico se muestran las relaciones que pueden establecerse entre los distintos eslabones de la red de recuperación de los productos fuera de uso.

Figura 3.1: Estructura del Modelo de una Red de Recuperación.



Fuente: Fleischmann (2001)

A partir del planteamiento realizado, podemos formular el siguiente problema de Programación Lineal Entera Mixta, en el que utilizamos la siguiente notación:

Conjuntos de índices

$I = \{1, 2, \dots, N_p\}$ Localizaciones de las posibles Plantas de Proceso

$I_0 = I \cup \{0\}$, donde 0 denota la opción de eliminación del producto fuera de uso

$J = \{1, 2, \dots, N_w\}$ Localizaciones de los posibles Centros de Distribución

$K = \{1, 2, \dots, N_c\}$ Localizaciones de los Clientes existentes

$L = \{1, 2, \dots, N_r\}$ Localizaciones de los posibles Centros de Recuperación de Productos

Variables

X_{ijk}^f = Flujo hacia adelante. Fracción de la demanda del cliente k fabricada en la planta i y distribuida a través del almacén j

X_{kli}^r = Flujo inverso. Fracción de los productos consumidos por el cliente k y recogidos por el centro de recuperación l , para ser procesados en la planta i

Y_i^p = Planta de Proceso i operativa

Y_j^w = Centro de Distribución j operativo

Y_l^r = Centro de Recuperación l operativo

Costes

c_{ijk}^f = Coste variable de cada unidad de producto en el flujo directo

c_{kli}^r = Coste variable de cada unidad de producto en el flujo inverso

f_i^P = Coste fijo por Planta de proceso i operativa

f_j^W = Coste fijo por Centro de Distribución j operativo

f_l^R = Coste fijo por Centro de Recuperación l operativa

Parámetros

d_k = Demanda de productos recuperados del consumidor k

r_k = Devoluciones del consumidor k

γ = Fracción mínima de productos eliminados

El problema quedaría formulado de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} f_i^P Y_i^P + \sum_{j \in J} f_j^W Y_j^W + \sum_{l \in L} f_l^R Y_l^R + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ijk}^f d_k X_{ijk}^f + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I_0} c_{kli}^r r_k X_{kli}^r$$

sujeto a :

- (1) $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^f = 1 \quad \forall k$
- (2) $\sum_{l \in L} (\sum_{i \in I_0} X_{kli}^r + X_{kl0}^r) = 1 \quad \forall k$
- (3) $\sum_{j \in J} X_{ijk}^f \leq Y_i^P \quad \forall i, \forall k$
- (4) $\sum_{i \in I} X_{ijk}^f \leq Y_j^W \quad \forall i, \forall k$
- (5) $\sum_{i \in I_0} X_{kli}^r \leq Y_l^R \quad \forall i, \forall k$
- (6) $\gamma \sum_{i \in I_0} X_{kli}^r \leq X_{kl0}^r \quad \forall k, \forall l$
- (7) $\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} r_k X_{kli}^r \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{ijk}^f \quad \forall i$
- (8) $Y_i^P; Y_j^W; Y_l^R \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k$
- (9) $0 \leq X_{ijk}^f, X_{kli}^r \leq 1 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall l$

La formulación que presentamos no es la propuesta por el autor, dado que no hemos considerado alguna de las variables y de las restricciones consideradas originalmente con objeto de que, sin alterar la estructura logística del modelo, se simplifique la construcción y resolución del mismo. En concreto, hemos prescindido de la posibilidad de que existan situaciones de demanda insatisfecha (carencia o faltantes) y además suponemos que todos los PFU en manos de los consumidores son recuperados por la empresa.

De esta forma, el objetivo del problema es minimizar una función de costes fijos (de apertura de instalaciones) y costes variables (operativos) de acuerdo con unas restricciones técnicas y económicas, que pasamos a comentar brevemente. Las restricciones (1) y (2) indican que toda la demanda de los consumidores, así como sus devoluciones son consideradas en el modelo, es decir, que no quedan pedidos sin atender ni PFU sin recoger. Las restricciones (3), (4) y (5) son las habituales condiciones de apertura de instalaciones, mientras que (8) y (9) indican el dominio de cada una de las variables de este modelo. La restricción (7) es una de las restricciones características de la función inversa en este modelo ya que señala la coordinación existente entre demanda y oferta. Los flujos de retorno a cada instalación no superarán el total de bienes que salen de cada una de ellas; la existencia de una proporción de productos retornados que no son susceptibles de recuperación, y por tanto son eliminados, explica ese desajuste entre oferta y demanda que será satisfecho con “productos originales”. La restricción (6) refleja que la proporción mínima de productos retornados que son eliminados no es inferior a γ . Este valor γ , sujeto a incertidumbre cualitativa, se determina en la etapa de inspección de los PFU retornados.

Aunque esta modelización se asemeja mucho a los problemas clásicos de localización y asignación, los sistemas de logística inversa introducen ciertas peculiaridades que obliga a los diseñadores a modificar convenientemente estos

modelos de asignación y localización, para recoger fielmente las propiedades de los sistemas de logística inversa.

Krikke et al. (1999) señalan las principales diferencias existentes entre la función hacia adelante de la logística y el flujo inverso, en lo que respecta al diseño de modelos matemáticos, de manera que permita describir sus principales características para, de esta forma, mejorar el proceso de toma de decisiones en la empresa. En concreto señala las siguientes diferencias:

- 1) Los sistemas logísticos hacia adelante son, normalmente, *redes divergentes*, es decir, sistemas con pocos orígenes (productor) y muchos destinos (clientes), mientras que los sistemas de logística inversa representan, principalmente, *redes convergentes* ya que el número de fuentes (clientes) es elevado mientras que el número de destinos (recuperadores) suele ser muy reducido.
- 2) La logística hacia adelante se concreta en un *sistema pull* en el que el cliente es el destino del flujo de bienes, mientras que la red inversa es un *sistema push*, en cuanto que el cliente suministra el flujo de bienes que circulará por el canal inverso. Naturalmente puede existir también un efecto pull en la logística inversa debido a la demanda de los productos recuperados. Para el autor, esta situación supone que la modelización del flujo inverso contemple problemas de localización y asignación junto con problemas de trasbordo.
- 3) Los modelos tradicionales de asignación y localización suelen presentar uno o dos niveles en su estructura, mientras que las redes para la logística inversa suelen contemplar un mayor número de eslabones.

Así pues, los diseños existentes para los sistemas de logística inversa son más elaborados que los tradicionales modelos de localización y asignación, pero siguen manteniendo tanto su estructura de funcionamiento como sus métodos de solución.

Ginter y Starling (1978) apuntan también diferencias sustanciales entre los canales de distribución directo e inverso; entre ellas, el cambio de roles entre consumidor y productor y las distintas funciones que desarrollan los intermediarios en ambos canales (en el canal directo se dividen lotes de fabricación en lotes de consumo, mientras que en el canal inverso se agrupan lotes de consumo en lotes de refabricación, con el objetivo de conseguir economías de escala).

Krikke (1998), Bloemhof-Ruwaard, et al. (1999) y Fleischmann (2001) han realizado también amplias revisiones bibliográficas sobre este aspecto.

En resumen, y analizando las aplicaciones que han desarrollado estos autores referentes a la forma de modelizar los SLI y sus características comunes, podemos señalar las siguientes cuestiones:

- 1) Los modelos utilizados en el diseño de redes para la recuperación de PFU son, básicamente, modelos clásicos de localización y asignación, formulados a través de Programación Lineal Entera Mixta y resueltos de la forma habitual en estos casos.
- 2) La principal diferencia con respecto a los modelos tradicionales de localización y asignación surge de la existencia de una oferta de productos recuperados que presentan un importante grado de incertidumbre. Debido al carácter determinista de los modelos utilizados y para “considerar” esa incertidumbre, se utilizan distintos escenarios en los que se modifican los valores paramétricos.

- 3) Existe una mayor heterogeneidad del canal inverso en cuanto a sus inputs, frente a una mayor homogeneidad en el flujo directo, lo cual incrementa la complejidad a la hora de diseñar la función inversa de la logística.
- 4) Los modelos existentes son estáticos

Todas estas consideraciones nos permiten señalar que, en la modelización de los sistemas de logística inversa, se han eludido tradicionalmente (seguramente porque nos encontramos todavía en las primeras fases de la investigación sobre este tema) los componentes dinámico y estocástico existentes en estos procesos logísticos.

3.4.2. Incertidumbre en los sistemas de logística inversa.

La incertidumbre presente en los sistemas de logística inversa es una de las características principales de estos sistemas y así se ha puesto de manifiesto en numerosas ocasiones (Bloemhof-Ruwaard, 1995; Fleischmann et al., 1997; Daganzo y Erera, 1999; Krikke et al, 1999; Guide Jr, 2000 y Fleischmann, 2001, entre otros) . Esta incertidumbre afecta principalmente a la oferta existente de productos fuera de uso, aunque existirá también, al igual que en el canal hacia adelante, un componente no determinista en cuanto a la demanda de los productos reprocesados. Centrando nuestro interés en la incertidumbre asociada a la oferta, podemos distinguir cuatro fuentes generadoras:

- 1) Cantidad de productos fuera de uso: *Incertidumbre Cuantitativa*.
- 2) Calidad de los productos fuera de uso: *Incertidumbre Cualitativa*.
- 3) Momento en el que se recuperan: *Incertidumbre Temporal*.
- 4) Lugar de recuperación: *Incertidumbre Espacial o de Localización*.

La *Incertidumbre Cuantitativa* supone un desconocimiento, total o parcial, acerca de la cantidad de productos fuera de uso que se podrán recuperar para incorporarlos al sistema de logística inversa de la empresa. En el tradicional canal hacia adelante, la oferta de materias primas y componentes necesarios para la fabricación del producto final es un parámetro fácilmente identificable; cualquier fabricante, estimando la demanda de mercado, no debe tener problemas para conocer la cantidad de materiales necesarios para poder satisfacer esa demanda. Podemos realizar algunas consideraciones que ayuden a reducir esta incertidumbre cuantitativa:

- 1) La cantidad de productos que pueden recuperarse tiene una cota superior establecida en el número total de artículos que el productor ha puesto en el mercado.
- 2) Cuando los productos son muy diferenciados, como por ejemplo productos tecnológicamente avanzados, suele ser más habitual que la gestión de su recuperación la realice el propio fabricante, eliminando de esta forma eslabones en la cadena de recuperación que añaden aún más incertidumbre en el proceso de retorno.
- 3) Si además la propiedad del bien sigue siendo del fabricante, como sucede en las operaciones de leasing, esta incertidumbre cuantitativa se reduce significativamente.
- 4) La implantación de sistemas de bonificación para los clientes que recuperan los productos fuera de uso (sistemas buy-back), suponen un incremento del volumen de entrada de estos productos, aproximándolo a su nivel máximo y posibilitando la consecución de economías de escala.

La *Incertidumbre Cualitativa* significa desconocer qué nivel de calidad tendrá el producto retornado. Hasta que éste no llega a manos del recuperador y lo examina no podremos señalar la opción de recuperación más adecuada: reutilización, refabricación,

reciclaje o eliminación. Sí podemos, sin embargo, sugerir algunas cuestiones que pueden considerarse para reducirla:

- 1) Mejorar el diseño de los productos de manera que se facilite su desmontaje, permita identificar más fácilmente los componentes susceptibles de recuperación y reduzca el porcentaje de elementos no recuperables (DFIL).
- 2) Realizar un seguimiento del producto en manos del cliente que permita al fabricante conocer su nivel de calidad una vez que dicho producto se encuentre fuera de uso. Para ello resultará muy útil la información procedente de los servicios técnicos de reparaciones, servicios de atención al consumidor, servicios posventa, checklist, etc.
- 3) Fomentar la recuperación de productos tecnológicamente avanzados que son los que con mayor probabilidad incorporarán mayor valor añadido y estarán en mejor estado de conservación dado su corto ciclo de vida.

En cuanto a la *Incertidumbre Temporal*, podemos examinar algunas cuestiones que ayuden a reducirla o al menos, permitan la posibilidad de realizar previsiones al respecto:

- 1) Establecer periodos de recuperación de los productos en los cuales exista una compensación o una bonificación para el cliente.
- 2) Aprovechamiento de los servicios posventa y de la información que éstos proporcionan.

Finalmente, la *Incertidumbre Espacial o de Localización* (Van Hillegersberg et al., 2001) se refiere al desconocimiento que tiene el recuperador acerca del lugar en el que se recuperarán los PFU. Esta incertidumbre pensamos que es menos problemática que las anteriores ya que, generalmente el recuperador es el que determina la

localización de los centros de recuperación (teoría de la localización) y además, para facilitar el proceso de retorno de los PFU, suele indicar, e incluso facilitar, los medios para hacerlo posible¹⁶. Por otra parte, podríamos sugerir un aspecto adicional en este tipo de incertidumbre referido al desconocimiento de qué centros de recuperación serán más activos, es decir, hacia dónde se dirigirán los PFU que retornen al sistema. Parece razonable suponer que no todos los centros de recogida de PFU serán igualmente utilizados, existiendo, por tanto, diferencias en cuanto al uso de la capacidad de estas instalaciones, que podrían terminar afectando a su rentabilidad y, con ello, a la rentabilidad del propio sistema.

Como venimos señalando a lo largo de este trabajo, un aspecto fundamental para la eficiencia del sistema, es la necesidad de involucrar a todos los miembros de la cadena en el proyecto de recuperación económica de los productos fuera de uso. Cualquier debilidad en alguno de los eslabones de la cadena de suministro extendida, ya sean proveedores, suministradores, fabricantes, distribuidores, clientes o recuperadores, reducirá significativamente la posibilidad de obtener beneficios, tanto económicos como medioambientales, de la gestión integral de los sistemas logísticos, y con ello la consecución de ventajas competitivas sostenibles.

Tradicionalmente, la incertidumbre asociada a los sistemas de logística inversa se ha venido considerando mediante la utilización de diferentes escenarios en los que se resolvía el problema de programación lineal correspondiente, sin tener que modificar el carácter determinista del problema. El problema consistía, por tanto, en solucionar distintos problemas paramétricos de carácter determinista. Obviamente, la formulación y resolución de los problemas deterministas son más sencillas que en el caso estocástico.

¹⁶ Hewlett-Packard, por ejemplo, proporciona para sus consumibles indicaciones de cómo devolver el PFU y, en ocasiones, suministra el medio para hacerlo (envases y embalajes, franqueo, etc.)

Sobre la consideración de un marco de análisis estocástico frente al, hasta ahora, habitual ámbito determinista de trabajo, existen algunas referencias en la literatura que pasamos a comentar brevemente.

Bloemhof-Ruwaard et al. (1995) ya destacan la importancia de la incertidumbre asociada a la oferta de productos (en sus tres vertientes cuantitativa, cualitativa y temporal) en los procesos de planificación y control de los modelos para la recuperación de productos. Thierry (1997) señala que la incertidumbre es, generalmente, mucho mayor en un contexto de recuperación de productos que en los tradicionales esquemas de producción-distribución.

Por lo que se refiere estrictamente al diseño de los sistemas de logística inversa, Bloemhof-Ruwaard et al. (1999) afirman que el diseño actual de las redes de logística inversa no parece diferenciarse mucho de los modelos tradicionales de localización de instalaciones, aunque, al mismo tiempo, se preguntan si necesariamente tiene que ser así. Para estos autores existen, al menos, dos características importantes en las redes de recuperación que no se tienen en cuenta en la modelización actual de estos sistemas, la incertidumbre y la interacción entre las redes hacia adelante y hacia atrás de la logística. Krikke et al. (1999) apuntan la necesidad de tener un conocimiento más preciso acerca de los productos fuera de uso, en lo que se refiere a la incertidumbre cuantitativa, cualitativa y temporal de éstos. Los autores se cuestionan, sin embargo, sobre las consecuencias que, en la modelización de los problemas de asignación y localización, tendría la consideración de esta incertidumbre, aunque abren la puerta al desarrollo de nuevos modelos de localización, probabilísticos o estocásticos, que permitan modelizar esta cuestión.

Fleischmann (2001, 47) también cita la incertidumbre como “característica principal de las redes de recuperación”; sin embargo, este autor “no encuentra una razón

lo suficientemente poderosa que requiera la utilización de nuevos enfoques para el tratamiento de la incertidumbre en los modelos de recuperación de productos. Aunque el nivel general de incertidumbre puede esperarse que sea mayor en una red de recuperación de productos, sus consecuencias en el diseño de redes logísticas no parecen ser más dramáticas que en otros contextos” (Fleischmann 2001, 78).

La dificultad de considerar modelos de recuperación de productos, en ambientes estocásticos, es muy superior, en comparación al tratamiento empleado habitualmente en la modelización de estos problemas; sin embargo, también es cierto que la incertidumbre existente en estas redes de recuperación es una de sus principales características, por lo que pensamos que los sistemas de logística inversa deben analizarse teniendo presente esta consideración. Puede que, finalmente, el esfuerzo realizado en la formulación y resolución de estos problemas en ambientes de incertidumbre, generen diferencias poco significativas, en términos de optimalidad, con relación a los modelos deterministas, pero, ciertamente, aportarán más y mejor información acerca del funcionamiento de los sistemas de logística inversa. En cualquier caso, parece existir aún *una gran incertidumbre* acerca de la relevancia de la incertidumbre en la modelización de los sistemas de logística inversa, lo cual anima a seguir investigando sobre este cuestión.

3.4.3. Dinámica de los sistemas de logística inversa.

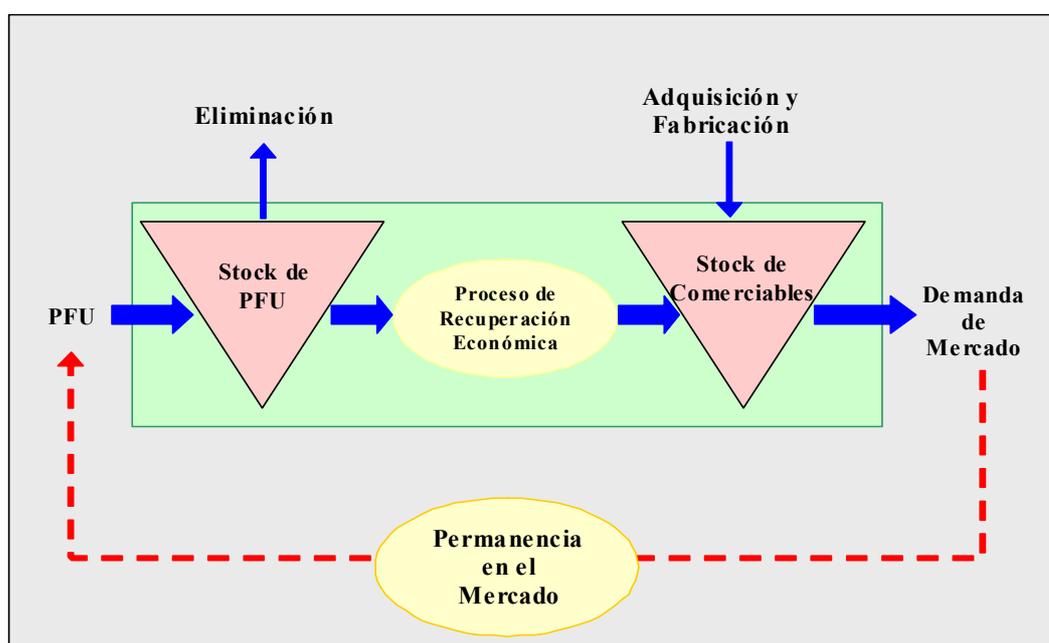
En el repaso bibliográfico que hemos hecho sobre los sistemas de logística inversa, se puede observar que todos los modelos, a excepción de Realff et al. (1999), se diseñan en un marco estático de actuación, de manera que las decisiones (estratégicas, tácticas y operativas) se toman y se ejecutan en el mismo periodo. Naturalmente, este hecho, aunque facilita el diseño y la resolución del modelo, lo aparta de la realidad existente en cualquier SLI.

La naturaleza dinámica de los sistemas logísticos es incuestionable. El proceso de toma de decisiones acerca de la función logística no se realiza en un único periodo, sino que suele ser un proceso secuencial; además los efectos de estas decisiones, por lo general, no se limitan al período en el que se tomó la decisión sino que se extienden en el tiempo condicionando la toma de decisiones posteriores. Por ejemplo, a nivel operativo, se toman decisiones sobre las rutas de transporte o la asignación de cada pedido al medio de transporte más adecuado, que quedarán determinadas por decisiones de nivel superior como, por ejemplo, la asignación de clientes a los diferentes centros de distribución o los medios de transporte a utilizar (decisiones tácticas). Por su parte, estas decisiones de naturaleza táctica también vienen condicionadas por decisiones de nivel operativo. El nivel de servicio al cliente queda definido, entre otras cuestiones, por la frecuencia en las entregas, el número de entregas en fecha y el tiempo de servicio, las cuales dependen en gran medida del medio de distribución seleccionado. Estas decisiones tácticas se tomarán de acuerdo con las decisiones de carácter estratégico realizadas por la dirección de la empresa (número y localización de instalaciones y almacenes, canales de distribución a emplear, etc.) aunque también influirán sobre ellas. El nivel de servicio que se pretende ofrecer puede determinar el número de almacenes de distribución que existirán y el tamaño de los mismos. Esta interrelación existente entre las diferentes decisiones que se toman en el sistema logístico de la empresa, subraya la necesidad de contemplar la función logística de la empresa en un ambiente dinámico. En cuanto a la función inversa de la logística las consideraciones son similares a las realizadas y ya fueron expuestas en el capítulo 2. (Ver Cuadro 2.2).

Como ya hemos visto, la utilización de escenarios dinámicos para el análisis de la función inversa de la logística es, todavía, poco habitual. La práctica totalidad de los modelos de logística inversa en los que se hace referencia a su naturaleza dinámica son los diseñados para el control de inventarios; es en esta actividad de la función logística donde el análisis dinámico tiene una especial relevancia, por las propias características que presentan los modelos de gestión y control de inventarios. Los inventarios están

presentes a lo largo de todo el canal inverso, desde el consumidor hasta el recuperador, en las diferentes fases que lo componen. Así, se pueden generar inventarios en la recogida de los productos fuera de uso, en los centros de recuperación y clasificación y, por supuesto, en las instalaciones donde se reprocessa el producto aplicando la correspondiente opción de recuperación: reutilización, refabricación o reciclaje.

Figura 3.2: Esquema para el control de inventarios con Logística Inversa



Fuente: Adaptado de Fleischmann (2001)

Este sistema de gestión de inventarios está compuesto por dos tipos de stocks, el formado por los productos fuera de uso que serán sometidos a un proceso de recuperación (*Stock de PFU*) y el constituido por todos aquellos artículos, tanto “originales” como “reprocesados”, capaces de satisfacer la demanda de los consumidores (*Stock de Comerciables*). El objetivo de estos modelos de gestión de inventarios es el control de los pedidos que llegan a la empresa y del proceso interno de recuperación de componentes, de manera que se garantice un adecuado nivel de servicio y se minimice el coste total de proporcionarlo

En este esquema de funcionamiento, se consideran conjuntamente el flujo directo junto con el flujo inverso de productos, generándose así dos tipos diferentes de inventarios para la obtención de un único producto final. La oferta de artículos devueltos se determina de manera exógena, sin que el recuperador pueda influir en la cantidad o la calidad de estos productos, ni en el momento de la recuperación (incertidumbres cuantitativa, cualitativa y temporal). Fleischmann et al. (1997) proporcionan una completa revisión de los modelos de control de inventarios en sistemas de logística inversa.

Los modelos de control de inventarios en los que se considera la naturaleza dinámica de los mismos no abundan en la literatura. Richter y Sombrutzky (2000) estudian un modelo de control de inventarios y planificación de la producción, en el que se contempla la existencia de un flujo de productos desde el consumidor al fabricante que serán almacenados y, probablemente, refabricados, reciclados o eliminados. Para ello utilizan el modelo clásico de Wagner-Whitin (1958) en el que se modifica el sentido del flujo de bienes. Este modelo sólo incluye la reutilización de los productos fuera de uso, sin considerar la fabricación de productos originales o su adquisición a terceros, por lo que el problema de la interacción entre el flujo directo y el inverso de la función logística se excluye.

Minner y Kleber (2001) analizan un sistema de control óptimo de inventarios de acuerdo con el esquema de funcionamiento señalado en la figura 3.2., con un inventario para los productos retornados y otro para los productos que se comercializarán. Tanto la demanda de mercado como la tasa de devoluciones se suponen conocidas, contemplándose la opción de eliminar aquellos productos fuera de uso que no puedan reutilizarse. La metodología empleada es la habitual en los problemas de control óptimo, a través del Principio del Máximo de Pontryagin¹⁷. Este enfoque dinámico

¹⁷ Véase, por ejemplo, Borrell (1985, 74)

permite a los autores determinar intervalos temporales para la recuperación de los productos fuera de uso y abre una nueva vía para el análisis de determinados problemas de logística inversa. Kleber, Minner y Kiesmüller (2002) retoman este problema considerando diferentes opciones de uso para los productos retornados, dentro del mismo esquema de trabajo y con la misma propuesta de solución.

3.5. PROPUESTAS PARA LA MODELIZACIÓN DE SISTEMAS DE LOGÍSTICA INVERSA.

A lo largo de todo este capítulo hemos venido revisando los principales modelos propuestos en la literatura para el análisis de la función inversa de la logística, pudiendo constatar una serie de características comunes a la mayoría de estos modelos. Entre éstas, una parte muy importante de los modelos de logística inversa se plantean en ambientes de decisión deterministas y estáticos, de forma que para la resolución de los mismos se utilizan técnicas clásicas de programación lineal.

Tal y como hemos señalado en epígrafes anteriores, los sistemas de logística inversa presentan características particulares que demandan la utilización de escenarios de análisis más completos de manera que reflejen, de una forma más precisa, la problemática que plantean estos sistemas. Esto supondrá, además, tener que utilizar técnicas de resolución más elaboradas. Estas peculiaridades de los sistemas de logística inversa son, principalmente, la incertidumbre asociada a la oferta de productos fuera de uso (incertidumbre cuantitativa, cualitativa y temporal) y la existencia de un comportamiento dinámico del sistema.

La solución propuesta hasta la fecha para abordar el problema de la incertidumbre ha sido la utilización de múltiples escenarios en los que se resuelve un

problema tipo de programación lineal entera mixta, consiguiendo así intervalos paramétricos, donde la solución alcanzada es óptima. De esta forma alterando los parámetros afectados por la incertidumbre (cantidad, calidad y momento de recuperación de los productos fuera de uso) se logra determinar la solución óptima en cada uno de los escenarios propuestos. Esta técnica de resolución, si bien no considera directamente el problema de la incertidumbre, permite obtener soluciones satisfactorias sin grandes esfuerzos de cálculo. La mayor parte de los autores consideran que, aunque la modelización estocástica puede resultar apropiada para el análisis de los modelos de logística inversa y generar soluciones cuantitativamente óptimas, la complejidad inherente a estos modelos estocásticos en cuanto a su diseño y resolución, no justificarían su utilización cuando, como parece ser, la solución que se obtiene con el análisis de escenarios resulta, cualitativamente, satisfactoria.

Listes y Dekker (2001) proponen un modelo de programación estocástica para el análisis de un problema de localización de instalaciones de reciclado en el que se consideran, de manera explícita, determinadas incertidumbres. En concreto, consideran que existe un comportamiento estocástico tanto de la demanda del producto reciclado como de la oferta del producto fuera de uso. El desarrollo de esta aplicación se realiza limitando el conjunto de valores que pueden tomar estas variables aleatorias, de acuerdo con las conclusiones obtenidas en el análisis determinista del problema (Barros et al., 1998). Para cada una de estas situaciones se propone un problema de programación lineal entera mixta en varias etapas (dos en el caso de demanda incierta y tres en el supuesto de incertidumbre en la oferta de productos fuera de uso); primero se determinan las localizaciones óptimas y posteriormente se asignan los flujos de productos entre instalaciones. La complejidad de los modelos propuestos generan tiempos de resolución excesivos, que pueden considerarse como un obstáculo importante para la utilización de estas técnicas de programación. En cualquier caso, tal y como señalan los autores, “el enfoque estocástico tiene la habilidad de generar soluciones cualitativamente diferentes”. Ciertamente, las soluciones obtenidas mediante

programación estocástica no generan diferencias significativas en el aspecto cuantitativo, ya que ambos enfoques, determinista y estocástico, proporcionan un valor similar de la función objetivo. Las principales diferencias aparecen en cuanto al tipo de solución que proporcionan, es decir, las localizaciones que se obtienen con uno y otro procedimiento. Este hecho hace que sea particularmente interesante considerar el aspecto estocástico de los sistemas de logística inversa, a pesar de la complejidad y, en ocasiones, falta de eficiencia en su resolución. El alto componente de incertidumbre que rodea a los sistemas de logística inversa no debe ser un elemento prescindible en el diseño de los mismos, ya que aportará información crucial para un mejor entendimiento de la función inversa de la logística en la empresa.

El comportamiento dinámico de los sistemas de logística inversa es otro aspecto que consideramos debe analizarse con mayor profundidad para ofrecer un reflejo más fiel de la función inversa de la logística. Tal y como señalábamos anteriormente, la naturaleza dinámica de la función inversa de la logística se ha estudiado principalmente a través del análisis de la gestión de inventarios y será en este contexto en el que realizaremos nuestro análisis cuantitativo, contemplando tanto la naturaleza dinámica de la logística inversa como su componente estocástico. Concretamente, plantearemos un modelo de gestión de inventario en el que se considera, explícitamente, la posibilidad de recuperación económica de los PFU, examinando las consecuencias que para la gestión de inventarios tiene la función inversa de la logística en un ambiente dinámico y estocástico.

La metodología que emplearemos para este análisis será un ejercicio de simulación dinámica en el que formularemos un modelo de gestión de inventarios para un sistema de logística inversa que contemple diferentes opciones de recuperación económica de los PFU; en concreto, reutilización y refabricación. El componente estocástico se establecerá mediante la consideración de la incertidumbre cuantitativa

existente en la recuperación de estos PFU, mientras que la dinámica del SLI quedará definida por la propia de los modelos de gestión de inventarios.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE UN SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA

- 4.1. INTRODUCCIÓN.**
- 4.2. MODELOS DE GESTIÓN DE INVENTARIOS CON FLUJO DE RETORNO.**
- 4.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**
 - 4.3.1. Modelo Forward.**
 - 4.3.2. Modelo Reutilización.**
 - 4.3.3. Modelo Refabricación.**
- 4.4. SIMULACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN DE INVENTARIO CON FLUJO DE RETORNO DE PFU.**

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE UN SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA

4.1. INTRODUCCIÓN.

Las actividades encaminadas a la recuperación de los PFU son, además de una obligación para los responsables de la puesta en el mercado de estos artículos (artículo 7.1 de la Ley 10/98 de residuos), una forma de aprovechar el valor económico que aún incorporan estos PFU y de esta forma contribuir a la generación de ventajas competitivas de carácter sostenible.

El desarrollo de un sistema de logística inversa capaz de llevar a cabo estas tareas de recuperación requiere, como señalábamos en el apartado 2.4 de esta tesis (pág. 46 y siguientes), la consideración de un conjunto de actividades, a nivel estratégico, táctico y operativo, que condicionarán el desarrollo del sistema ya que su ejecución comportará unos flujos económicos cuyo impacto deberemos evaluar. Así, a nivel estratégico analizaremos el coste de la inversión necesaria en el establecimiento de

centros para la recogida y la recuperación económica de los PFU, el coste de la tecnología necesaria para ello, los medios de transporte, etc. En cuanto al ámbito táctico, examinaríamos, entre otras, las repercusiones económicas derivadas de la sustitución de materias primas y componentes originales por los productos recuperados y su impacto tanto sobre la cuenta de proveedores como en la gestión de inventarios. A nivel operativo, deberíamos evaluar los efectos económicos de, entre otras actividades, el establecimiento de nuevas rutas de transporte para la recogida de los PFU. La evaluación económica de estas actividades requiere el empleo de modelos cuantitativos que nos ayuden en el proceso de toma de decisiones de la función inversa de la logística, por lo que de esta forma, la logística inversa se constituye no sólo como un concepto de carácter eminentemente teórico, sino que también podemos estudiar las implicaciones cuantitativas del mismo, utilizando para ello, por ejemplo, la metodología, los modelos y las herramientas propias de la investigación operativa.

Dentro de los objetivos de esta tesis no está la realización de un estudio exhaustivo, de carácter cuantitativo, sobre las implicaciones económicas de un sistema de logística inversa; pero sí tiene cabida, en cambio, la realización de un análisis parcial que al menos ilustre las posibilidades económicas de la recuperación de PFU y sus implicaciones en el sistema de operaciones de la empresa. En este sentido, uno de los principales puntos de atención a la hora de analizar el impacto del flujo de retorno de PFU sobre el sistema operativo de la empresa es la gestión de inventarios. Parece razonable suponer que la existencia de un flujo de productos y/o materiales desde el consumidor hasta el recuperador puede modificar el comportamiento de los inventarios existentes en la empresa y, en algunos casos, generar nuevos inventarios necesarios para la adecuada gestión de los PFU recuperados.

El objetivo de este capítulo es describir cómo afecta a la gestión tradicional de inventarios la consideración de un flujo de retorno de PFU desde el consumidor hasta el

productor. Para ello utilizaremos un modelo de gestión de stocks que aplicaremos a diferentes escenarios, a través de un proceso de simulación, y en el que analizaremos el efecto de considerar diferentes opciones de recuperación económica de los PFU, de manera que podamos inferir conclusiones acerca de los efectos de la logística inversa sobre la gestión de inventarios y, en general, sobre el sistema logístico de la empresa.

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera: en el apartado 4.2 realizamos un repaso bibliográfico de los principales trabajos existentes sobre modelos de gestión de inventarios en los que se considera de manera explícita la existencia de un flujo de retorno. En el apartado 4.3 planteamos el problema a tratar y la metodología que utilizaremos para ello, prestando especial atención a las particularidades que el flujo de retorno tiene sobre la gestión de inventarios. Por último, en el apartado 4.4 describimos los modelos y escenarios que utilizamos en nuestro análisis.

4.2. MODELOS DE GESTIÓN DE INVENTARIOS CON FLUJO DE RETORNO.

El primer trabajo sobre gestión de inventarios en el que se considera de manera explícita la existencia de un flujo de retorno es el trabajo de Schrady (1967) en el que se formula un modelo determinista para la gestión de un inventario de productos susceptibles de reparación o productos reparables. Su objetivo es determinar la cantidad económica de pedido tanto de productos originales o nuevos como de los productos reparables. La metodología empleada permite la obtención de expresiones sencillas y manejables para la determinación de los respectivos lotes óptimos.

Richter (1996a y 1996b) considera un modelo similar al planteado por Schrady (1967) pero en el que, en lugar de un flujo continuo de PFU, supone que éstos llegan a

una instalación desde donde se enviarán al fabricante al final de cada “intervalo de recuperación”. Así, los lotes de fabricación se estructuran en R lotes de refabricación seguidos de M lotes de fabricación de originales.

Teunter (2001) generaliza el trabajo de Schrady (1967) permitiendo que los lotes de fabricación y de refabricación se alternen y que la tasa de eliminación de PFU no recuperados varíe a lo largo del horizonte de planificación. Además, especifica costes de mantenimiento distintos para los artículos originales y los refabricados. De esta forma, a través de un modelo determinista en el que tanto la tasa de demanda como la tasa de recuperación son conocidas, se pretende determinar las políticas de gestión de stocks que hacen mínimo el valor de los costes del sistema de gestión de stocks. Dicha política de inventario queda definida por el tamaño del lote de fabricación (Q_m), el tamaño del lote de refabricación (Q_r), el número de lotes de fabricación (M) que suceden al número de lotes de refabricación (R) y el porcentaje de PFU que se recuperan económicamente (u). Este modelo genera expresiones para determinar los lotes óptimos de fabricación y de refabricación, de acuerdo con el enfoque EOQ.

Van der Laan, Dekker, Salomon y Ridder (1996) analizan un modelo de gestión de inventarios (s, Q) en el que toman como punto de partida el trabajo de Muckstaad y Isaac (1981) que fue el primero en considerar el efecto de los plazos de entrega sobre este tipo de modelos. La principal aportación del trabajo es la inclusión de una opción de eliminación para los PFU retornados que se justifica en que, cuando la tasa de recuperación es elevada se generarán altos niveles de inventario.

La consideración de una opción de eliminación para parte de los PFU retornados es un tema habitual en este tipo de trabajos. Teunter y Vlachos (2002) se interrogan sobre la necesidad de incluir esta opción, concluyendo que en general no resulta

necesario incluir una opción de eliminación para los PFU retornados (Teunter y Vlachos 2002, 262).

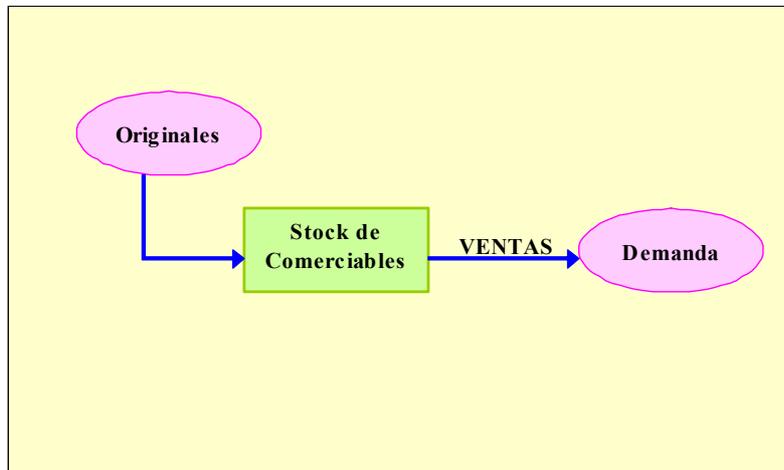
En estos últimos años se han publicado diversos trabajos que analizan la consideración del flujo de retorno de PFU sobre los modelos de gestión de inventarios, en un ambiente dinámico y estocástico, y que parecen señalar una dirección a seguir en este tipo de estudios. Entre otros, podemos señalar a Kleber et al. (2002) que analizan un modelo de inventario con flujo de retorno en el que determinan políticas óptimas de fabricación, refabricación y eliminación a través de un problema de optimización dinámica. He, Jewkes y Buzacott (2002) estudian diferentes políticas de decisión en un sistema de fabricación para pedido obteniendo la política óptima de aprovisionamiento y comparándola con las obtenidas a través de procedimientos heurísticos. Kiesmüller y Scherer (2003) analizan los aspectos de cálculo derivados de la determinación de políticas óptimas en un modelo de stocks con recuperación de PFU, con el objetivo de determinar los valores paramétricos que proporcionan la solución óptima.

4.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El desarrollo de sistemas de logística inversa capaces de recuperar el valor económico de los PFU hace que sea necesario analizar de qué forma la estructura tradicional de la cadena de suministro se verá condicionada por la consideración de este flujo inverso, siendo la gestión de inventarios uno de los principales puntos de interés. Este flujo de retorno afectará a los stocks existentes y, en muchos casos, generará nuevos inventarios para los productos retornados. Dado que nuestro interés es analizar las implicaciones de la función inversa de la logística sobre la gestión tradicional de inventarios, planteamos tres escenarios de trabajo diferentes que nos permitan abordar este objetivo:

- 1) **Modelo Forward.** En este escenario no se plantea la posibilidad de recuperar los PFU y reincorporarlos a la cadena de suministro

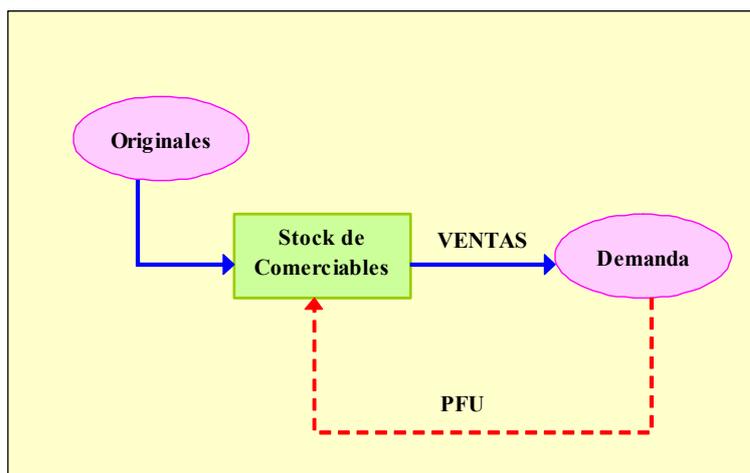
Figura 4.1: Modelo Forward



Fuente: Elaboración propia

- 2) **Modelo Reutilización.** Este escenario se caracteriza por la recuperación de los PFU para, después de unas mínimas tareas de limpieza y mantenimiento, quedar en condiciones de satisfacer las necesidades del consumidor.

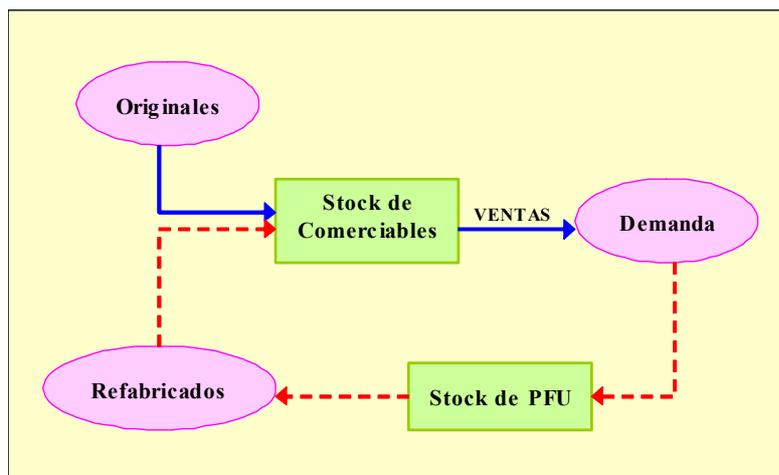
Figura 4.2: Modelo Reutilización



Fuente: Elaboración propia

- 3) **Modelo Refabricación.** En este escenario los PFU recuperados deben ser sometidos a una serie de tareas más complejas para devolver al producto retornado a un estado de producto comerciable, por lo que se incluye un inventario para estos PFU.

Figura 4.3: Modelo Refabricación



Fuente: Elaboración propia

En el inventario de PFU que figura en el Modelo Refabricación se almacenarán los productos retornados para ser sometidos a las operaciones necesarias para su incorporación al Stock de Productos Comerciables. Por su parte, dado que la reutilización de los PFU sólo requiere tareas básicas de mantenimiento y limpieza, podemos suponer que, en el Modelo Reutilización, el tránsito de los productos retornados hasta el Stock de Comerciables es “más inmediato”. Ejemplos de un modelo de reutilización son, entre otros, envases retornables y palés, mientras que ejemplos de un modelo de refabricación los encontraríamos en fotocopiadoras, cámaras fotográficas, ordenadores, equipo médico, etc.

El análisis de los diferentes modelos se realiza a través de un ejercicio de simulación. La simulación es una técnica que “permite imitar, o *simular*, las operaciones de diferentes tipos de procesos o instalaciones del mundo real. A dichos procesos o instalaciones se las denomina *sistemas*, y para el estudio científico de los mismos es necesario establecer un conjunto de supuestos acerca del funcionamiento de estos sistemas. Estos supuestos, que a menudo adoptan relaciones matemáticas o lógicas, constituyen un *modelo* que será utilizado para intentar comprender el funcionamiento del sistema al que pertenece”. (Law y Kelton, 1982, 1).

De acuerdo con esta definición, nuestro objetivo será el estudio de un sistema de gestión de inventarios, en el que estableceremos unos supuestos acerca del funcionamiento del mismo que determinará el modelo a simular. La experimentación con el modelo nos permitirá obtener conclusiones acerca del comportamiento y de la eficiencia de las posibles variaciones del sistema real sin tener que construirlo, en el caso de nuevas alternativas de diseño, sin perturbarlo, si se trata de un sistema en operación y sin destruirlo, en caso de querer determinar sus límites de funcionamiento (Pritsker, 1986).

La simulación es una metodología ampliamente utilizada en el ámbito de la dirección de operaciones¹⁸, con gran cantidad de aplicaciones en este campo. Schroeder (1992, 248) señala algunas de ellas:

- 1) Diseño de instalaciones: relacionadas con el tamaño de éstas o el número de servidores requeridos (numero de cajas en un supermercado, número de pistas en un aeropuerto, número de surtidores en una gasolinera, ...). Estas aplicaciones están muy relacionadas con el estudio de los fenómenos de espera (Teoría de colas).

¹⁸ Chase y Aquilano (1994, 790) citan un estudio del Institute of Management Science en el que se informaba que el 80% de las empresas analizadas utilizaban la simulación como herramienta de análisis, siendo el área de producción donde mayor aplicación tenía.

- 2) Planificación agregada: empleando modelos de simulación para la determinación del coste de planes de producción alternativos.
- 3) Planificación o programación de operaciones: simulando, por ejemplo, las secuencias de trabajo en un taller.
- 4) Gestión de inventarios: utilizando técnicas de simulación para analizar las políticas de pedido antes de su puesta en funcionamiento y evaluar así su impacto sobre el nivel de servicio y el coste.
- 5) Planificación de las necesidades de materiales: En los sistemas MRP, la simulación permite evaluar los cambios propuestos en el plan de fabricación antes de que éstos se apliquen, pudiendo responder a preguntas del tipo “¿qué pasa si ...?”, antes de la toma de decisiones.

El análisis de sistemas mediante simulación ha experimentado un auge considerable en los últimos veinte años, a medida que los ordenadores personales han ido incrementando sus prestaciones (Otamendi, 2002, 2). Entre las ventajas que se derivan de la aplicación de esta técnica Völkner y Werners (2000) señalan, por ejemplo, la posibilidad de realizar una valoración cuantitativa de escenarios alternativos al inicial en los que se pueden considerar características dinámicas, la alta flexibilidad en la modelización y la posibilidad de considerar componentes estocásticos en los modelos. Sin embargo, es preciso señalar que esta técnica de análisis presenta también una serie de inconvenientes que limitan su aceptación y utilidad. En primer lugar, los modelos empleados en el estudio de grandes sistemas tienden a ser muy complejos dificultando así la formulación y ejecución del programa correspondiente. Esta limitación puede soslayarse a través del empleo de software de propósito específico que facilita la codificación del modelo de simulación (Dynamo, Witness, Vensim o ProModel, entre otros). En segundo lugar, la simulación de sistemas complejos requiere generalmente un tiempo de cálculo muy elevado que disminuye la eficiencia del ejercicio de simulación. Las prestaciones, cada vez mayores, de los ordenadores personales permiten mejorar los

tiempos de cálculo y con ello la eficiencia de la simulación. Por último, en muchas ocasiones se supone que la simulación es únicamente un ejercicio de programación, en el que se construye, codifica y corre el programa, sin considerar cómo el modelo puede emplearse para inferir conclusiones acerca del comportamiento del sistema que se analiza. Este aspecto, puramente metodológico, es independiente tanto del software como del hardware empleado en el ejercicio de simulación.

Volviendo a nuestro modelo, la naturaleza dinámica del problema que analizamos sugiere la utilización de un enfoque dinámico, de manera que el modelo represente con mayor fidelidad el sistema que vamos a analizar. Así pues, estudiaremos un Sistema de Gestión de Inventario, de naturaleza dinámica, a través de un modelo genérico de parámetros (s, Q) en el que consideraremos los siguientes elementos definitorios:

- 1) Una función de demanda de productos finales o comerciables (D_t) representada a través de las diferentes realizaciones de una variable aleatoria cuya función de distribución suponemos conocida.
- 2) Un flujo de retorno de productos fuera de uso (r_t) representada a través de un proceso aleatorio en función del volumen de ventas de periodos anteriores.
- 3) Un horizonte de planificación en el que se simularán un total de 10000 periodos, necesarios para obtener un número suficiente de ciclos en cada uno de los escenarios que se proponen. Entendemos por ciclo el número de periodos que transcurren entre dos pedidos de carácter consecutivo.
- 4) Un conjunto de parámetros capaces de evaluar el comportamiento del modelo en cada escenario y establecer las necesarias comparaciones entre ellos.

El proceso de análisis se realiza a través de la simulación de cada uno de los modelos propuestos (*Modelo Forward*, *Modelo Reutilización*, *Modelo Refabricación*) en diferentes escenarios, de manera que podamos caracterizar los efectos de la consideración del flujo de retorno de PFU en los modelos tradicionales de gestión de stocks. A continuación describimos la notación que empleamos:

Variables:

D_t : Demanda de productos comerciables en el periodo t.

PFU_t : PFU retornados en el periodo t.

e_t : Expectativas de retorno de PFU en el periodo t.

S_t : Nivel de inventario de productos comerciables al principio del periodo t.

$S_{PFU,t}$: Nivel de inventario de PFU al principio del periodo t.

S'_t : Nivel de inventario de productos comerciables al final del periodo t.

$S'_{PFU,t}$: Nivel de inventario de PFU al final del periodo t.

F_t : Demanda insatisfecha, carencia o faltantes del periodo t.

V_t : Ventas del periodo t.

I_t : Posición de inventario del stock de comerciables.

Parámetros:

s : Punto de pedido.

Q : Tamaño del lote de productos originales.

Q_{REF} : Tamaño del lote de productos refabricados.

LT_{FAB} : Plazo de entrega de los pedidos de productos originales.

LT_{PFU} : Plazo de entrega de los pedidos de productos refabricados.

n: Tiempo de consumo o tiempo de permanencia en el mercado.

Seguidamente describimos las características que definen el comportamiento de los modelos con los que trabajamos en este ejercicio de simulación.

4.3.1. Modelo Forward.

Este modelo queda definido por los elementos propios en un modelo de gestión de inventarios:

- 1) **Demanda (D_t)**: se genera a través de las diferentes realizaciones de una variable aleatoria con distribución de probabilidad Normal (μ, σ). Esta distribución representa razonablemente bien el comportamiento de la demanda de bienes de consumo frecuente (Keaton, 1995), siendo empleada habitualmente en el análisis de modelos de gestión de inventario. Inicialmente consideramos que el proceso estocástico de demanda no presenta componente estacional alguno, aunque posteriormente relajaremos este supuesto.
- 2) **Stock inicial de productos comerciables (S_t)**: Señala el nivel de inventario, es decir, el número de unidades físicas existentes en almacén al principio del periodo. Se determina a través de la diferencia entre el stock al final del periodo anterior (S'_{t-1}) y la demanda insatisfecha (F_{t-1}), más el pedido de productos originales recibido en dicho periodo (Q):

$$S_t = \max (0, S'_{t-1} - F_{t-1} + Q_{t-LT_{FAB}}) \quad (4.1)$$

- 3) **Carencia, faltantes o demanda no satisfecha (F_t)**: en caso de que las necesidades de productos comerciables superen el número de unidades en

stock, se generará una demanda insatisfecha en dicho periodo o carencia que se satisfará en periodos siguientes, siempre que exista suficiente inventario para ello.

$$F_t = \max(0, D_t - S_t) \quad (4.2)$$

- 4) **Ventas del periodo (V_t):** Siempre que existan suficientes unidades de producto para satisfacer la demanda del periodo el volumen de ventas será igual a dicha demanda. En caso contrario, las ventas serán igual al stock disponible:

$$V_t = \begin{cases} D_t & \text{si } S_t \geq D_t \\ S_t & \text{si } S_t \leq D_t \end{cases} \quad (4.3)$$

- 5) **Stock final de productos comerciables (S'_t):** es el número de unidades físicas en almacén al final del periodo. Se obtiene como la diferencia entre el stock al principio del periodo y las ventas de dicho periodo:

$$S'_t = S_t - V_t \quad (4.4)$$

- 6) **Posición de Inventario (I_t):** Se determina al final del periodo y se define como el nivel de inventario existente, menos la demanda no satisfecha, más los pedidos solicitados hasta la fecha y pendientes de entrega:

$$I_t = S_t' - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i \quad (4.5)$$

- 7) **Tamaño del lote de productos originales (Q)**: constante a lo largo del periodo de planificación, señala el número de unidades que constituyen cada pedido. Se lanzará una orden cuando la Posición de Inventario al final del periodo anterior (I_{t-1}) sea inferior a determinado nivel (**Punto de pedido, s**), constante durante la simulación del escenario propuesto.
- 8) Existirá un **Plazo de Entrega o Tiempo de Suministro** para los pedidos de productos originales, constante a lo largo de la simulación del escenario, LT_{FAB} . Las unidades de productos originales solicitadas se incorporan al stock de productos comerciables después de LT_{FAB} periodos desde el lanzamiento de la orden de fabricación o adquisición.

Además, supondremos que el stock de comerciables al principio del periodo de planificación (S_0) es un dato que conocemos.

4.3.2. Modelo Reutilización.

En este modelo se considera la existencia de un *flujo de retorno de PFU*, que indica el número de unidades que se recuperan al final del periodo y que pasarán directamente a formar parte del inventario de productos comerciables, una vez se haya sometido al producto retornado a una serie de tareas para la recuperación de su valor económico (limpieza, mantenimiento, pequeñas reparaciones, etc.).

La consideración de este flujo inverso, desde el consumidor hacia el recuperador, tendrá un efecto sobre la gestión del inventario de comerciables similar al de una disminución en la demanda de estos bienes, ya que al recuperar los PFU y

reutilizarlos para satisfacer la demanda final, disminuirá la necesidad de abastecerse a través de productos originales. Este efecto es uno de los que pretendemos estudiar a través del ejercicio de simulación propuesto.

Dado este mecanismo de recuperación de los PFU, supondremos que la empresa, en el momento de la venta, genera unas expectativas de recuperación de parte de los productos vendidos, una vez que éstos hayan dejado de satisfacer las demandas de los consumidores y se consideren, definitivamente, PFU. De esta forma, a la hora de analizar la gestión de inventarios, prestaremos especial atención a la forma de incorporar esas expectativas en el proceso de toma de decisiones ya que este flujo de retorno de PFU afectará, no sólo al Stock de Comerciables, sino también a la Posición de Inventario.

En este punto, merece la pena realizar un breve inciso para analizar más detenidamente el concepto de posición de inventario (I_t). En los modelos de gestión de stocks que incorporan un flujo de retorno de PFU, la posición de inventario se define como el inventario neto, es decir, el stock en mano (S'_t) menos la demanda pendiente (F_t), más los pedidos, tanto de originales (Q_i) como de refabricados¹⁹ ($Q_{REF,t}$), que en el momento de evaluar dicha posición estén pendientes de entrega (ver, entre otros, van der Laan, et al.1999, 196; Fleischmann 2001, 129; Inderfurth, et al. 2001, 133; Giannaccaro, et al. 2002, 158).

$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t Q_{REF,j} \quad (4.6)$$

¹⁹ A lo largo de esta explicación sobre la posición de inventario haremos referencia únicamente a la refabricación de PFU, siendo extensible este análisis al modelo reutilización.

Una interpretación estricta de esta definición indicaría la necesidad de considerar todos aquellos pedidos, tanto de originales como de refabricados, que en el momento de fijar la posición de inventario, se encuentren pendientes de entrega, independientemente de cuándo accedan al stock de comerciables. De esta forma, Fleischmann (2001, 129) habla de una Posición de Inventario Modificada, en el sentido de que se incluye en su determinación el valor de la refabricación pendiente de entrega.

Dado que el escenario que proponemos (Tabla 4.1) considera la posibilidad de que existan plazos de entrega diferentes para los pedidos de originales (LT_{FAB}) y para los pedidos de recuperación económica (reutilización o refabricación, LT_{PFU})²⁰, podrían presentarse situaciones en las que la definición de posición de inventario dada anteriormente fuera, al menos, discutible:

- 1) Sea $LT_{FAB} \geq LT_{PFU}$. En este caso, los pedidos de refabricación pendientes de entrega en el momento de fijar la posición de inventario del periodo t , llegarán al stock de comerciables antes (o en el mismo periodo) que el pedido de originales lanzado en dicho periodo t , por lo que, en este caso, la Posición de Inventario Modificada sería igual al valor del stock neto más todos los pedidos pendientes de entrega hasta ese periodo, verificándose así la definición dada para este concepto (ecuación 4.6).
- 2) Sea $LT_{PFU} > LT_{FAB}$. En esta situación, la determinación de la posición de inventario es menos inmediata que en el apartado anterior. Supongamos que el plazo de preparación del lote de refabricación (LT_{PFU}) es “mucho mayor” que el tiempo requerido para disponer del pedido de originales (LT_{FAB}); por ejemplo, $LT_{PFU}=50 > LT_{FAB}=5$. En este caso, ¿se debería incluir en la posición de inventario del periodo t las unidades de productos refabricados que alcanzarán el stock de comerciables en $t+50$, es decir, 45

²⁰ Realmente, hablar de pedidos para los productos recuperados sólo tendría sentido en el modelo refabricación, en el cual sí se emiten órdenes de refabricación para los PFU retornados. En el caso del modelo reutilización no existe tal orden y seguramente, estemos abusando del concepto al utilizarlo de manera tan genérica.

periodos después ($LT_{PFU}-LT_{FAB}$) de la llegada del pedido de originales lanzado en t ?. Si realizamos una interpretación estricta de la definición de Posición de Inventario Modificada, deberíamos incluir todos los pedidos pendientes, por lo tanto también el pedido de refabricados lanzado en t , pero que accederá al stock de comerciables en $t+50$. Sin embargo, también parece razonable suponer que, a medida que la diferencia entre LT_{PFU} y LT_{FAB} se hace más significativa, la inclusión de pedidos que accederán al stock de comerciables en una fecha posterior a la llegada del lote de originales emitido en t sería discutible, ya que no haría más que incrementar, de manera artificial, la posición de inventario en el periodo t , y con ello, y dado que sobre este concepto recae la evaluación de la política de pedidos, el número de unidades demandadas y no satisfechas con carácter inmediato (faltantes por periodo), disminuyendo por tanto el nivel de servicio. De esta forma, si la diferencia entre el plazo de preparación de los pedidos de refabricación (LT_{PFU}) y el plazo de preparación de los pedidos de originales (LT_{FAB}) es “significativo”, podríamos pensar que la posición de inventario quedaría determinada únicamente por el inventario neto, más los pedidos de originales pendientes de entrega, más los pedidos de refabricación pendientes, recibidos antes de la llegada del lote de originales lanzado en t .

De esta forma, la posición de inventario en el periodo t podría determinarse a través de la siguiente expresión, válida para cualquiera de las situaciones analizadas:

$$I_t = S_t' - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^{t-LT} Q_{REF,j} \quad (4.7)$$

donde $LT = \begin{cases} 0 & \text{si } LT_{PFU} \leq LT_{FAB} \\ LT_{PFU} - LT_{FAB} & \text{si } LT_{PFU} > LT_{FAB} \end{cases}$

Esta última postura, que parece bastante razonable si LT_{PFU} es “muy superior” a LT_{FAB} , pierde enteros si dicha diferencia entre los plazos de entrega no resulta tan relevante. Por ejemplo, supongamos que $LT_{PFU}=5 > LT_{FAB}=4$. En este caso, en el momento de fijar el valor de la posición de inventario modificada (I_t) sabemos que, aunque el lote de refabricación lanzado en t llegará con posterioridad al lote de originales pedido en esa fecha, este desfase no parece lo suficientemente relevante como para ignorar esas unidades de refabricación que accederán al stock de comerciables un periodo después, sobre todo si el lote de refabricados tiene un tamaño significativo con relación al stock de comerciables. Esta situación podríamos considerarla como la resultante de disponer de dos proveedores diferentes para un mismo producto, con plazos de entrega ligeramente distintos. Quizá, en este caso particular, una interpretación exacta del concepto de posición de inventario modificada proporcione más ventajas que inconvenientes, dado que se estaría anticipando la llegada de unidades refabricadas permitiendo acomodar los pedidos de originales, con la consiguiente ventaja en términos de coste, pues seguimos suponiendo que las actividades de recuperación económica generan menores costes que la adquisición de originales o su fabricación.

En el escenario paramétrico que definimos, las diferencias entre estos plazos de entrega no parecen demasiado relevantes ($LT_{PFU}=5$; $LT_{FAB}=2$), por lo que nos decantamos por realizar una interpretación fiel del concepto de Posición de Inventario Modificada, pese a reconocer que en determinadas circunstancias su forma de cálculo podría variar o, al menos, debería ser objeto de una reflexión más detenida²¹.

²¹ De hecho, un análisis preliminar (no incluido en la tesis) del efecto de estas diferentes interpretaciones del concepto de posición de inventario modificada revela que, de acuerdo con la estructura de costes propuesta en el Capítulo VI, una interpretación estricta de este concepto genera una posición más favorable en términos de costes.

En todo caso, sí parece necesario seguir trabajando en el desarrollo de este concepto, que pensamos es pieza clave en el análisis de los modelos de gestión de inventarios con flujo de retorno.

Finalmente, en cuanto a la determinación de la posición de inventario, indicar que, como ya hemos señalado, el modelo que proponemos considera la existencia de ciertas expectativas acerca del retorno de las unidades vendidas en el periodo t . Estas expectativas podrían afectar, bajo determinadas circunstancias que analizaremos posteriormente, al valor de la posición de inventario; es por esto que hablaremos de una *Posición de Inventario bajo Expectativas*, debido a la inclusión de las mismas en su definición.

Siguiendo con la formulación del Modelo Reutilización, señalaremos que, debido a la dificultad existente para cuantificar el número de PFU retornados (*Incertidumbre Cuantitativa*), simularemos este proceso suponiendo que la empresa tiene, como ya hemos mencionado, ciertas expectativas acerca de la probabilidad de retorno de PFU. Concretamente, para la empresa, cada una de las unidades vendidas en el periodo t tiene cierta probabilidad (p) de ser recuperada o de no serlo ($1-p$). Suponiendo que el proceso de recuperación de los PFU es un proceso constituido por observaciones independientes (la recuperación de una unidad no condiciona la recuperación del resto), podríamos considerar este proceso (r_t) como un proceso binomial, $B(v, p)$, donde v es el número de unidades vendidas en el periodo t (V_t), y p es la probabilidad de retorno. De esta forma, calcularemos, con cierta probabilidad α , cuál es el número mínimo de unidades que se recuperarían, es decir, obtendremos el valor para el cual la función de distribución de una $B(v, p)$ es mayor o igual que α . A este valor α , lo denominamos *Valor Criterio*, siendo e , el número mínimo de PFU retornados para dicho valor criterio, es decir, el valor de las expectativas de retorno en el periodo t . El valor de la tasa de recuperación, p , dará lugar a la configuración de los distintos

escenarios en los que desarrollaremos este ejercicio de simulación: *Escenario Optimista*, *Escenario Normal* y *Escenario Pesimista*.

$$\alpha = \Pr[r_t \geq e] \quad \text{siendo } r_t \sim \text{Binomial}(V_t, p) \quad (4.8)$$

Estableceremos un valor criterio (α) del 95%, de manera que podamos considerar que las estimaciones que realiza la empresa en el periodo t , acerca del número de PFU que retornan al sistema, tienen una seguridad razonable de realizarse de manera efectiva. En realidad estamos sugiriendo que, en el 95% de los casos, el número de unidades que retornarían sería superior al valor estimado. Además, también cabría la posibilidad de contemplar un sistema de revisión de las expectativas de acuerdo con el flujo de PFU efectivamente retornado, en el que se pudiera modificar el proceso de formulación de expectativas a medida que se van realizando los retornos de PFU.

En el *Escenario Optimista* supondremos una probabilidad de recuperación de PFU (p) de un 80% de las ventas en $t-n$, en el *Escenario Normal* dicha probabilidad será del 40%, mientras que en el *Escenario Pesimista* será de un 20% de las ventas habidas en el periodo $t-n$. A los n periodos que transcurren desde la venta del producto hasta su recuperación lo denominamos *Tiempo de consumo o Tiempo de permanencia en el mercado*. Aunque el supuesto de que el plazo de retorno de los PFU (n) es constante para todos los productos resulta bastante restrictivo y, por tanto, poco realista, pensamos que este hecho no debe influir significativamente en los resultados de la simulación, bajo los supuestos de demanda uniforme en régimen permanente.

El número de unidades efectivamente retornadas en el periodo t (\mathbf{PFU}_t) se simula a través de las diferentes realizaciones de una variable aleatoria con función de distribución Binomial (V_{t-n}, p). Estos PFU retornados se incorporan al Stock de

Productos Comerciables después de LT_{PFU} periodos, de manera que el nivel del stock de comerciables al inicio del periodo t (S_t) quedará determinado por el valor de dicho inventario al final del periodo anterior, menos la demanda, más el pedido de productos originales y el flujo de PFU recuperados que se reciban en dicho periodo:

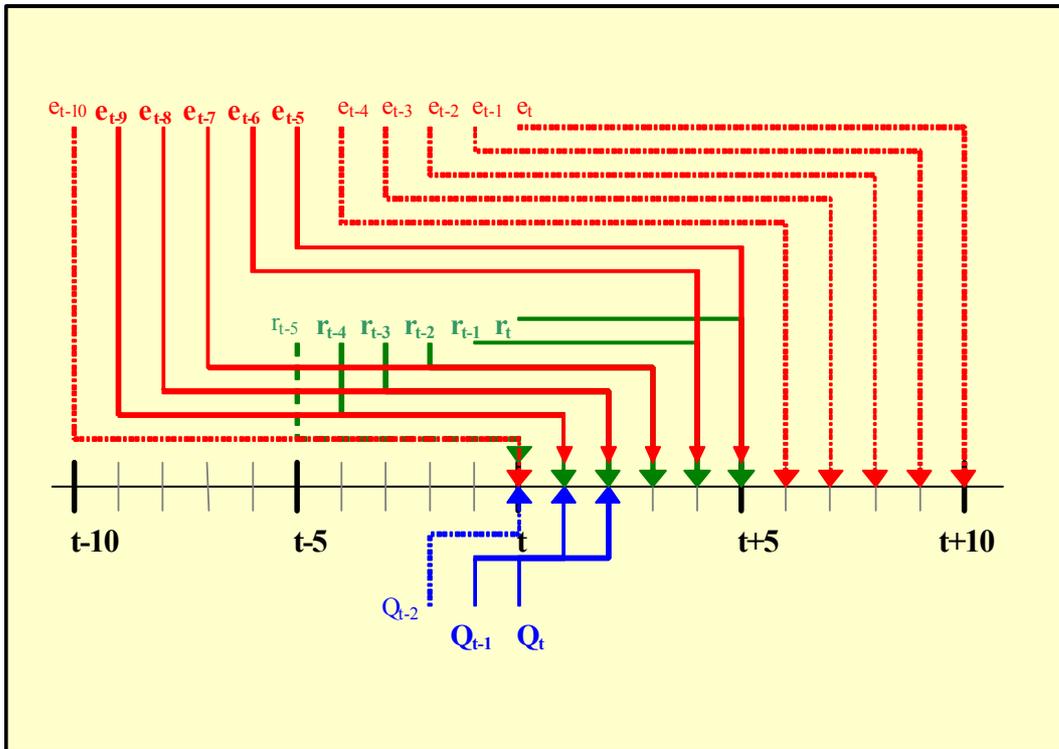
$$S_t = \max (0, S'_{t-1} - F_{t-1} + Q_{t-LT_{FAB}} + PFU_{t-LT_{PFU}}) \quad (4.9)$$

Por otra parte, la Posición de Inventario al final del periodo t (I_t) queda definida como el nivel de inventario de comerciables menos la demanda no satisfecha, más las órdenes pendientes de originales, más los PFU efectivamente retornados pendientes de incorporarse al stock de comerciables, más, en su caso, las expectativas de retorno de PFU que se “consoliden” durante el periodo de decisión. Realmente estaríamos hablando, como ya hemos señalado, de una *Posición de Inventario bajo Expectativas*, ya que las expectativas de retorno contribuyen a determinar el valor de la posición de inventario.

En este caso, es especialmente importante determinar el efecto que estas estimaciones tienen sobre el valor de la posición de inventario, para lo cual será necesario observar los diferentes plazos que afectan al PFU hasta que se incorpora al Stock de comerciables.

Supongamos que el Tiempo de consumo (n) es superior al Tiempo de entrega de los PFU (LT_{PFU}), de manera que podemos considerar el siguiente diagrama en el que se observan los elementos que constituyen la Posición de Inventario en el periodo t . Sean, por ejemplo, $n=10$, $LT_{FAB}=2$, $LT_{PFU}=5$.

Figura 4.4: Efecto de las expectativas de retorno de PFU ($n > LT_{PFU}$).



Fuente: Elaboración propia

Analicemos detenidamente la figura anterior. En la determinación de la posición de inventario deberemos considerar, además de las unidades físicas existentes en el almacén al final del periodo y de los faltantes habidos, los pedidos emitidos de originales pero no recibidos aún (Q_t y Q_{t-1}); también se incluirán las unidades de PFU efectivamente retornados que están a la espera de acceder al Stock de comerciables (r_{t-4} , r_{t-3} , r_{t-2} , r_{t-1} , r_t)²² y que lo harán dentro del plazo requerido para ello, LT_{PFU} (recordemos que, debido a plazos de entrega que estamos considerando, utilizaremos el concepto de posición de inventario en sentido estricto). Los PFU retornados en $t-5$ y anteriores ya habrían accedido al Stock de comerciables, por lo que ya habrán sido consideradas en la posición de inventario. En cuanto a las expectativas existentes sobre el retorno futuro de FPU, iremos por partes: 1) Las previsiones en $t-10$ y anteriores ya estarán “consolidadas” en el periodo t , es decir que en este periodo conoceremos el número de

²² Para mejorar la presentación de las figuras 4.4 y 4.5, hemos considerado $PFU_t = r_t$

unidades de PFU que efectivamente retornan de acuerdo con el volumen de ventas habido en $t-10$ y anteriores ($r_t, r_{t-1}, r_{t-2}, \dots$) y que ya han sido consideradas en la determinación de I_t , por lo que dichas previsiones o expectativas no formarán parte de este valor. 2) Las expectativas formuladas en los periodos $t-4, t-3, t-2, t-1$ y t , se consolidarán en periodos posteriores a $t+5$, por lo que no afectarían a I_t al quedar fuera del periodo de preparación de PFU retornados en productos comerciables $t+LT_{PFU}$. Quizá podamos intuir mejor el sentido de esta cuestión si consideramos como tiempo de permanencia en el mercado o tiempo de consumo (n) un valor “relativamente grande”, por ejemplo $n=100$, en cuyo caso estaríamos suponiendo que las unidades vendidas hoy no serán recuperadas hasta dentro de 100 periodos, por lo que esta estimación no debiera afectar a la determinación de la posición de inventario en t sino que debería tenerse en cuenta en la toma de decisiones del periodo $t=100$ y adyacentes. 3) Las previsiones efectuadas entre $t-9$ y $t-5$ sí se “consolidan” en el periodo de decisión que afecta a la posición de inventario, por tanto pensamos que deberían formar parte de ésta. Así pues, y dado que estamos considerando unas previsiones o estimaciones (siempre a la baja) acerca del flujo futuro de retorno de PFU, hablaremos, tal y como se señaló anteriormente, de una Posición de Inventario bajo Expectativas.

De esta forma, si $n > LT_{PFU}$ el valor de la Posición de Inventario bajo Expectativas en el periodo t queda determinada a través de la siguiente expresión:

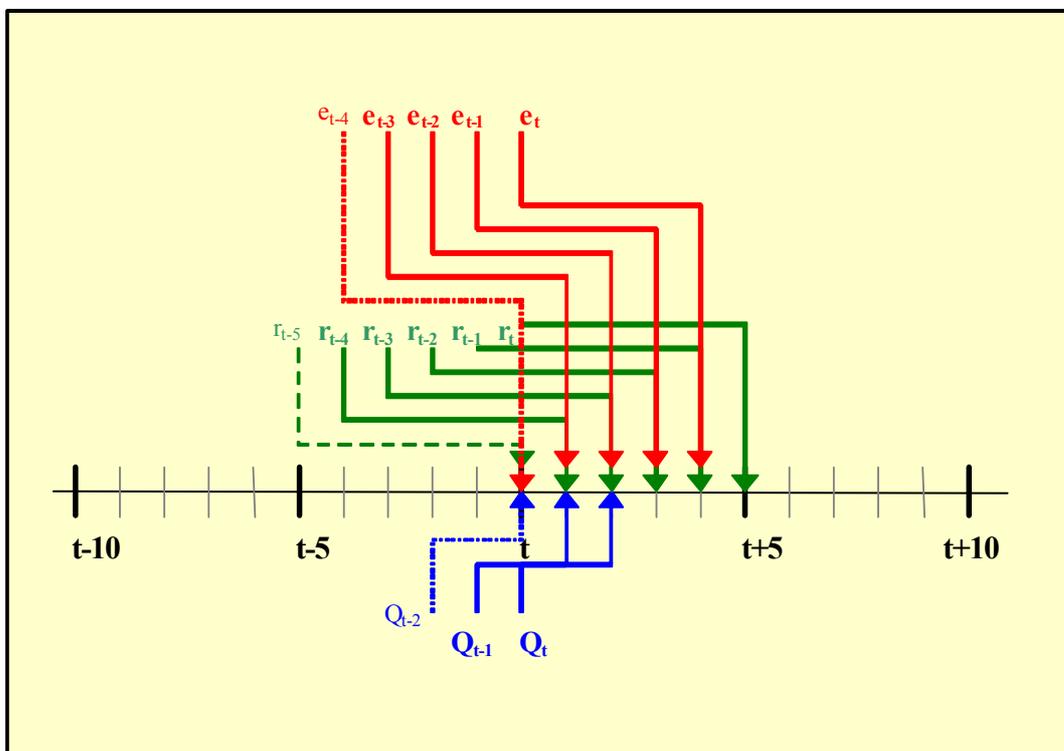
$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t PFU_j + \sum_{k=t-n+1}^{t-(n-LT_{PFU})} \hat{e}_k \quad ; \forall n > LT_{PFU} \quad (4.10)$$

Por su parte si $n < LT_{PFU}$, la Posición de Inventario bajo Expectativas quedaría determinada a través de la expresión:

$$I_t = S_t' - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t PFU_j + \sum_{k=t-n+1}^t \hat{e}_k \quad ; \forall n < LT_{PFU} \quad (4.11)$$

Suponiendo $n=4$, $LT_{FAB}=2$ y $LT_{PFU}=5$, las expectativas de retorno de PFU que afectarían al valor de la posición de inventario, serían aquellas que se consolidan en el periodo de preparación de los PFU retornados en comerciables, tal y como argumentamos anteriormente.

Figura 4.5: Efecto de las expectativas de retorno de PFU ($n < LT_{PFU}$).



Fuente: Elaboración propia

La gestión del inventario de productos comerciables se realizará a través de un modelo de parámetros (s, Q) en el que se lanzará una orden de fabricación de productos

originales de tamaño Q cuando la Posición de Inventario al final del periodo anterior sea inferior al Punto de Pedido: $I_{t-1} < s$.

4.3.3. Modelo Refabricación.

Como ya hemos comentado, la novedad principal de este modelo con respecto al Modelo Reutilización es la existencia de un inventario para los productos fuera de uso que se recuperan, en el cual permanecerán estos PFU mientras se les somete a las tareas necesarias para devolverlos a su condición de comerciable: desmontaje, limpieza, sustitución de piezas defectuosas o ensamblaje, entre otras. La dinámica de este inventario es simple: el stock al inicio del periodo quedará constituido por las unidades existentes al final del periodo anterior más el flujo de retorno de PFU del periodo, mientras que al final del periodo permanecerán en el inventario de PFU únicamente aquellas unidades que no se refabrican:

$$S_{PFU,t} = S'_{PFU,t-1} + PFU_t \quad (4.12)$$

$$S'_{PFU,t} = S_{PFU,t} - Q_{REF,t} \quad (4.13)$$

Cuando el Stock de PFU alcance el nivel Q_{REF} , se emitirá una orden de tamaño Q_{REF} para la refabricación de uno o más lotes de PFU que, tras un lapso de LT_{PFU} periodos, alcanzarán el stock de productos comerciables. Este valor Q_{REF} indica el número de unidades que constituyen un lote de refabricación, de modo que, para la refabricación de un lote deberán existir en el stock de PFU al menos estas Q_{REF} unidades. En todo caso, se podrá solicitar un número mayor de pedidos (siempre lotes completos) cuando existan suficientes unidades para ello. Así $Q_{REF,t}$ indica el número de unidades que se refabricarán en el periodo t y que llegarán al stock de comerciables en

el periodo $t+LT_{PFU}$. De esta forma, el nivel del stock de comerciables al principio del periodo t quedará determinado por la siguiente expresión:

$$S_t = \max (0, S'_{t-1} - F_{t-1} + Q_{t-LT_{FAB}} + Q_{REF,t-LT_{PFU}}) \quad (4.14)$$

La Posición de Inventario bajo Expectativas en este Modelo Refabricación quedará determinada, al final del periodo t , de un modo similar al del Modelo Reutilización, en el que volvemos a considerar, los pedidos pendientes de entrega, tanto de originales (Q_i) como de productos refabricados ($Q_{REF,j}$) y las expectativas generadas en cada periodo de acuerdo con el volumen de ventas realizado n periodos antes.

Estas expectativas (E_t) se consolidarán en la determinación de la posición de inventario siempre que su número sea suficiente como para lanzar una o más órdenes de refabricación dentro del plazo de consolidación apropiado, el cual queda determinado por el tiempo que transcurre hasta que se recupera el PFU (n) y el plazo necesario para su transformación en comerciable (LT_{PFU}).

Si $n < LT_{PFU}$, la posición de inventario quedará definida por la siguiente expresión:

$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t Q_{REF,j} + E_t \quad (4.15)$$

$$E_t = \begin{cases} \sum_{k=t-n+1}^t e_k & \text{si } \sum_{k=t-n+1}^t e_k \geq Q_{REF} \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases} \quad (4.16)$$

siendo $e_t : P(r_t \geq e) = \alpha; \quad r_t \sim \text{Binomial}(V_t, p)$

Por su parte, si $n \geq LT_{PFU}$, la posición de inventario se determina como:

$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t Q_{REF,j} + E_t \quad (4.17)$$

$$E_t = \begin{cases} \sum_{k=t-n+1}^{t-(n-LT_{PFU})} e_k & \text{si } \sum_{k=t-n+1}^{t-(n-LT_{PFU})} e_k \geq Q_{REF} \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases} \quad (4.18)$$

siendo $e_t : P(r_t \geq e) = \alpha; \quad r_t \sim \text{Binomial}(V_t, p)$

Si al final del periodo anterior la Posición de Inventario bajo Expectativas es inferior al punto de pedido, $I_{t-1} < s$, se lanzará una orden de fabricación de originales de tamaño Q . Por su parte, se emitirá una orden de refabricación si el stock de PFU al inicio del periodo es igual o superior a Q_{REF} . Estas unidades refabricadas alcanzarán el stock de comerciables tras LT_{PFU} periodos.

Los supuestos acerca del retorno de los PFU que dan lugar a los escenarios optimista, normal y pesimista se siguen manteniendo en este Modelo Refabricación.

4.4. SIMULACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN DE INVENTARIO CON FLUJO DE RETORNO DE PFU.

Como en todo ejercicio de simulación establecemos un conjunto de parámetros que describirán a cada uno de los modelos propuestos en cada uno de los escenarios de análisis.

Para cada uno de los escenarios propuestos (Optimista, Pesimista y Normal), la simulación de cada uno de los modelos, en cada combinación de valores paramétricos, proporciona un conjunto de resultados muy amplio que nos ayudará a establecer las principales características de los modelos propuestos, tanto individualmente como en su conjunto, de manera que podamos identificar el efecto de la consideración del flujo inverso de la logística en este modelo de gestión de inventario.

Cada una de estas simulaciones se realiza sobre un horizonte temporal de 10000 periodos obteniendo de esta forma un número suficiente de ciclos que permiten alcanzar un estado de estacionario a partir del cual examinar los resultados muestrales alcanzados y derivar políticas de gestión de inventarios en este tipo de entornos.

Tabla 4.1: Valores paramétricos.

	MODELO FORWARD	MODELO REUTILIZACIÓN	MODELO REFABRICACIÓN
Demanda (D_t)	Normal (20; 2,5)		
Probabilidad de Recuperación de PFU (p)	No existe	{0,2; 0,4; 0,8}	{0,2; 0,4; 0,8}
Tamaño Lote Originales (Q)	{100, 150, 200, 250, 300}		
Tamaño Lote Refabricación (Q_{REF})	No existe	No existe	{25, 50, 75, 100}
Tiempo de Consumo (n)	No existe	{2, 4, 8}	{2, 4, 8}
Plazo de Entrega Lote Originales (LT_{FAB})	{2, 5}		
Plazo de Entrega Lote Refabricados (LT_{PFU})	No existe	{2, 5}	{2, 5}
Punto de Pedido Stock Comerciables (s)	{10, 25, 50, 75, 100}		
Stock inicial de comerciables	100		

Fuente: Elaboración propia

El proceso de simulación en el *Modelo Refabricación* es el siguiente:

- 1) Se especifican los valores deterministas del modelo a considerar (por ejemplo, para el Modelo Refabricación): Q , Q_{REF} , p , s , n , LT_{FAB} , LT_{PFU} y S_0 . Para ilustrar la simulación utilizaremos el siguiente ejemplo: $Q=200$, $Q_{REF}=25$, $p=0,4$, $s=50$, $n=2$, $LT_{FAB}=2$, $LT_{PFU}=2$, $S_0=100$.
- 2) Generamos 10000 realizaciones de una variable aleatoria que simulará el comportamiento de la demanda de productos comerciables $D_t \sim N(20;2,5)$,

en la que los valores paramétricos son similares a los empleados por Teunter y Vlachos (2002).

- 3) Calculamos en cada periodo el valor del stock inicial de comerciables (S_t), el volumen de ventas V_t , el stock de comerciables al final del periodo (S'_t), y el número de unidades no atendidas (F_t).
- 4) Si en algún periodo hubiera clientes sin atender ($F_t > 0$), esta demanda no satisfecha se deberá cumplimentar a la mayor brevedad, por lo que en el periodo siguiente estos faltantes minorarán el nivel inicial del inventario de comerciables.
- 5) De acuerdo con el volumen de ventas del periodo (V_t) se generan unas expectativas acerca del retorno futuro de dichas unidades (e_t) que se simulan a través de un proceso binomial, tal y como se ha descrito anteriormente: $e_t : P(r_t \geq e) = \alpha; r_t \sim Binomial(V_t, p)$
- 6) Si la posición de inventario al final del periodo anterior es inferior al punto de pedido, $I_{t-1} < s$, se lanzará una orden de fabricación de productos originales de tamaño Q que se incorporará al stock de productos comerciables LT_{FAB} periodos después.
- 7) El proceso de retorno de PFU se simula a través de una variable aleatoria con distribución binomial cuya realización en el periodo t , r_t , indicará el número de unidades de PFU que retornan al sistema y se incorporan al Stock de PFU. $PFU_t \sim Binomial(V_{t-n}, p)$
- 8) Si el nivel del Stock de PFU, al inicio del periodo, es mayor o igual al tamaño de la orden de refabricación (Q_{REF}), se lanzará un pedido de refabricación que se incorporará al Stock de Comerciables tras un lapso de LT_{PFU} periodos.
- 9) La emisión de un pedido, tanto de productos originales como de productos refabricados, generará un nuevo ciclo de gestión del inventario

correspondiente. En cada ciclo calcularemos el número de periodos que integran el ciclo de originales ($P_{FAB,x}$) y de refabricados ($P_{REF,x}$), el número de unidades en el Stock de Comerciables por periodo ($S_{FAB,x}$), el número de unidades en el Stock de PFU ($S_{REF,x}$), el número de unidades PFU retornadas (PFU_x) y el número de faltantes por periodo (F_x).

- 10) Completados al menos un total de 150 ciclos para cada simulación, se determinan los valores medios por ciclo de estos estadísticos, es decir, el número medio de periodos por ciclo de fabricación ($P_{FAB,m}$), el número medio de periodos por ciclo de refabricación ($P_{REF,m}$), el número medio de unidades de productos comerciables en stock por ciclo ($S_{FAB,m}$), el número medio de unidades de PFU en stock por ciclo ($S_{REF,m}$), el número medio de PFU retornados por ciclo (PFU_m) y el número medio de faltantes por ciclo (F_m).
- 11) Finalmente evaluamos el Nivel de Servicio (NS) que señala la capacidad del modelo para atender sin retraso la demanda que se produce. (Domínguez Machuca et al., 1995, 472):

$$NS = \frac{V_t}{D_t} \quad (4.17)$$

Para el ejemplo de simulación que hemos propuesto en el apartado 1) anterior ($Q=200$, $Q_{REF}=25$, $p=0,4$, $s=50$, $n=2$, $LT_{FAB}=2$, $LT_{PFU}=2$, $S_0=100$) los valores que se obtienen para estos estadísticos son los siguientes:

Tabla 4.2: Ejemplo simulación.

	MODELO FORWARD	MODELO REUTILIZACIÓN	MODELO REFABRICACIÓN
S_{FAB,m}	1001,39 uds.	1603,72 uds.	1777,46 uds.
S_{REF,m}	-	-	51,14 uds.
F_m	2,97 uds.	5,52 uds.	2,49 uds.
PFU_m²³	-	124,15 uds.	24,99 uds.
P_{FAB,m}	10 periodos	16,19 periodos	16,27 periodos
P_{REF,m}	-	-	3,24 periodos
Nivel de Servicio	98,52%	98,30%	99,25%

Fuente: Elaboración propia

El ejercicio de simulación que hemos llevado a cabo se ha realizado en una hoja de cálculo Excel 2002 utilizando un procesador AMD Athlon™ 4 a 1,3 GHz., de manera que el tiempo de simulación no se viera comprometido por el volumen de información que manejamos.

Los resultados de este ejercicio de simulación se presentan en los capítulos V y VI.

²³ Esta variable indica en el Modelo Reutilización el número medio de PFU que retornan en cada ciclo de originales, mientras que en el Modelo Refabricación indica el número de unidades que retornan por término medio en cada ciclo de refabricación.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: ANÁLISIS DESCRIPTIVO

- 5.1. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.**
- 5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DESCRIPTIVO.**
 - 5.2.1. Modelo Forward.**
 - 5.2.2. Modelo Reutilización.**
 - 5.2.3. Modelo Refabricación.**

CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

Análisis descriptivo

5.1. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los resultados de la simulación se presentarán desde dos perspectivas:

- a) Individual o descriptiva de los resultados de la simulación en cada modelo.
- b) De conjunto o de comparación de los resultados obtenidos en los diferentes modelos

Para el análisis individual de cada uno de los modelos formulados utilizaremos aquellas variables que consideramos más relevantes de cada uno de ellos y que nos permitan observar, en su caso, el efecto del flujo de retorno en este sistema de gestión de inventarios.

El análisis comparativo de los resultados se realiza a través de un estudio de los costes derivados de la gestión de inventarios para cada uno de los modelos, de acuerdo con una estructura de costes habitual en los sistemas de gestión de stocks.

Naturalmente los resultados obtenidos en este ejercicio de simulación dinámica quedan determinados tanto por el conjunto de valores paramétricos considerado (Tabla 4.1) como por los valores que definen la función de costes de gestión de inventarios (Capítulo VI), de manera que las conclusiones a las que podamos llegar quedarán delimitadas por este marco de actuación, sin posibilidad de extrapolarse a un escenario genérico. Sin embargo, esto no impide que el análisis descrito pueda replicarse sin mayor dificultad en cualquier otro escenario a considerar por cualquier tomador de decisiones, sobre todo teniendo en cuenta la metodología empleada (un ejercicio de simulación) y la herramienta de resolución utilizada (una hoja de cálculo), lo cual nos lleva a pensar en la universalidad de este procedimiento como sistema de apoyo al proceso de toma de decisiones en la empresas.

En este capítulo presentaremos los resultados obtenidos en el análisis de cada uno de los modelos de gestión de stocks y dejaremos para el siguiente capítulo el estudio de los resultados del análisis comparativo entre dichos modelos.

Debido al volumen de información que manejamos, sólo presentaremos los gráficos más relevantes para cada uno de los modelos propuestos, remitiendo al lector al Apéndice Gráfico para un examen completo de los diferentes gráficos obtenidos en este ejercicio de simulación.

5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DESCRIPTIVO.

En este epígrafe presentamos los resultados del ejercicio de simulación para cada uno de los modelos considerados, utilizando las variables más relevantes a la hora de explicar, en su caso, el efecto de la existencia de un flujo de retorno de PFU.

5.2.1. Modelo Forward.

Recordemos que este modelo no incorpora ningún flujo de retorno de PFU, y por lo tanto consideramos como variables de interés del modelo las siguientes:

- 1) Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$).
- 2) Número medio de faltantes por periodo (F_t).
- 3) Número medio de originales por periodo (O_t).
- 4) Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$).

Para la presentación de los resultados, utilizaremos un escenario paramétrico base para el que se obtiene el valor de las variables de interés ($S_{FAB,t}$, F_t , O_t , $P_{FAB,t}$), estudiando el comportamiento de éstas ante variaciones en los parámetros del modelo. Este escenario base en el Modelo Forward queda definido únicamente por el parámetro $LT_{FAB}=2$.

Tabla 5.1: Resultados escenario base Modelo Forward

MODELO FORWARD					
Nº medio de Comerciables por periodo ($S_{t,FAB}$)					
$LT_{FAB}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	18.71	40.80	64.53	88.43	113.15
s=25	28.76	52.45	77.15	101.53	126.30
s=50	50.39	75.29	100.13	125.44	150.33
s=75	74.97	99.95	125.22	150.30	174.48
s=100	100.08	125.21	149.91	175.31	199.79
Nº medio de Faltantes por periodo (F_t)					
$LT_{FAB}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	8.01	5.37	3.97	3.23	2.67
s=25	5.03	3.38	2.49	2.02	1.69
s=50	0.58	0.40	0.30	0.23	0.20
s=75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s=100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nº medio de Originales por periodo (O_t)					
$LT_{FAB}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	19.99	20.01	19.97	19.97	19.97
s=25	20.00	20.04	19.97	20.04	20.03
s=50	19.95	20.02	20.00	20.02	20.03
s=75	19.99	19.98	20.01	20.05	20.05
s=100	20.03	20.01	20.03	20.05	20.01
Nº medio de Periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	5.00	7.49	10.02	12.52	15.02
s=25	5.00	7.49	10.01	12.48	14.98
s=50	5.01	7.49	10.00	12.49	14.97
s=75	5.00	7.51	9.99	12.47	14.96
s=100	4.99	7.49	9.99	12.47	14.99

Los resultados obtenidos son los esperados para este tradicional modelo de gestión de inventarios. Así, por ejemplo, el stock medio de comerciables ($S_{FAB,t}$) tiende a aumentar a medida que lo hace el punto de pedido (s), observando un desplazamiento horizontal de la curva a medida que se incrementa el tamaño del lote de fabricación (Q). (Gráfico 5.1.1).

En cuanto al número medio de unidades demandadas pero no satisfechas por periodo (F_t), observamos una disminución de éstas cuanto mayor es el tamaño del lote (Q), más acusada a medida que se incrementa el punto de pedido (s). (Gráfico 5.1.2). Es

necesario hacer notar que si analizamos el número medio de faltantes por ciclo (F_m), podremos comprobar cómo su número disminuye por efecto del incremento en el punto de pedido (s), aunque no por un incremento en el tamaño del lote de fabricación (Q). Concretamente, el número medio de faltantes por ciclo tiende hacia un valor de estado estacionario, independiente de Q , para cada nivel del punto de pedido. Por su parte, el número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$) obtenido en el ejercicio de simulación se corresponde con el que cabría estimar a través de la relación existente entre el tamaño del lote de fabricación (Q) y el valor esperado de la demanda, $E(D_t)$:
$$P_{FAB,t} = \frac{Q}{E(D_t)}.$$

(Gráfico 5.1.4).

En cuanto al comportamiento que experimentan las variables de interés ante variaciones en el plazo de entrega de los originales ($LT_{FAB}=5$), podemos comprobar que también es el esperado a priori. Se observa que, a medida que se incrementa este plazo de entrega, el stock medio de comerciables por periodo disminuye (Gráfico 5.1.1), generándose de esta forma un incremento del número de faltantes por periodo (Gráfico 5.1.2). En cuanto al número de originales por periodo (Gráfico 5.1.3) y al número de periodos por ciclo (Gráfico 5.1.4) no se observan modificaciones relevantes al incrementar el plazo de entrega LT_{FAB} .

Gráfico 5.1.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)

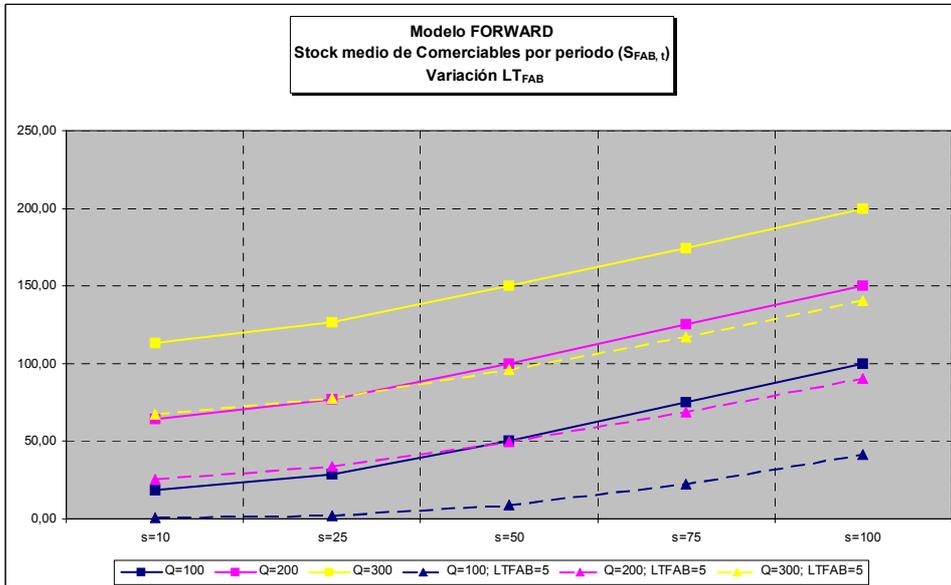


Gráfico 5.1.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)

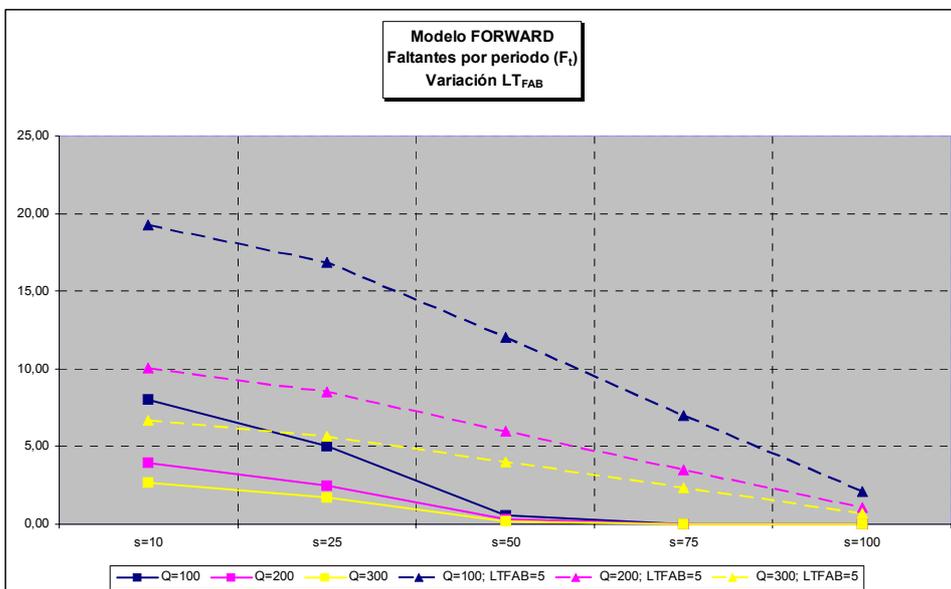


Gráfico 5.1.3: Número medio de originales por periodo (O_t)

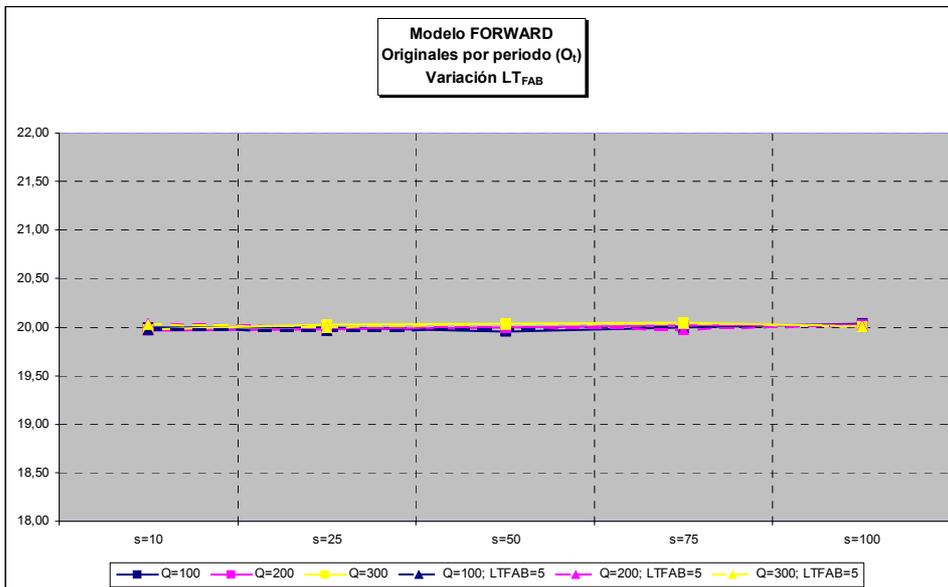
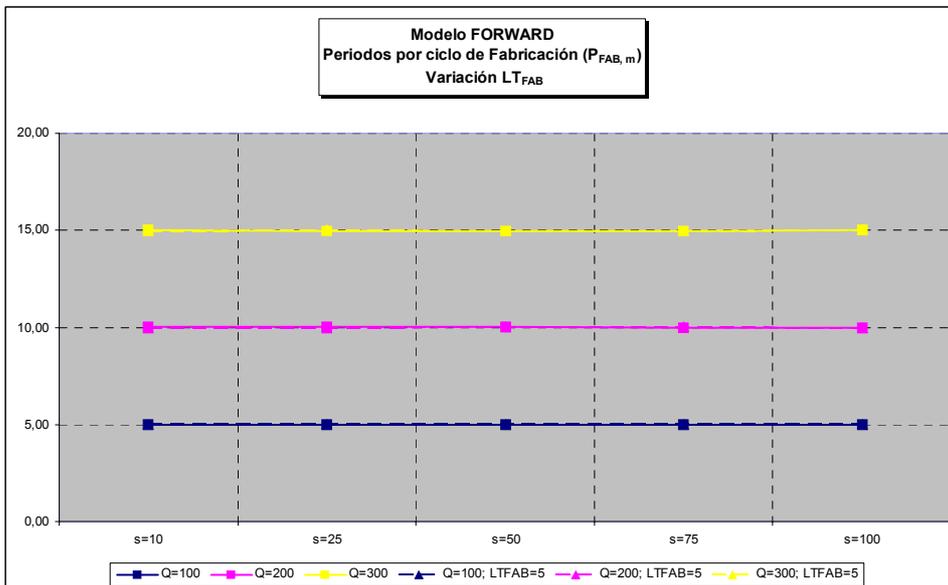


Gráfico 5.1.4: Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)



5.2.2. Modelo Reutilización.

En este modelo, la existencia de un flujo de retorno de PFU nos permite considerar éste como una variable de interés para nuestro análisis y por lo tanto la incluiremos junto con las ya definidas para el Modelo Forward. De esta forma, en este modelo, consideramos el siguiente conjunto de variables de interés:

- 1) Número medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$).
- 2) Número medio de faltantes por periodo (F_t).
- 3) Número medio de originales por periodo (O_t).
- 4) Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$).
- 5) Número medio de PFU retornados (PFU_t)

También consideramos un escenario base inicial a partir del cual estudiar el comportamiento del modelo, a través de las variables de interés, ante variaciones en los parámetros del modelo. Este escenario base queda definido por los siguientes valores: $LT_{FAB}=2$, $LT_{PFU}=2$, $n=2$, $p=40\%$. En la Tabla 5.2 se muestran los valores de las variables de interés de este Modelo Reutilización para cada combinación paramétrica (s , Q). Estas combinaciones (s , Q) nos permiten considerar diferentes “escalas” en el modelo, de manera que diremos que el modelo trabaja a *escala pequeña* si tanto el punto de pedido (s) como el tamaño del lote de fabricación (Q) toman los valores más pequeños del intervalo de variación que hemos considerado ($s=(10, 25, 50)$; $Q=(100, 150, 200)$). Por su parte, diremos que el modelo trabaja en una *escala grande* si los parámetros (s , Q) toman los valores superiores del intervalo de variación ($s=(75, 100)$; $Q=(250, 300)$). Cuando el modelo trabaja a *pequeña escala*, los valores de las variables tienden hacia su valor de estado estacionario, mientras que cuando el modelo funciona a *escala grande* los valores de estas variables alcanzan el valor de estado estacionario o fluctúan alrededor de él.

A continuación presentaremos los principales resultados obtenidos en el análisis paramétrico realizado, utilizando para ello distintos gráficos que facilitarán la exposición.

Tabla 5.2: Resultados escenario base Modelo Reutilización

MODELO REUTILIZACIÓN					
Nº medio de Comerciables por periodo ($S_{t,FAB}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	17.54	35.98	57.99	81.44	106.04
s=25	26.65	47.80	70.98	95.28	119.46
s=50	49.32	73.90	99.03	123.53	148.93
s=75	74.21	99.26	124.69	148.85	174.79
s=100	99.24	124.26	149.75	174.21	199.45
Nº medio de Faltantes por periodo (F_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	9.42	6.02	4.28	3.33	2.71
s=25	6.16	3.84	2.82	2.17	1.83
s=50	0.71	0.49	0.34	0.29	0.24
s=75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s=100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nº medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	4.11	5.45	6.14	6.51	6.71
s=25	5.36	6.29	6.71	6.95	7.10
s=50	7.55	7.61	7.67	7.66	7.72
s=75	7.79	7.78	7.78	7.76	7.83
s=100	7.81	7.81	7.83	7.81	7.78
Nº medio de Originales por periodo (O_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	15.91	14.60	13.86	13.53	13.35
s=25	14.65	13.72	13.34	13.05	12.98
s=50	12.47	12.40	12.35	12.36	12.32
s=75	12.21	12.22	12.25	12.25	12.23
s=100	12.20	12.22	12.18	12.26	12.29
Nº medio de Periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	6.29	10.28	14.43	18.47	22.48
s=25	6.83	10.93	15.00	19.16	23.11
s=50	8.02	12.09	16.19	20.23	24.36
s=75	8.19	12.28	16.33	20.40	24.53
s=100	8.20	12.28	16.43	20.39	24.42

Es necesario hacer notar que este análisis paramétrico se realiza para el escenario base que inicialmente hemos considerado y los resultados son válidos únicamente en este contexto. Ante un escenario base diferente, los resultados pudieran ser diferentes a los obtenidos para éste. Más adelante volveremos a recuperar este asunto al realizar el análisis comparativo de los diferentes modelos.

Sobre estos resultados hemos analizado el efecto de modificar los parámetros básicos: el plazo de entrega de los pedidos de productos originales (LT_{FAB}), el plazo de entrega de los productos retornados que se reutilizan (LT_{PFU}), el tiempo de consumo (n) y la probabilidad de retorno de PFU (p). Introduciremos el análisis con una descripción de cada una de las variables relevantes del modelo y posteriormente estudiaremos el comportamiento de cada una de ellas ante las mencionadas variaciones paramétricas.

En cuanto al Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB, t}$), y para el escenario base que estamos considerando, observamos un comportamiento creciente de esta variable en función del tamaño del lote de fabricación (Q) y del punto de pedido (s) (Gráfico 5.2.1). Como consecuencia, el número medio de faltantes por periodo presenta un comportamiento decreciente a medida que el modelo aumenta su escala, es decir, a medida que se incrementan s y Q (Gráfico 5.2.2).

Gráfico 5.2.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)

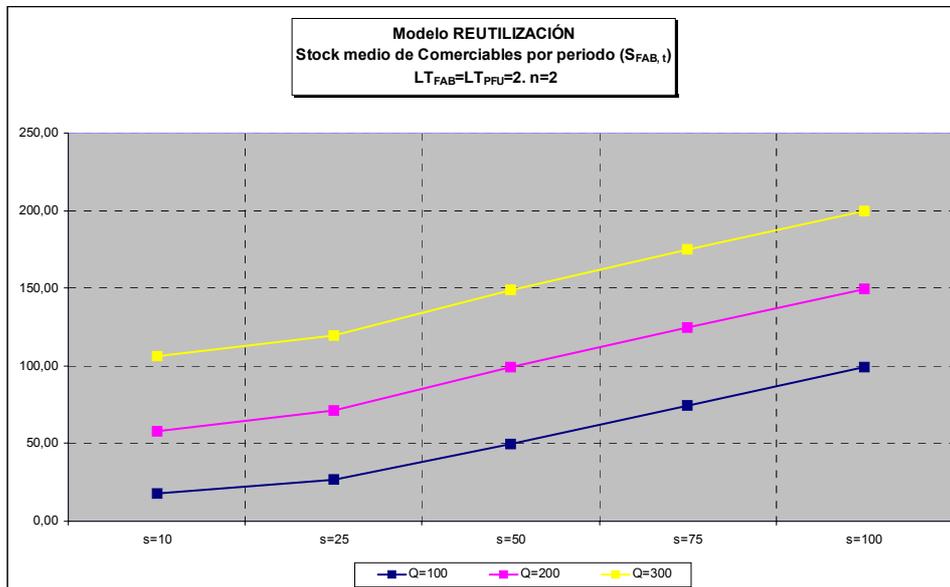
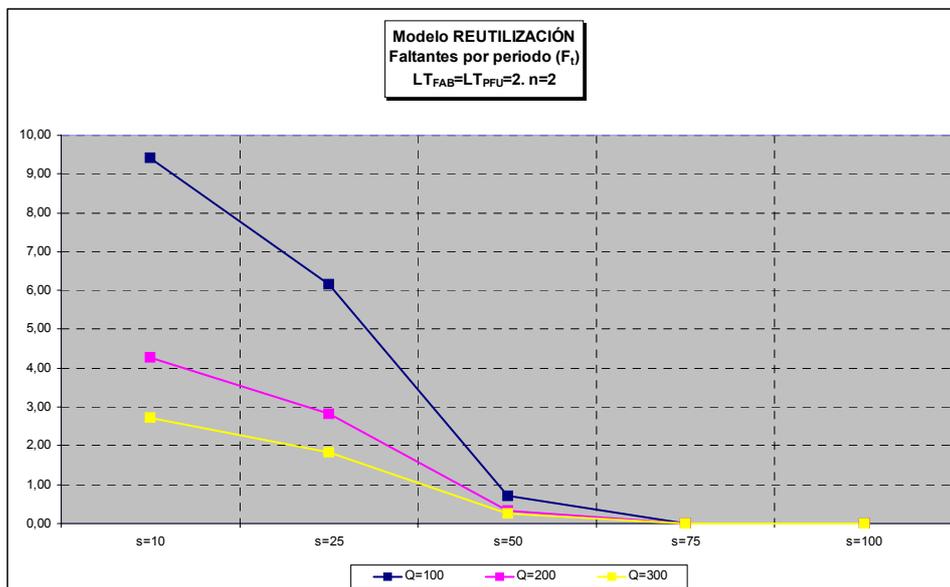


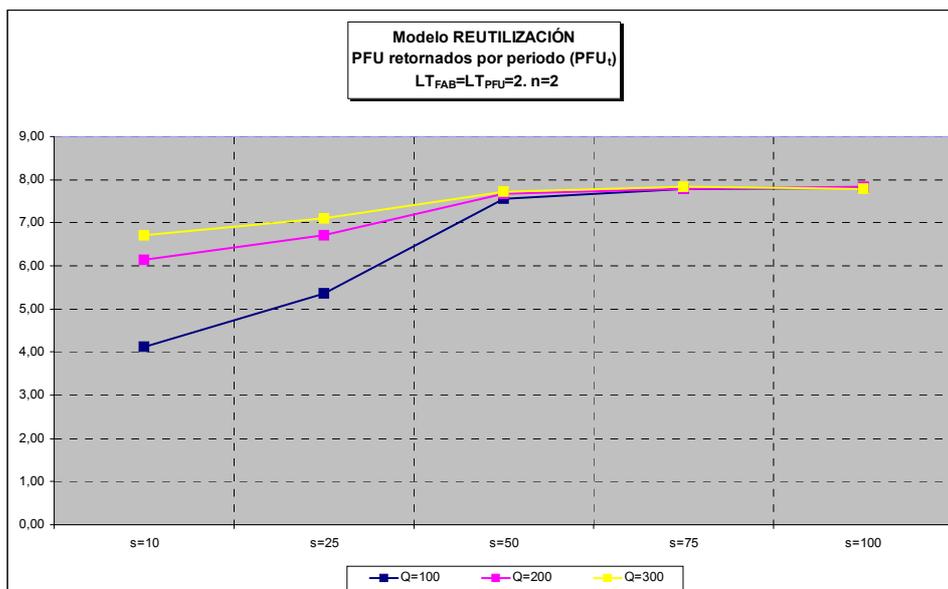
Gráfico 5.2.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)



El flujo de retorno de PFU nos permitirá observar el comportamiento de la variable PFU_t , la cual tiende hacia su valor de estado estacionario a medida que aumenta

la escala del modelo, o dicho de otra forma, a medida que el número de faltantes por periodo disminuye. Recordemos que hemos simulado un proceso binomial para representar el comportamiento de este flujo de retorno $PFU_t \sim B(V_{t-n}, p)$, por lo que el valor esperado de esta variable aleatoria tiende hacia $E[PFU_t] = p * E[V_{t-n}]$, donde $V_t \sim N(20; 2.5)$. En el escenario base que estamos considerando $p=40\%$, y $E(V_t)=20$, por lo que el valor esperado del flujo de retorno se aproximará a 8 unidades, a medida que el número de faltantes por periodo tiende a cero. (Gráfico 5.2.3).

Gráfico 5.2.3: Número medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)

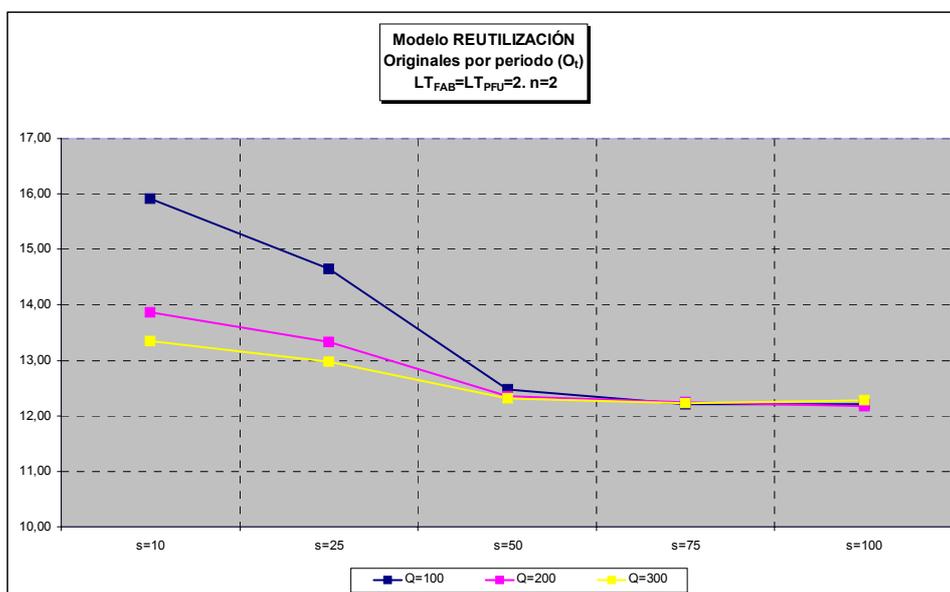


En este Modelo Reutilización los PFU retornados pasan directamente a integrar el inventario de productos comerciables por lo que las necesidades de adquirir productos originales se verán disminuidas en la misma medida que los PFU van retornando al sistema. En términos medios, podemos observar que el número medio de productos originales necesarios por periodo para atender la demanda (O_t) decrece al mismo ritmo que aumenta el valor de PFU_t , tendiendo hacia un valor determinado por la diferencia

entre la demanda media por periodo y el número medio de retornos por periodo (Gráfico 5.2.4).

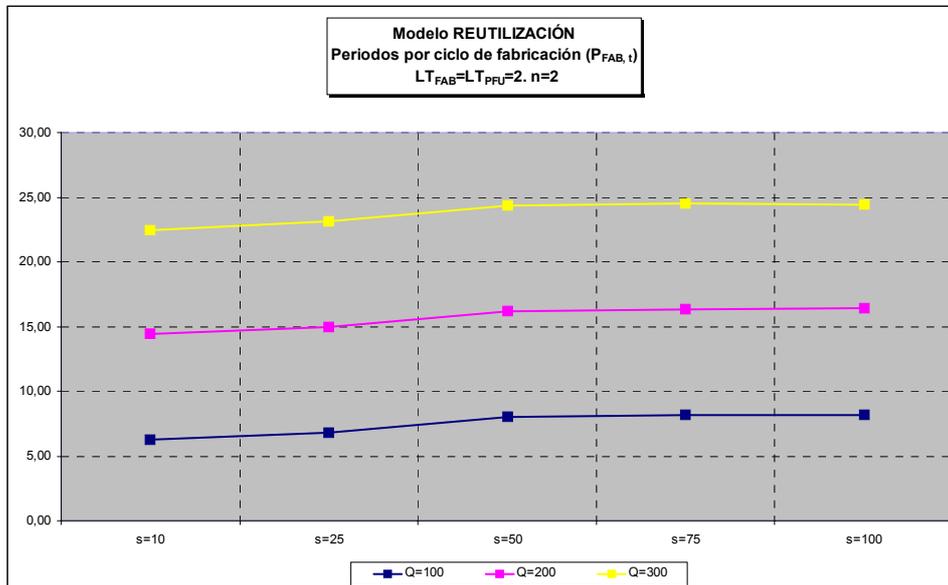
$$E(O_t) = E(D_t) - E(PFU_t) \quad (5.1)$$

Gráfico 5.2.4: Número medio de originales por periodo (O_t)



Esta disminución en las necesidades de productos originales tiene su reflejo en el aumento que experimenta la longitud del ciclo respecto al Modelo Forward. El número medio de periodos por ciclo aumenta significativamente al incorporar un flujo de retorno de PFU, tendiendo hacia un valor estable a medida que disminuye el número de unidades no satisfechas por periodo. (Gráfico 5.2.5).

Gráfico 5.2.5: Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)



A continuación hemos examinado el comportamiento de las variables de interés del modelo ante variaciones en los parámetros que lo definen. Por lo que respecta al *Stock medio de comerciables por periodo* ($S_{FAB,t}$) obtenemos como resultados más relevantes los siguientes²⁴:

- 1) Un incremento del plazo de entrega, bien de originales (LT_{FAB}), bien de PFU (LT_{PFU}), o en ambos simultáneamente, provoca una disminución en el valor de esta variable ($S_{FAB,t}$) que resulta más acusado en el caso de un incremento en LT_{FAB} , efecto éste que domina en el supuesto de una variación conjunta en el plazo de entrega de ambos productos. (Gráficos 2.1.a, 2.1.b y 2.1.c, pág. 224 y 225).
- 2) Por su parte, una variación en el tiempo de consumo (n) no parece tener efectos significativos sobre el nivel de comerciables por periodo, tomando como referencia el escenario base propuesto.

²⁴ Los gráficos correspondientes pueden consultarse en el Apéndice Gráfico (pág. 223).

- 3) Finalmente, un incremento en la tasa de retorno de PFU (p), *escenario optimista*, provoca una disminución del nivel de comerciables por periodo, mientras que una disminución de esta tasa de retorno, *escenario pesimista*, no parece generar efectos relevantes en el valor de este stock medio.

El comportamiento de la variable *Número medio de faltantes por periodo* (F_t) ante variaciones en los parámetros del modelo nos permite destacar los siguiente resultados:

- 1) Un aumento en el plazo de entrega de los productos originales (LT_{FAB}) genera un incremento en el número de unidades no satisfechas por periodo, debido a que cuanto mayor sea el plazo de entrega de los pedidos se estará incrementando la probabilidad de incurrir en situaciones de demanda no satisfecha. (Gráfico 2.2.a, pág. 227).
- 2) Un incremento en el plazo de entrega de los PFU retornados (LT_{PFU}) aumenta el número de faltantes por periodo, aunque en menor medida de lo que lo hace LT_{FAB} .
- 3) En cuanto a una variación en el tiempo de permanencia en el mercado de los productos o tiempo de consumo (n) apreciamos una ligera disminución en el valor de la variable, que al producirse en una escala pequeña del modelo no pensamos que sea especialmente relevante.
- 4) Considerando un cambio de escenario provocado por la modificación de la tasa de retorno de PFU (p), observamos que el comportamiento de esta variable (F_t) en un escenario pesimista de recuperación ($p=20\%$) es similar al del escenario base, mientras que en el escenario optimista ($p=80\%$) el número de faltantes por periodo disminuye a medida que aumenta la escala del modelo. De esta forma podríamos decir que la existencia de un flujo de retorno de PFU, permite reducir el número de unidades de

demanda no satisfechas por periodo a medida que aumenta la tasa de retorno de estos PFU.

Por lo que respecta al flujo de retorno de PFU, medido a través del *Número medio de FPU retornados por periodo* (PFU_t), podemos realizar las siguientes observaciones:

- 1) Un incremento en el plazo de entrega de originales (LT_{FAB}) provoca una disminución en el número medio de PFU retornados por periodo que resulta especialmente intensa cuanto menor es la escala del modelo. Este efecto se diluye a medida que aumenta la escala del modelo (s, Q), ya que el modelo entonces tiende hacia la posición de estado estacionario. (Gráfico 2.3.a, pág. 230).
- 2) Un incremento en el plazo de entrega de los PFU retornados genera una disminución del número de unidades devueltas al sistema aunque de menor entidad que en el caso anterior. La escala del modelo vuelve a ser relevante, en el sentido de que la variable PFU_t tiende hacia su valor de estado estacionario a medida que el modelo aumenta su escala.
- 3) Si la variación en el plazo de entrega afecta tanto a los productos originales como a los productos retornados, comprobamos que el efecto predominante es el generado por LT_{FAB} , observando un comportamiento de la variable PFU_t similar al descrito en el apartado 1) previo.
- 4) Un cambio en el tiempo de consumo de los productos (n) no parece generar efectos relevantes sobre el número de unidades retornadas por periodo.
- 5) Finalmente, la consideración de un escenario optimista ($p=80\%$) conduce, como era de esperar, a un mayor volumen de recuperación de PFU,

mientras que se provocará el efecto contrario ante una disminución en la tasa de retorno.

Debido a que la demanda del periodo se satisfará bien con originales o bien con PFU, el comportamiento de la variable *Número medio de originales por periodo* (O_t) será opuesto al analizado para la variable PFU_t :

- 1) Un incremento en el plazo de entrega de originales (LT_{FAB}) provocará un aumento en el valor de esta variable, en consonancia con la disminución en el número de PFU retornados. (Gráfico 2.4.a, pág. 234).
- 2) Por su parte, un incremento del plazo de entrega de PFU tiene un efecto más modesto sobre el comportamiento de esta variable O_t .
- 3) El efecto de LT_{FAB} domina al efecto de LT_{PFU} sobre el número medio de originales por periodo, ante una variación simultánea en estos dos parámetros.
- 4) En cuanto a un incremento en el tiempo de permanencia en el mercado de los productos (n), los valores paramétricos considerados no parecen afectar de manera relevante a la variable O_t .
- 5) Ante un escenario optimista de recuperación de PFU, la necesidad de acudir a productos originales disminuye, mientras que si la tasa de recuperación es la señalada en el escenario pesimista ($p=20\%$), será necesario adquirir un mayor número de productos originales.

Para finalizar este análisis paramétrico del Modelo Reutilización presentamos los resultados obtenidos para la variable *Número medio de periodos por ciclo* ($P_{FAB,t}$):

- 1) Un incremento del plazo de entrega de originales genera una disminución en el número de periodos existentes entre dos pedidos consecutivos de productos originales, y por lo tanto pedidos más frecuentes, aunque este

efecto se corrige a medida que aumenta la escala del modelo. Este resultado parece estar en consonancia con los obtenidos en apartados anteriores, ya que podemos pensar que dado que un incremento en el plazo de entrega de los pedidos genera un aumento en el número medio de faltantes por periodo, el modelo intenta corregir esta situación acudiendo con mayor frecuencia al mercado de originales para poder satisfacer la demanda pendiente. (Gráfico 2.5.a, pág. 237).

- 2) En relación a LT_{PFU} el efecto sobre la longitud del ciclo es mucho más modesto que en el caso anterior, estabilizándose el valor de la variable a medida que se aumenta la escala del modelo.
- 3) El plazo de entrega de los originales sigue imponiendo su importancia sobre el valor de $P_{FAB,t}$ en comparación con el plazo de entrega de PFU.
- 4) El tiempo de consumo (n) no parece afectar a la longitud del ciclo de pedidos de productos originales.
- 5) En un escenario optimista de recuperación la longitud del ciclo se incrementa, especialmente a medida que aumenta la escala del modelo, mientras que un escenario pesimista de recuperación genera el efecto opuesto.

Con los resultados obtenidos podemos señalar que en este Modelo Reutilización los efectos generados por la existencia de un flujo de retorno de PFU se amplifican a medida que se incrementa la escala del modelo, ya que, por una parte, al aumentar el punto de pedido (s) disminuirá el número medio de faltantes por periodo (F_t), provocando que el modelo tienda a posiciones de estado estacionario, y por otra parte, al incrementar el tamaño del lote de originales (Q), manteniéndose estable la demanda, aumenta el volumen de unidades en el stock de comerciables permitiendo que el flujo de retorno desarrolle todas sus capacidades: minoración de faltantes por periodo,

disminución del número de originales por periodo y mayor longitud del ciclo de fabricación o adquisición.

5.2.3. Modelo Refabricación.

Este modelo supone la versión más completa del ejercicio de simulación numérica realizado, ya que considera la existencia de un inventario específico para los PFU que retornan al sistema, en el cual permanecen hasta que se lanza la oportuna orden de refabricación y pasan a integrar el inventario de productos comerciables. Así pues, para la descripción de este modelo utilizaremos las siguientes variables de interés:

- 1) Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$).
- 2) Número medio de faltantes por periodo (F_t).
- 3) Número medio de PFU retornados (PFU_t)
- 4) Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU,t}$).
- 5) Número medio de originales por periodo (O_t).
- 6) Número medio de periodos por ciclo de fabricación ($P_{FAB,t}$).
- 7) Número medio de periodos por ciclo de refabricación ($P_{REF,t}$)

En este Modelo Refabricación consideraremos también un escenario base que nos permita realizar el oportuno análisis paramétrico. En este caso, dicho escenario queda definido por los valores $LT_{FAB}=2$, $LT_{PFU}=2$, $n=2$, $Q_{REF}=25$, $p=40\%$, para el cual se presenta la siguiente tabla de resultados:

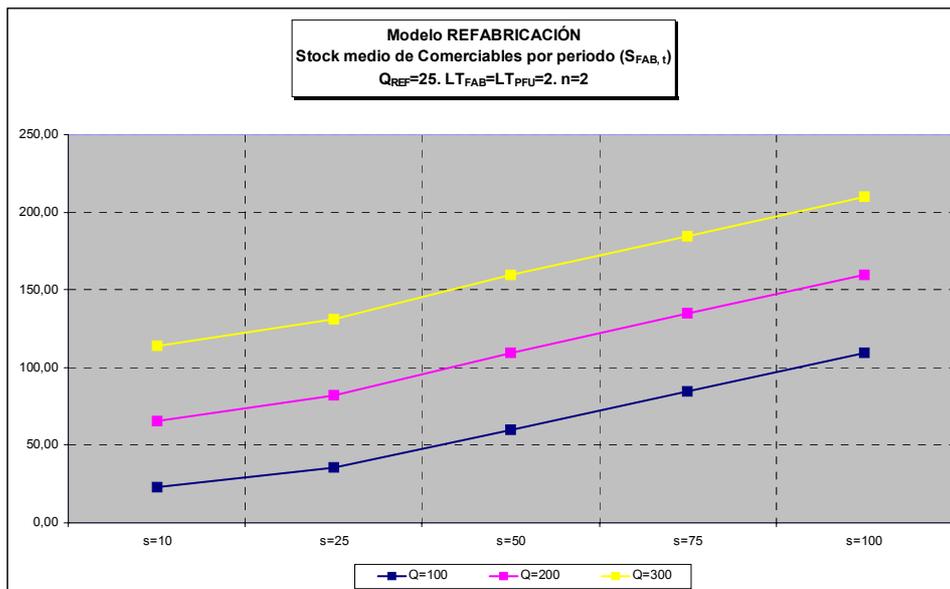
Tabla 5.3: Resultados escenario base Modelo Refabricación.

MODELO REFABRICACIÓN. $Q_{REF}=25$					
Stock medio de Comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	22.96	42.50	65.67	89.33	113.84
s=25	35.67	58.14	82.20	106.76	131.30
s=50	59.62	84.35	109.25	134.67	159.36
s=75	84.34	109.20	134.56	159.41	184.57
s=100	109.35	134.45	159.83	184.50	209.81
Nº medio de Faltantes por periodo (F_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	7.45	4.79	3.43	2.66	2.18
s=25	3.68	2.42	1.72	1.38	1.15
s=50	0.29	0.21	0.15	0.11	0.09
s=75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s=100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nº medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	4.89	5.96	6.46	6.79	6.95
s=25	6.36	6.81	7.09	7.26	7.34
s=50	7.67	7.73	7.72	7.76	7.73
s=75	7.81	7.77	7.80	7.78	7.80
s=100	7.81	7.79	7.77	7.81	7.78
Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU,t}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	14.81	15.26	15.36	15.63	15.63
s=25	15.34	15.62	15.61	15.73	15.68
s=50	15.87	15.91	15.79	15.95	15.91
s=75	15.96	15.84	15.91	15.86	15.93
s=100	16.03	15.88	15.94	15.93	15.95
Nº medio de Originales por periodo (O_t)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	15.12	14.04	13.60	13.23	13.04
s=25	13.61	13.19	12.90	12.74	12.66
s=50	12.37	12.29	12.29	12.24	12.26
s=75	12.20	12.24	12.22	12.24	12.22
s=100	12.23	12.23	12.23	12.19	12.22
Nº medio de Periodos por ciclo de Fabricación ($P_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	6.61	10.68	14.71	18.90	23.00
s=25	7.35	11.37	15.50	19.62	23.69
s=50	8.09	12.20	16.27	20.43	24.46
s=75	8.20	12.26	16.37	20.43	24.56
s=100	8.18	12.26	16.35	20.50	24.55
Nº medio de Periodos por ciclo de Refabricación ($P_{REF,t}$)					
$LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
s=10	5.11	4.20	3.87	3.68	3.59
s=25	3.93	3.67	3.53	3.44	3.40
s=50	3.26	3.23	3.24	3.22	3.23
s=75	3.20	3.22	3.20	3.21	3.20
s=100	3.20	3.21	3.22	3.20	3.21

Un análisis descriptivo de cada una de estas variables básicas nos permitirá observar el comportamiento del modelo y servirá de introducción para el posterior análisis paramétrico.

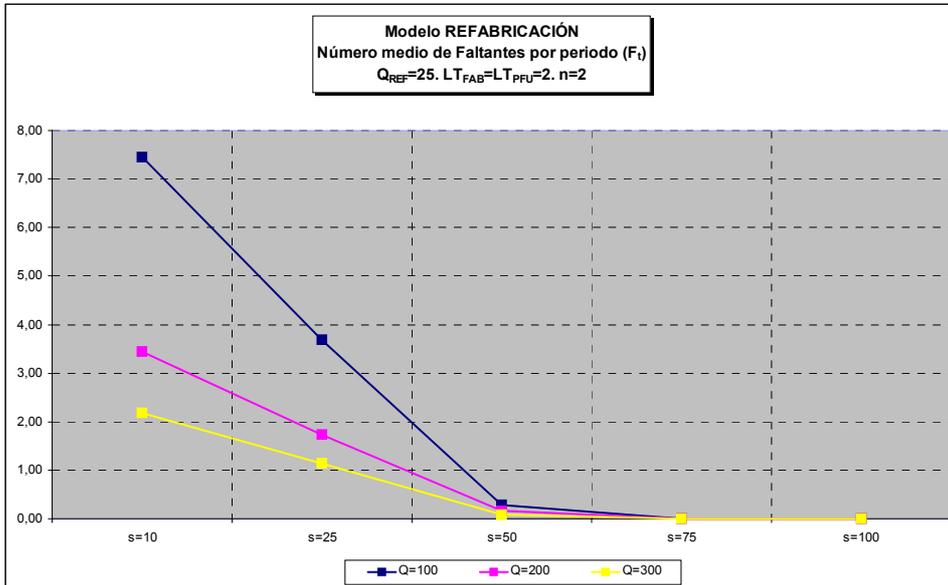
En cuanto al stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$) observamos el comportamiento habitual ante un incremento en la escala utilizada en el modelo: el nivel de comerciables tiende a aumentar a medida que los parámetros (s, Q) toman los valores superiores de su intervalo.

Gráfico 5.3.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)



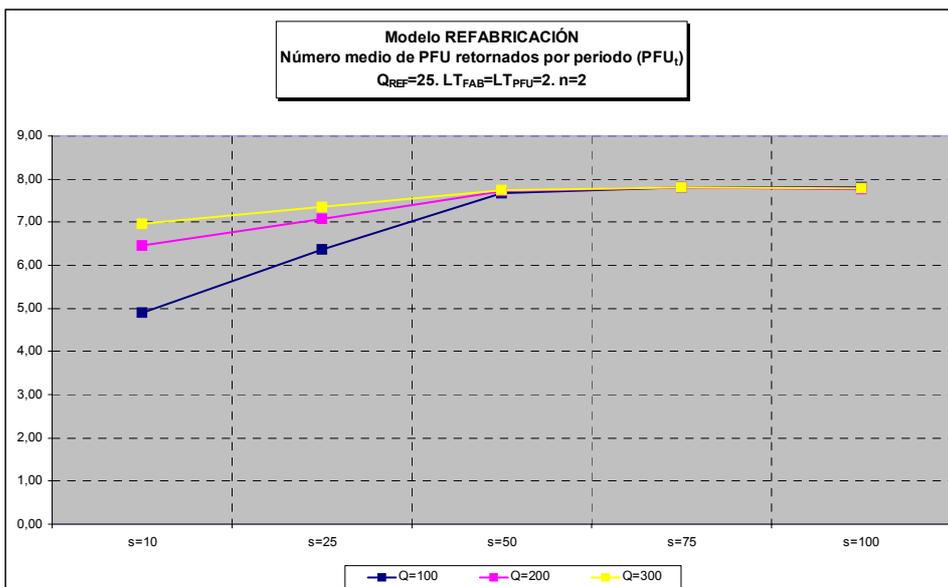
Como consecuencia de esto se generará un menor número de faltantes por periodo, a medida que se aumenta la escala del Modelo Refabricación.

Gráfico 5.3.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)



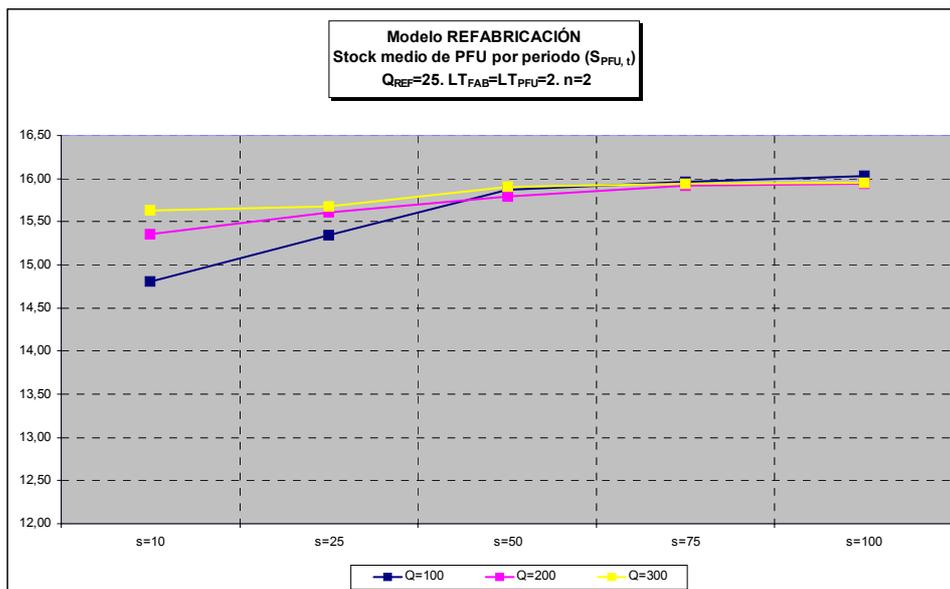
El flujo de retorno de PFU, medido a través del número medio de unidades retornadas PFU_t , se estabiliza a medida que aumenta la escala del modelo como consecuencia del menor número de faltantes.

Gráfico 5.3.3: Número medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)



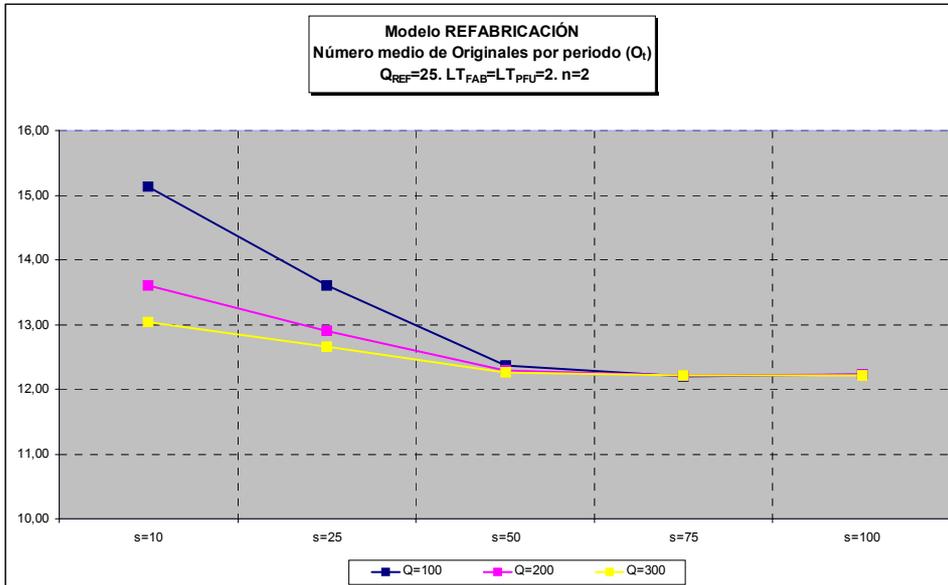
Este flujo de retorno alimenta el inventario de PFU cuyo comportamiento podemos analizar a través del estudio de su stock medio ($S_{PFU, t}$). La estabilidad del flujo de entrada junto con el tamaño constante del lote de refabricación hacen que se consiga una estabilidad en el valor de esta variable para cualquier escala de utilización del modelo.

Gráfico 5.3.4: Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU, t}$)



Este flujo de retorno disminuye la necesidad de aprovisionarse de unidades originales, sobre todo a medida que se estabiliza el número de unidades que reingresan en el sistema.

Gráfico 5.3.5: Número medio de Originales por periodo (O_t)



La existencia de dos fuentes distintas de aprovisionamiento en el inventario de productos comerciables (lote de originales y lote de refabricados) nos conduce a considerar políticas de lanzamiento de órdenes de fabricación (adquisición) y de refabricación independientes que dan lugar a las variables $P_{FAB,t}$ y $P_{REF,t}$.

Gráfico 5.3.6: Número medio de periodos por ciclo de fabricación ($P_{FAB,t}$)

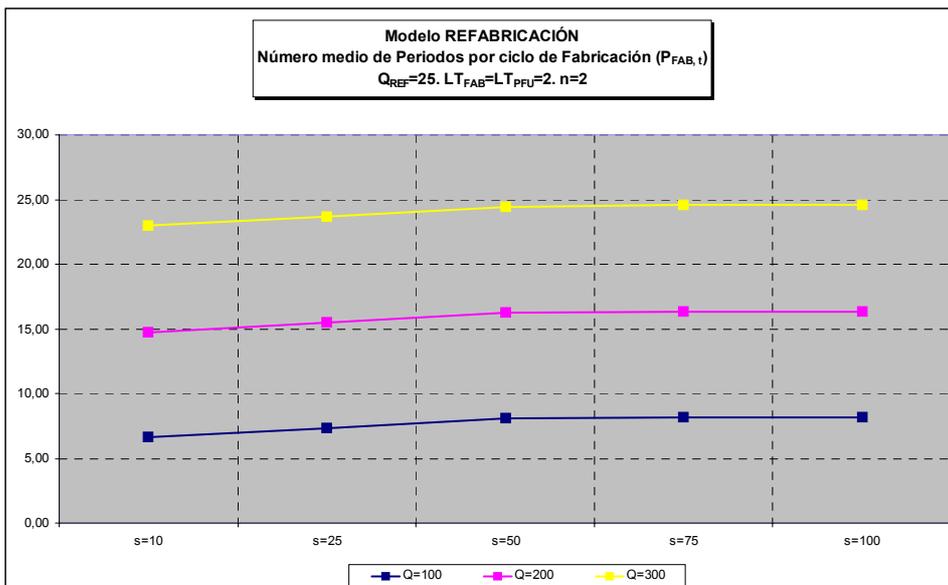
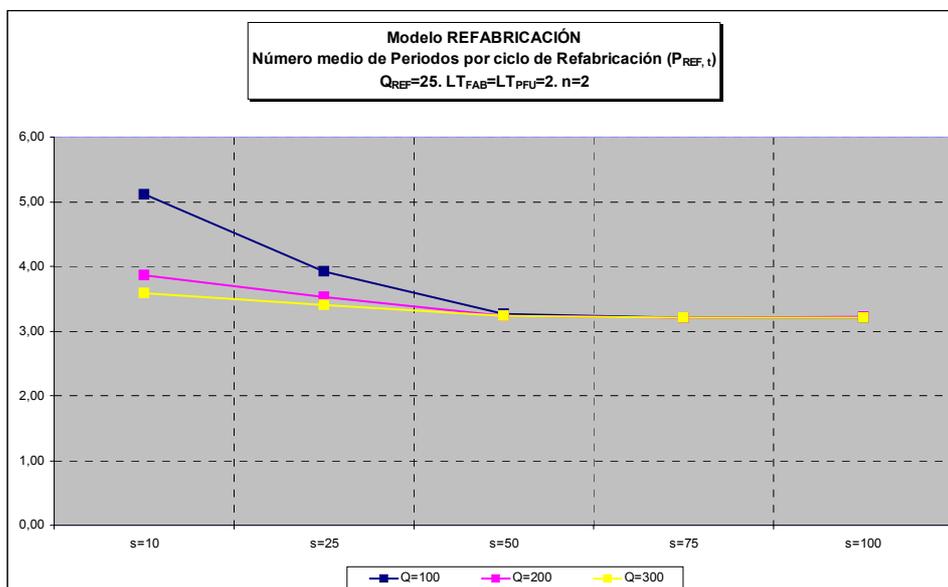


Gráfico 5.3.7: Número medio de periodos por ciclo de refabricación ($P_{REF,t}$)



Para el análisis paramétrico seguiremos el mismo esquema utilizado en el Modelo Reutilización, examinado el comportamiento de cada una de las variables de interés del modelo ante variaciones en los parámetros básicos del mismo: el plazo de entrega de los pedidos de originales (LT_{FAB}), el plazo de entrega de los pedidos de productos refabricados (LT_{PFU}), el tamaño del lote de refabricación (Q_{REF}), el tiempo de consumo (n) y la tasa de retorno de PFU (p). Los gráficos correspondientes a este análisis figuran en el Apéndice Gráfico de la tesis.

En cuanto al *Stock medio de comerciables por periodo* ($S_{FAB,t}$) observamos el siguiente comportamiento ante variaciones en el escenario base:

- 1) Un incremento del plazo de entrega de originales (LT_{FAB}) minora el nivel medio de comerciables por periodo en porcentajes similares para cada escala del modelo. (Gráfico 3.1.a, pág. 241).

- 2) Un aumento del plazo de entrega de los pedidos de refabricación provoca también una disminución del stock medio de comerciables por periodo pero de menor entidad que en el caso anterior de pedidos de originales.
- 3) Si consideramos un incremento simultáneo en los plazos de entrega de ambos pedidos, observamos un efecto amplificado de la reducción en el nivel de comerciables por periodo, quizá como consecuencia de la agregación de los efectos obtenidos de manera independiente.
- 4) Por su parte, un incremento en el tamaño del lote de refabricación (Q_{REF}) provoca un aumento previsible en el stock medio de comerciables.
- 5) El tiempo de consumo de los productos finales no genera un efecto relevante sobre el nivel de comerciables por periodo en este escenario paramétrico que estamos considerando.
- 6) Finalmente, considerando un escenario optimista en el que la tasa de retorno de PFU aumenta hasta un 80% podemos observar un efecto inocuo sobre el nivel de comerciables por periodo, mientras que si disminuye la tasa de retorno hasta el 20% (escenario pesimista), la minoración de este nivel es tan reducida que no cabría considerarla como relevante.

La variable *Número medio de faltantes por periodo* (F_t) presenta el siguiente comportamiento ante modificaciones del escenario base:

- 1) Un aumento del plazo de entrega de originales genera un importante aumento del número de unidades de demanda no satisfechas por periodo, especialmente acusado en los valores inferiores de la escala del modelo. (Gráfico 3.2.a, pág. 245).
- 2) Por su parte un incremento del tiempo que transcurre entre que lanza la orden de refabricación y ésta llega al stock de comerciables (LT_{PFU})

incrementa el número de faltantes por periodo, aunque de una forma mucho más modesta que en el caso anterior.

- 3) Si consideramos un incremento simultáneo en ambos plazos de entrega observaremos un número medio de faltantes por periodo superior al obtenido como resultado de la variación por separado de cada uno de estos parámetros .
- 4) Suponiendo un lote de mayor tamaño para los pedidos de productos refabricados (Q_{REF}), observaremos que el número de unidades de demanda no atendidas por periodo disminuye ligeramente, sobre todo en las escalas más reducidas del modelo.
- 5) Una modificación al alza del tiempo de permanencia en el mercado de los productos (n) no provoca variaciones relevantes en la variable que estamos analizando.
- 6) La consideración de un escenario optimista de recuperación de PFU ($p=80\%$) permite disminuir el número de faltantes por periodo, de manera más notable en las escalas reducidas del modelo, mientras que un escenario pesimista de recuperación ($p=20\%$) incrementa ligeramente el valor del variable F_t .

En el análisis del *Número medio de PFU retornados al sistema por periodo* (PFU_t) realizaremos las siguientes observaciones:

- 1) Ante un incremento del plazo de entrega de productos originales, el número de unidades que retornan al sistema disminuye significativamente en las escalas reducidas del modelo, convergiendo a su nivel de estado estacionario a medida que se incrementa la escala (s, Q). (Gráfico 3.3.a, pág. 249).

- 2) Si es el plazo de entrega de refabricados el que experimenta tal incremento, el valor de PFU_t tiene un comportamiento similar, aunque de menor entidad, que el observado en el apartado anterior.
- 3) Un incremento conjunto de ambos plazos de entrega reduce el número de unidades fuera de uso retornadas, aunando el efecto producido por la consideración individual de ambos parámetros.
- 4) El incremento en el tamaño del lote de refabricación no genera efectos relevantes sobre la variable de interés.
- 5) El tiempo de consumo (n) tampoco parece ser una variable relevante para la determinación del número medio de PFU retornados por periodo.
- 6) Un escenario optimista de retorno de PFU conducirá, naturalmente, a recuperar un mayor número de estos productos. Por el contrario, un escenario pesimista provocará el efecto opuesto.

Este flujo de retorno de PFU constituye la fuente de entrada del inventario de PFU, por lo que los resultados del análisis paramétrico para la variable *Stock medio de PFU por periodo* ($S_{PFU,t}$) estarán, a priori, en consonancia con los obtenidos en el análisis de la variable PFU_t :

- 1) En cuanto a una variación en el plazo de entrega de los pedidos de productos originales, observamos una reducción en este stock medio en niveles similares al experimentado por su flujo de entrada (PFU_t). (Gráfico 3.4.a, pág. 253).
- 2) Si analizamos un incremento del plazo de entrega de los pedidos de refabricación, observamos una reducción más modesta del nivel de este inventario.

- 3) Si la variación de plazos de entrega es simultánea se acumularán los efectos de las variaciones por separado, de manera que se reduce en mayor número el stock medio de PFU.
- 4) Ante un incremento del tamaño del lote de refabricación (Q_{REF}) el nivel medio por periodo de este inventario aumentará como consecuencia de requerir un mayor número de periodos para completar un lote.
- 5) Variaciones en el tiempo de consumo de los productos (n) provocan ligeras modificaciones de la variable de interés, más evidentes en escalas reducidas del modelo que tienden a desaparecer a medida que aumentamos la escala del mismo.
- 6) Por lo que respecta a la tasa de recuperación de PFU, en un escenario optimista esperaremos incrementar el nivel medio de este inventario y cuando la tasa de recuperación sea reducida dicho nivel medio se verá disminuido.

El análisis de la variable *Número medio de originales por periodo* (O_t) revelará un comportamiento opuesto al que hemos presentado para la variable PFU_t , debido a que la demanda periódica que no se pueda cubrir con unidades refabricadas deberá satisfacerse mediante la adquisición o fabricación de originales:

- 1) Un incremento del plazo de entrega de originales provoca un incremento en el número de unidades de este tipo de producto que son necesarias para satisfacer la demanda, principalmente si el modelo funciona a una escala pequeña. (Gráfico 3.5.a, pág.257).
- 2) Un plazo de entrega mayor para los pedidos de refabricación también modifica al alza el valor de la variable O_t , aunque el efecto es de menor tamaño que en el apartado anterior.

- 3) Un aumento conjunto en ambos plazos de entrega provocará la agregación de los efectos obtenidos por separado, incrementando de este modo el valor de la variable de interés.
- 4) El tamaño del lote de refabricación no genera efectos apreciables sobre el número de originales por periodo, sobre todo cuando el modelo funciona a una escala media-grande.
- 5) El tiempo de permanencia en el mercado (n) tampoco parece influir en el comportamiento de esta variable en el escenario paramétrico que estamos considerando.
- 6) En cuanto al escenario de retorno que consideremos, obviamente al incrementar la tasa de retorno (p) la necesidad de acudir al mercado de originales será menor, mientras que en un escenario optimista el efecto será el contrario.

Como comentábamos anteriormente, la existencia de dos inventarios en este Modelo Refabricación (comerciables y PFU) nos permite establecer políticas de pedido para ambos stocks que generan o pueden generar ciclos de lanzamiento de pedidos diferentes en su longitud, es decir, en el número de periodos que los integran. A continuación analizamos cómo afectan los parámetros del modelo a la variable aleatoria que definimos para estudiar el número de periodos por ciclo en cada uno de los inventarios existentes.

Con relación al *Número de periodos por ciclo de originales* ($P_{FAB,t}$) podemos señalar las siguientes características:

- 1) Ante un incremento del plazo de entrega de los pedidos de productos originales (LT_{FAB}), la longitud del ciclo disminuye cuando la escala del

modelo es pequeña, permaneciendo estables en los niveles más altos de los parámetros (s, Q). (Gráfico 3.6.a, pág. 261).

- 2) Si el incremento se produce en el plazo de entrega de los pedidos de refabricación, se observa un comportamiento similar al anterior pero de menor impacto y que se estabiliza más rápidamente en la escala.
- 3) Si el incremento es simultáneo en ambos plazos de entrega, comprobamos que el efecto sobre la variable de interés parece ser el agregado de los efectos por separado.
- 4) Un incremento del tamaño del lote de refabricación no afecta, de manera significativa, a la longitud del ciclo de fabricación.
- 5) Del mismo modo, un incremento en el tiempo de consumo (n) tampoco tiene efectos relevantes sobre la frecuencia de pedidos de originales.
- 6) Por su parte, un incremento en la tasa de retorno de PFU provoca un incremento en el número de periodos por ciclo de fabricación, mayor cuanto mayor es la escala del modelo. Si el escenario de recuperación es pesimista la frecuencia de pedidos de originales aumentará (menor número de periodos por ciclo) principalmente en las escalas del modelo más altas.

Por lo que respecta al *Número medio de periodos por ciclo de refabricación* ($P_{REF,t}$) podemos subrayar los siguientes aspectos:

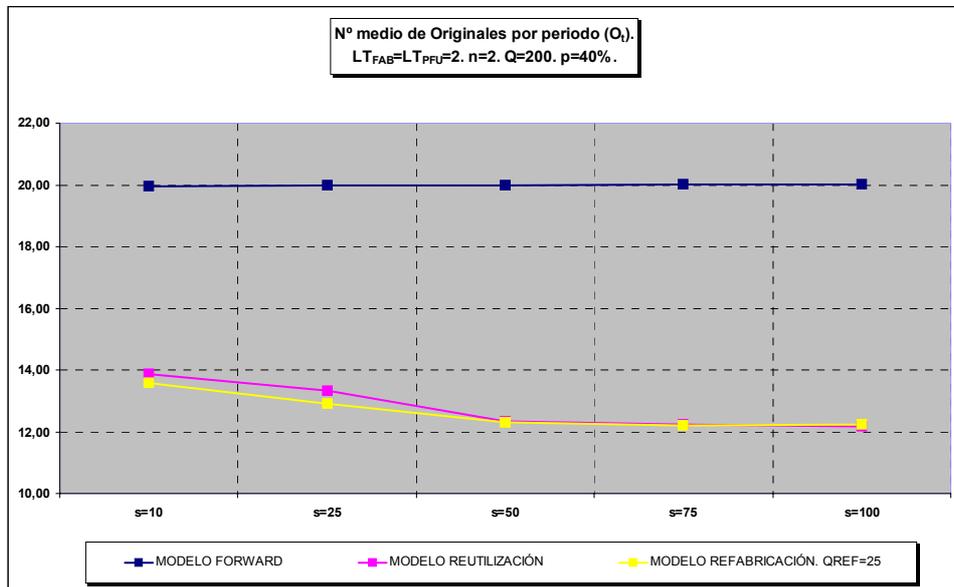
- 1) Ante un incremento en el plazo de entrega de originales el ciclo de refabricación aumenta su longitud en todos los casos, aunque es especialmente significativo a una escala reducida del modelo en la que el número de periodos por ciclo de refabricación será particularmente elevado. El gráfico correspondiente a esta variación se presenta dividido en dos escalas de ordenadas diferentes para poder apreciar mejor el impacto de la variación en LT_{FAB} . (Gráfico 3.7.a, pág. 265).

- 2) Un incremento del plazo de entrega de los pedidos de refabricación tiende a aumentar el número medio de periodos existentes entre dos pedidos consecutivos, principalmente en las escalas reducidas del modelo.
- 3) Un aumento simultáneo de estos plazos de entrega provocan un efecto que suma los efectos individuales de cada uno de ellos, incrementando el número medio de periodos por ciclo de refabricación y reduciendo, por tanto, la frecuencia de emisión de pedidos.
- 4) Un incremento en el tamaño del lote de refabricación supondrá requerir un número mayor de periodos hasta completar el número de unidades suficientes que constituyen un lote, por lo que la frecuencia de pedidos será menor.
- 5) Variaciones en el tiempo de consumo no afectan al valor de esta variable de interés en el escenario base considerado.
- 6) Una variación del escenario de recuperación de PFU genera una disminución en el número de periodos necesarios para completar un ciclo de refabricación, si se trata de un aumento de la tasa de retorno, mientras que se consigue el efecto contrario al disminuir la tasa de recuperación de PFU.

Este Modelo Refabricación presenta similitudes notables con el anterior Modelo Reutilización en cuanto a los efectos derivados de la existencia de un flujo de retorno de PFU, los cuales podemos resumir en los siguientes puntos:

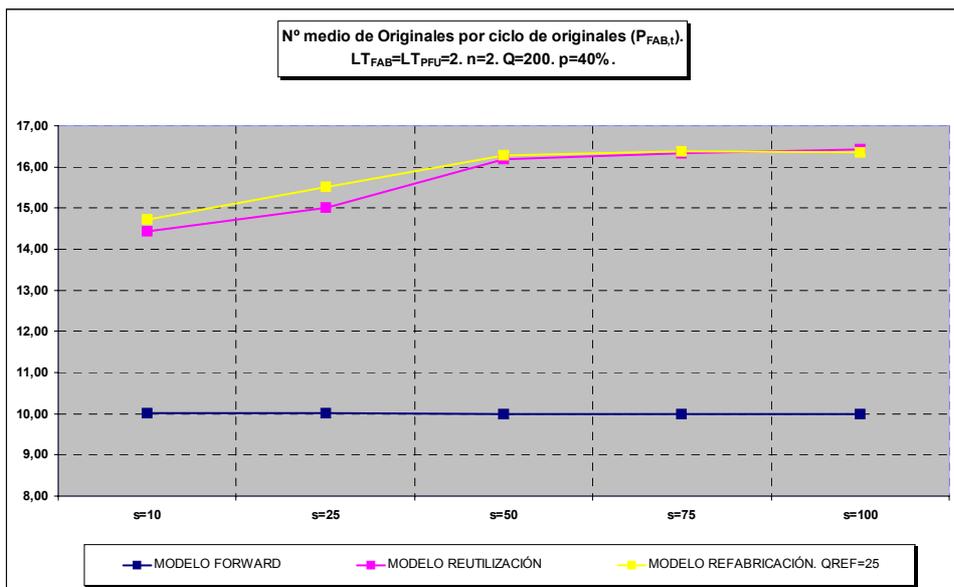
- 1) Para el escenario base que hemos considerado, la existencia de un flujo de retorno de PFU permite sustituir originales por estos productos retornados, disminuyendo de esta forma la necesidad de acudir al mercado de originales. (Gráfico 5.4)

Gráfico 5.4: Comparación de Modelos. O_t .



- 2) Este efecto sustitución genera una menor frecuencia en el lanzamiento de órdenes de fabricación o adquisición de originales y por tanto ciclos de mayor amplitud. (Gráfico 5.5)

Gráfico 5.5: Comparación de Modelos. $P_{FAB,t}$.



- 3) En cuanto al nivel medio del stock de comerciables, observamos que el Modelo Refabricación tiende a generar un mayor número de unidades en disposición de atender la demanda, lo que permitirá reducir el número de faltantes y aumentar así el nivel de servicio.

Gráfico 5.6: Comparación de Modelos. $S_{FAB,t}$.

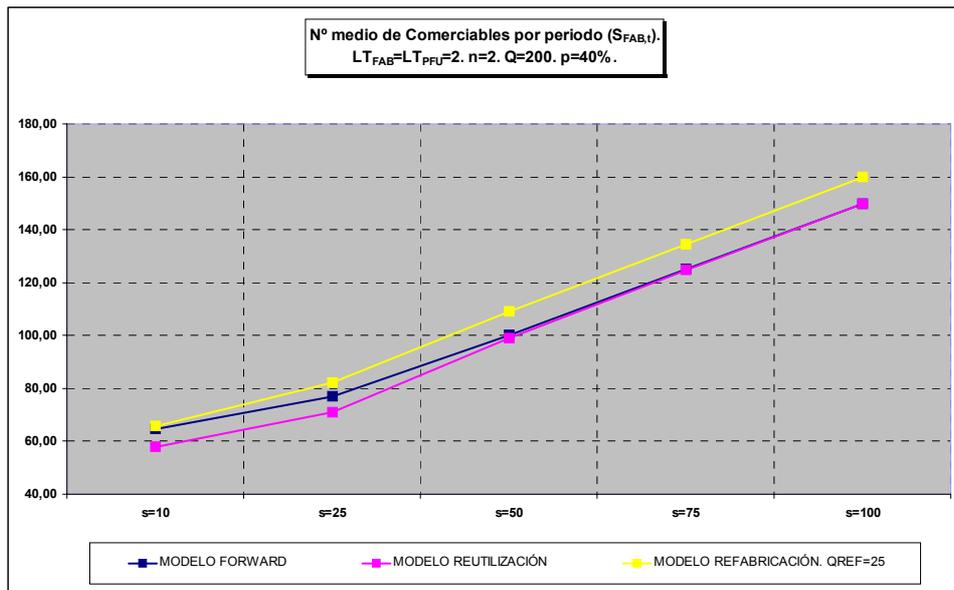


Gráfico 5.7: Comparación de Modelos. F_t .

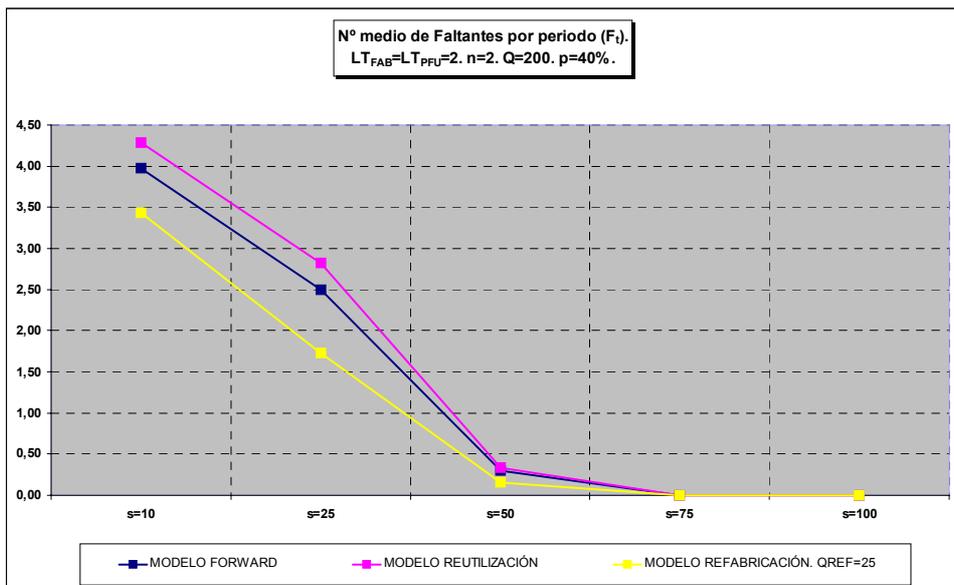
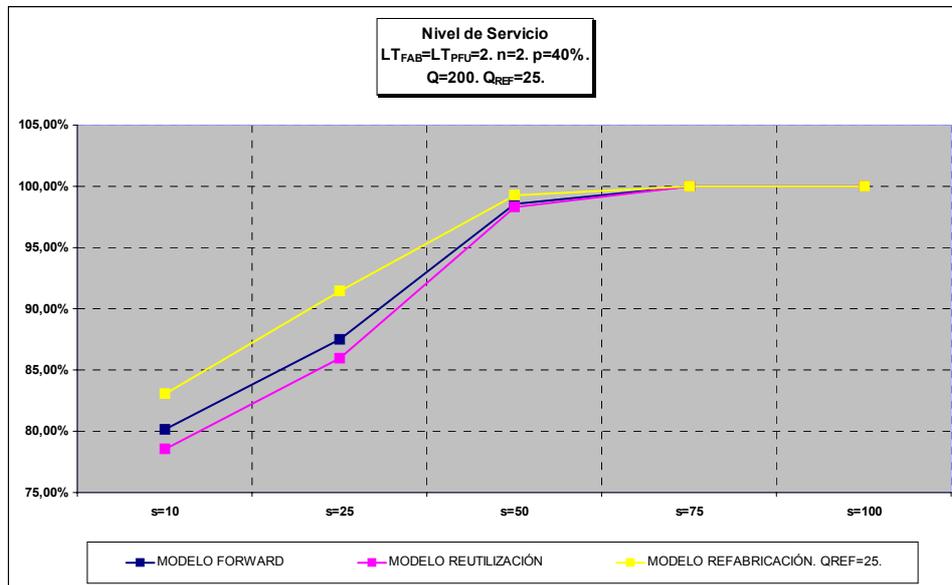


Gráfico 5.8: Comparación de Modelos. Nivel de Servicio.



Con esto finalizamos el análisis descriptivo de los resultados del ejercicio de simulación en cada uno de los modelos, y pasamos al siguiente capítulo en el que analizaremos entre sí los distintos modelos, utilizando para ello una estructura de costes de gestión de inventarios que nos permita comparar, de manera homogénea, los tres modelos de acuerdo con la estructura que hemos diseñado para cada uno de ellos.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO

- 6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.**
 - 6.1.1. Cambios en el tamaño del lote de originales (Q).**
 - 6.1.2. Cambios en los plazos de entrega.**
 - 6.1.2.1. De originales: LT_{FAB} .**
 - 6.1.2.2. De refabricados: LT_{PFU} .**
 - 6.1.2.3. De ambos simultáneamente.**
 - 6.1.3. Cambios en el tiempo de consumo (n).**
 - 6.1.4. Cambios en la tasa de recuperación de PFU (p).**
 - 6.1.5. Cambios en el coste de demanda insatisfecha (C_F).**
- 6.2. VARIACIONES EN EL MODELO.**
 - 6.2.1. El papel de las expectativas de retorno de PFU.**
 - 6.2.2. Demanda estacional.**

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

Análisis comparativo

6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.

En el análisis numérico que venimos realizando hemos considerado tres modelos diferentes para la gestión de inventarios (forward, reutilización y refabricación) cuyos aspectos más relevantes hemos descrito en el capítulo anterior. En este capítulo completaremos el trabajo con un análisis comparativo de las capacidades de cada uno de los modelos, y concretamente de los efectos de considerar la existencia de un flujo de retorno de PFU en estos modelos de gestión de stocks. Para ello, consideraremos una estructura de costes de gestión de stocks en cada uno de los modelos, de manera que podamos realizar este análisis en términos de costes, consiguiendo así una evaluación homogénea de las capacidades competitivas de los modelos propuestos. Para finalizar, presentaremos dos variaciones de los modelos que pretenden, por una parte, analizar el papel de las expectativas en el comportamiento de los modelos de gestión de inventarios con flujo de retorno y, por otra, considerar el carácter estacional que habitualmente presenta la demanda de cualquier producto comerciable.

Para el análisis comparativo de los modelos supondremos una estructura tradicional de costes de gestión de inventario, en la que se consideran costes de emisión de pedidos, costes de mantenimiento de inventarios, costes de adquisición de originales y de recuperación de PFU y costes derivados de la existencia de demanda insatisfecha. Para cada uno de los modelos formulados y en cada uno de los escenarios de análisis propuestos evaluaremos la función de costes totales por periodo.

La notación que emplearemos para la realización de este análisis de costes será la siguiente:

- C_O : Coste unitario de adquisición de productos originales.
- C_{PFU} : Coste unitario de recuperación de los PFU.
- $C_{P,FAB}$: Coste de emisión de un pedido de productos originales.
- $C_{P,REF}$: Coste de emisión de un pedido de productos refabricados.
- $C_{M,FAB}$: Coste unitario de mantenimiento de comerciables.
- $C_{M,PFU}$: Coste unitario de mantenimiento de PFU.
- C_F : Coste unitario de faltantes.

De esta forma la función de costes totales para cada uno de los modelos propuestos vendrá definida por las siguientes expresiones:

- 1) Modelo Forward:

$$CT = \frac{C_{P,FAB}}{P_{FAB,t}} + C_O O_t + C_{m,FAB} S_{FAB,t} + C_F F_t \quad (6.1)$$

- 2) Modelo Reutilización:

$$CT = \frac{C_{P,FAB}}{P_{FAB,t}} + C_O O_t + C_{PFU} PFU_t + C_{m,FAB} S_{FAB,t} + C_F F_t \quad (6.2)$$

3) Modelo Refabricación:

$$CT = \frac{C_{P,FAB}}{P_{FAB,t}} + \frac{C_{P,REF}}{P_{REF,t}} + C_o O_t + C_{PFU} PFU_t + C_{m,FAB} S_{FAB,t} + C_{m,PFU} S_{PFU,t} + C_F F_t \quad (6.3)$$

Supondremos los siguientes valores para estos conceptos:

Tabla 6.1: Costes de gestión de inventarios por periodo.

C_o	20 u.m./unidad
C_{PFU}	15 u.m./unidad
C_{m,FAB}	0,8 u.m./unidad
C_{m,PFU}	0,4 u.m./unidad
C_F	{4, 8, 16, 32} u.m./unidad
C_{P,FAB}	10 u.m./pedido
C_{P,REF}	5 u.m./pedido

Los resultados que obtengamos de este ejercicio de simulación de costes sólo son vinculantes para la estructura de costes que vamos a considerar aunque, en cualquier caso, intentaremos justificar suficientemente los parámetros elegidos para cada uno de los costes de gestión de inventario.

Parece razonable suponer que el coste de adquisición de los PFU (C_{PFU}) sea inferior al de adquisición de los originales (C_o), puesto que éstos son directamente comerciables, es decir, incorporan un valor añadido superior al de los PFU que les permite satisfacer directamente las necesidades de los consumidores, mientras que los PFU aún requieren la realización de una serie de actividades que les confieran dicha categoría. En cualquier caso, hemos decidido que el coste de adquisición de PFU

represente un porcentaje significativo (75%) del valor de adquisición de los productos originales, aun cuando este valor pueda ser fácilmente discutible.

En cuanto al coste de emisión de pedidos ($C_{P,FAB}$ y $C_{P,REF}$) suponemos que los productos originales se adquieren a terceros ajenos a la empresa, mientras que los pedidos de productos refabricados tienen un carácter interno a la organización. Esta diferenciación nos permitirá justificar un mayor coste de pedido en los productos originales ($C_{P,FAB}$) en relación con los pedidos de productos refabricados ($C_{P,REF}$) ya que los primeros podemos suponer que requieren el cumplimiento de una serie de trámites administrativos más elaborados al tratarse de una relación con un tercero ajeno a la organización.

Para el coste generado por la demanda insatisfecha, hemos asumido el marco de trabajo empleado por Mahadevan, Pyke y Fleischmann (2002) y que permite observar la relación existente entre el coste de mantenimiento de los inventarios y el coste de carencia o de demanda insatisfecha. Estos autores proponen un modelo de revisión periódica para un sistema de inventarios en el que se suponen actividades de fabricación y refabricación. Como referencia emplean el ejemplo de una empresa de fabricación de grúas de rescate y de carga para helicópteros, la construcción o la industria maderera, entre otras aplicaciones. Para examinar la relación entre coste de mantenimiento y coste de carencia, estos autores proponen un coste de demanda insatisfecha (C_b) proporcional al coste de mantenimiento de comerciables (C_{hs}), en concreto $C_b = j * C_{hs}$; $j = 5, 7; 10; 20; 50$. (Mahadevan, et al. 2002, 7). En nuestro caso, mantenemos la misma estructura para $j = 5, 10, 20, 40$.

En cuanto a que el coste de mantenimiento de comerciables ($C_{M,FAB}$) sea superior al de los PFU ($C_{M,PFU}$) podemos justificarlo por el mayor valor añadido que suponemos incorporan los productos comerciables, es decir, en disposición de venta. El

mantenimiento de estos productos puede requerir un mayor número de actividades o el empleo de más recursos durante la etapa de almacenamiento (y por tanto costes de mantenimiento superiores al de los PFU), de manera que no se deteriore su característica de comerciable. Mahadevan, et al. (2002) emplean los mismos valores para los costes de mantenimiento en el citado trabajo y suponen que el coste de refabricación es inferior al de fabricación (adquisición) de originales, tal y como proponemos en nuestro análisis ($C_{PFU} > C_O$), de manera que existan incentivos para la refabricación.

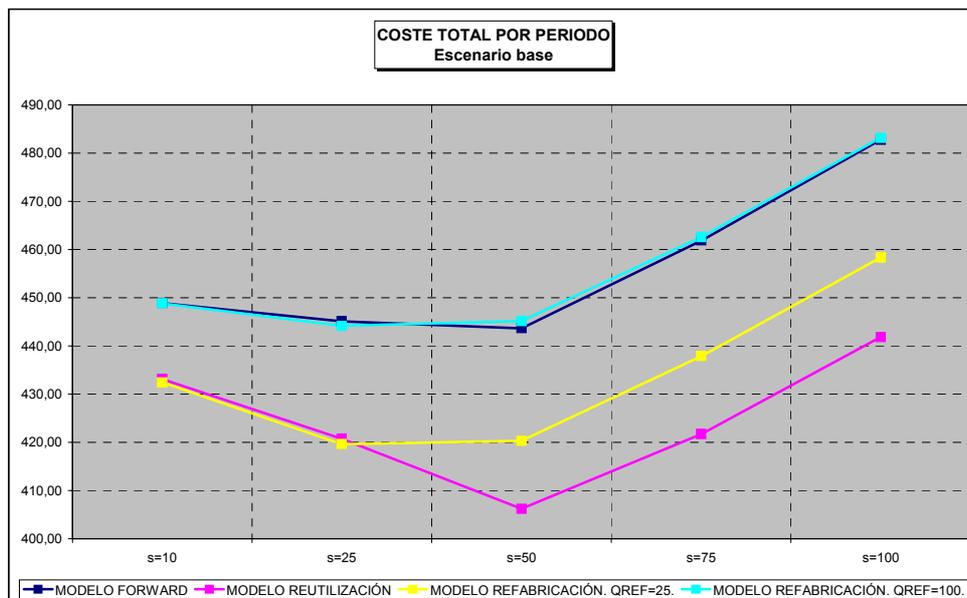
Para la presentación de los resultados de este análisis conjunto emplearemos un esquema similar al del Capítulo V, y así, partiendo de un escenario base analizaremos las variaciones en la función de costes totales de los distintos modelos ante modificaciones en los parámetros del escenario base. Los tres modelos de inventario considerados (forward, reutilización y refabricación) se ampliarán por el desdoblamiento del Modelo Refabricación en dos, uno para cada tamaño del lote de refabricación. De esta forma analizaremos la función de costes totales en cuatro modelos de gestión de inventarios: forward, reutilización, refabricación con $Q_{REF}=25$ y refabricación con $Q_{REF}=100$. La forma de presentar los resultados difiere un poco de la empleada en el capítulo anterior, ya que no pretendemos fijarnos en cómo afectan a cada modelo las variaciones paramétricas, sino que centraremos nuestra atención en analizar qué modelo es más competitivo, en términos de costes de gestión de stocks, ante los diferentes escenarios que se obtienen variando las condiciones iniciales del escenario base.

Tabla 6.2: Escenario base

Escenario Base	
Tamaño lote originales (Q)	100
Plazo de entrega originales (LT_{FAB})	2 periodos
Plazo de entrega refabricados (LT_{PFU})	2 periodos
Tasa de retorno de PFU (p)	40%
Tiempo de consumo (n)	2 periodos
Coste de faltantes (C_F)	4 u.m./unidad/periodo

Para el escenario base que hemos definido, la estructura de costes de los modelos de gestión de inventarios es la siguiente:

Gráfico 6.1: Escenario base. Costes de gestión de stocks.



Observamos una estructura de costes más competitiva de los modelos que incorporan la función inversa de la logística frente al modelo forward, en este escenario base, lo cual pensamos que es un buen indicador acerca de la posibilidad de obtener ventajas competitivas a través de la recuperación económica de los productos fuera de uso.

6.1.1. Cambios en el tamaño del lote de originales (Q).

Supondremos una variación en el tamaño del lote de originales (Q) y analizaremos la estructura de costes resultante:

Gráfico 6.1.1.a: Estructura de costes. Q=200.

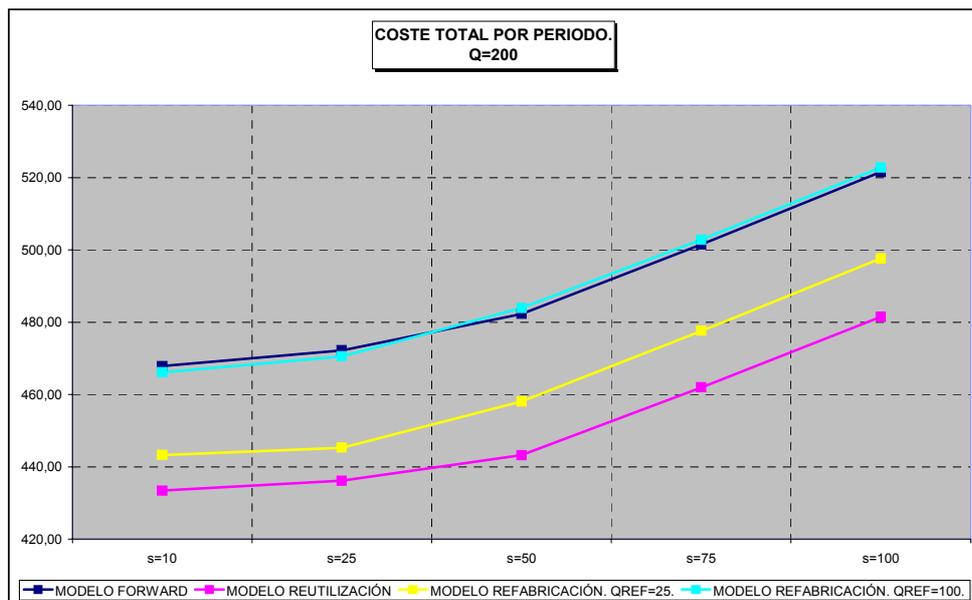
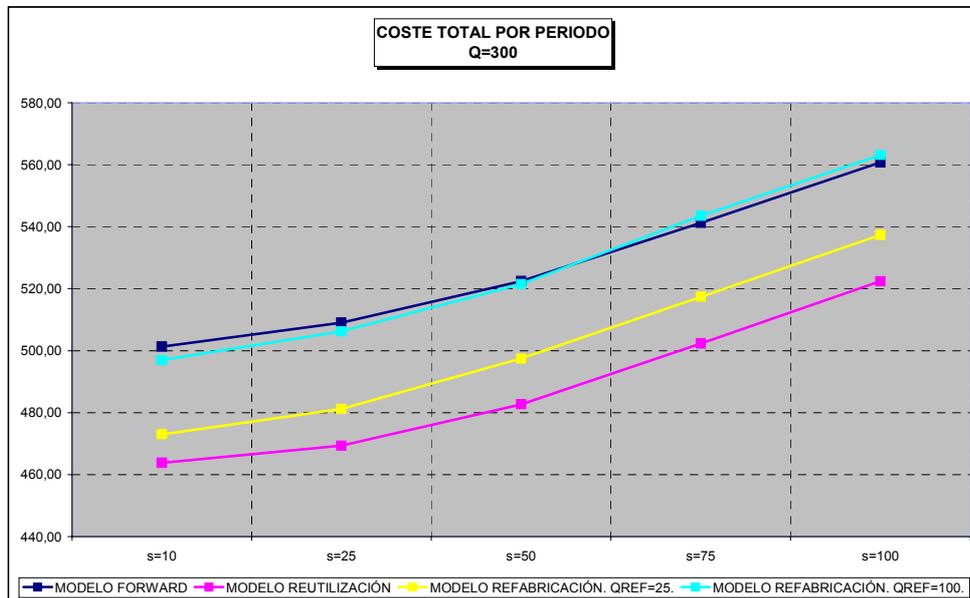


Gráfico 6.1.1.b: Estructura de costes. Q=300.



Observamos que para el escenario considerado, la existencia de un flujo de retorno de PFU en el modelo genera una ventaja en costes de gestión de stocks, independientemente del tamaño del lote de originales (Q).

6.1.2. Cambios en los plazos de entrega.

6.1.2.1. De originales: LT_{FAB} .

Ante un incremento en el plazo de entrega de los pedidos de productos originales, la estructura de costes de los modelos tiene el siguiente comportamiento para cada tamaño del lote de originales $Q=\{100, 200, 300\}$.

Gráfico 6.1.2.1.a: Variación LT_{FAB} . $Q=100$.

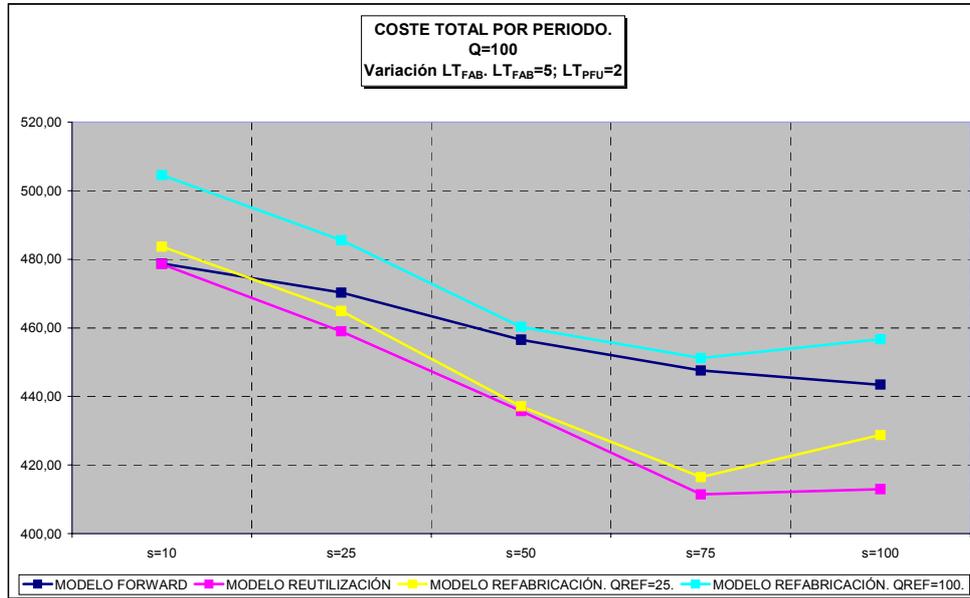


Gráfico 6.1.2.1.b: Variación LT_{FAB} . $Q=200$.

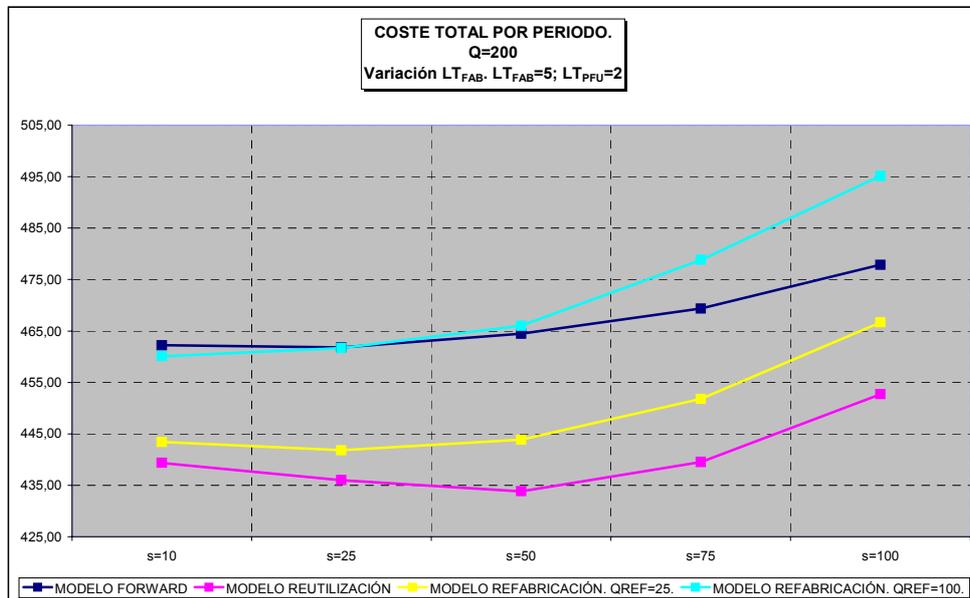
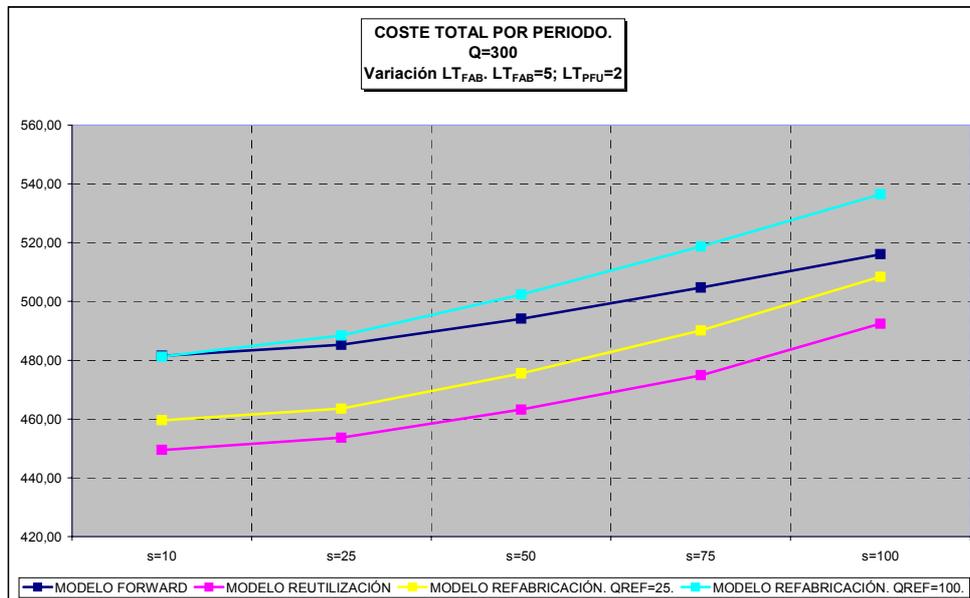


Gráfico 6.1.2.1.c: Variación LT_{FAB} . $Q=300$.



El análisis revela una posición ventajosa en costes de los modelos reutilización y refabricación ($Q_{REF}=25$), especialmente en escalas reducidas. A medida que se incrementa Q la función de costes aumenta hacia valores del modelo forward. En cuanto al modelo refabricación ($Q_{REF}=100$) podemos interpretar que este modelo presenta una rigidez importante, consecuencia de un tamaño del lote de refabricación elevado, que le limita bastante a la hora de aprovechar el retorno de PFU e incorporarlo con mayor frecuencia al stock de comerciables. La inmovilización de estas unidades retornadas pero no refabricadas hace que este modelo sea menos competitivo, en términos de coste, que el modelo forward, para determinadas escalas.

6.1.2.2. De refabricados: LT_{PFU} .

Un incremento en el plazo de entrega de los pedidos de refabricación genera la siguiente estructura de costes:

Gráfico 6.1.2.2.a: Variación LT_{PFU} . $Q=100$.

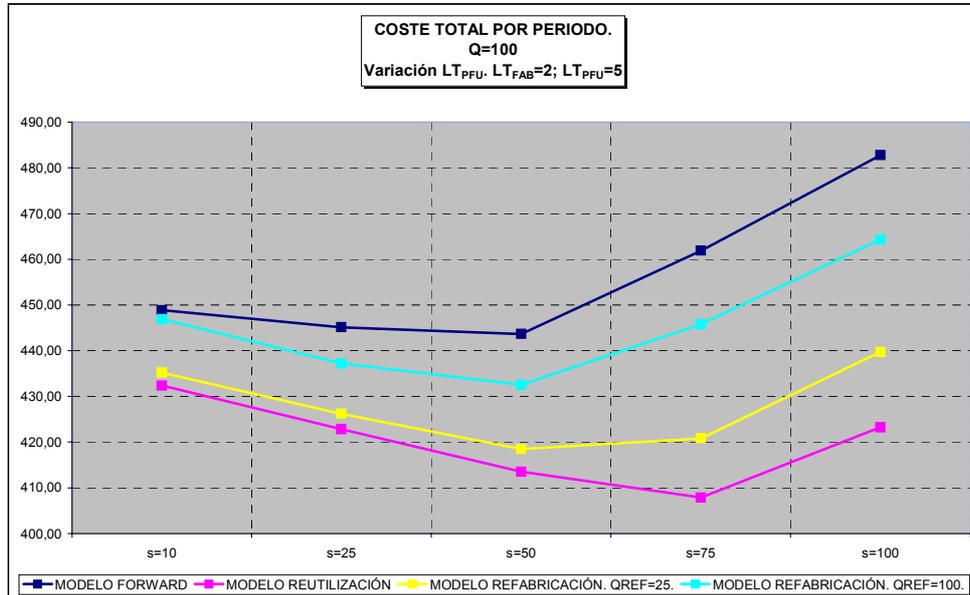


Gráfico 6.1.2.2.b: Variación LT_{PFU} . $Q=200$.

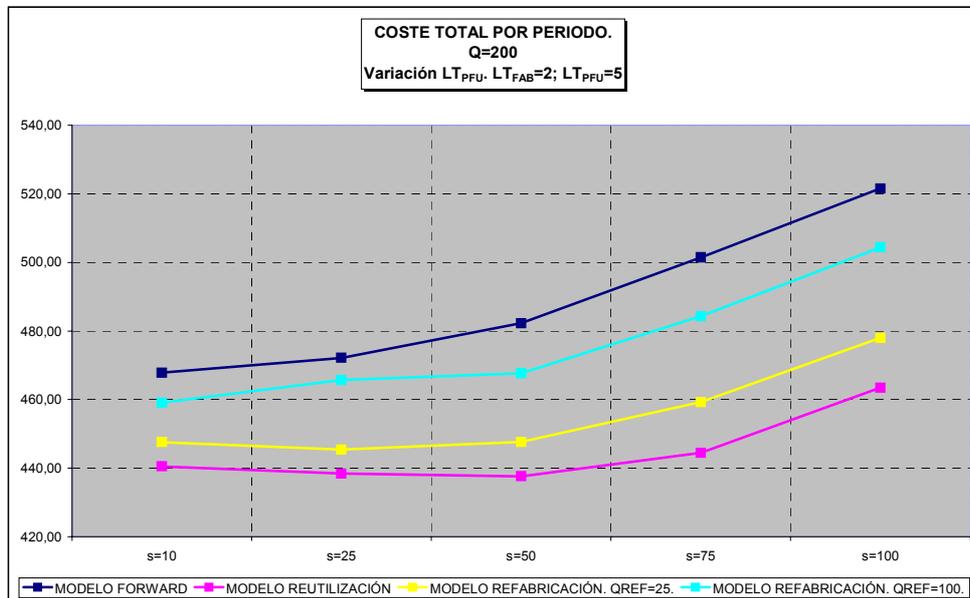
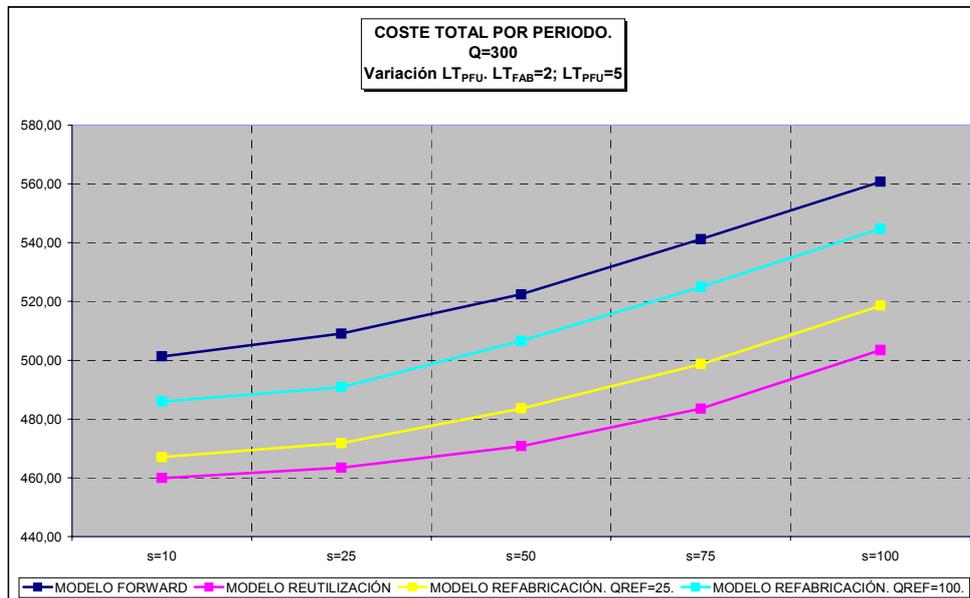


Gráfico 6.1.2.2.c: Variación LT_{PFU} . $Q=300$.



Observamos que el aumento del plazo de entrega de productos refabricados permite al modelo refabricación ($Q_{REF}=100$) aprovechar las oportunidades del flujo de retorno y generar ventajas, en términos de coste, frente al modelo forward.

6.1.2.3. De ambos simultáneamente.

Ante un incremento simultáneo en el plazo de entrega de los pedidos, tanto de originales como de refabricados, presentamos los siguientes resultados:

Gráfico 6.1.2.3.a: Variación LT. Q=100.

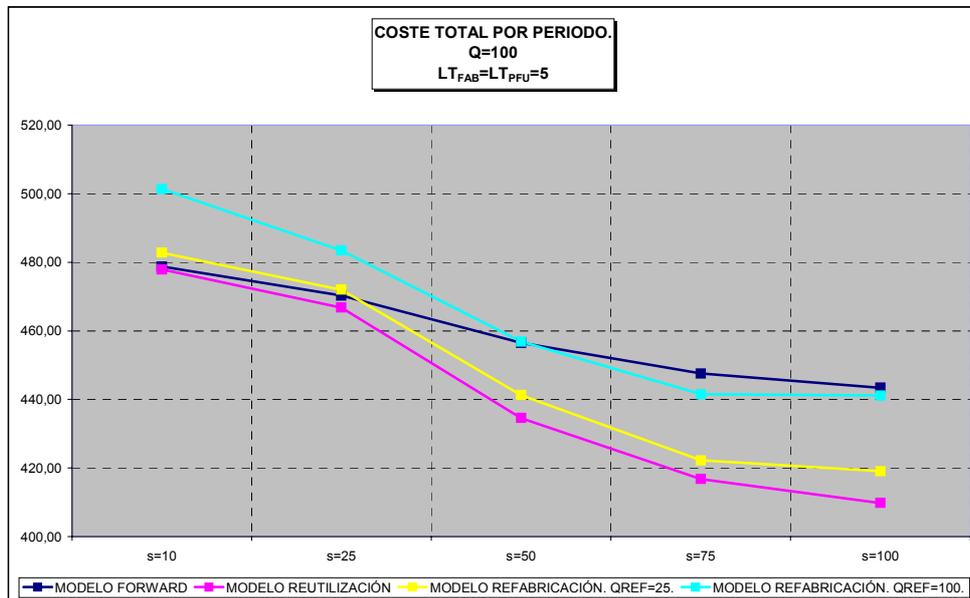


Gráfico 6.1.2.3.b: Variación LT. Q=200.

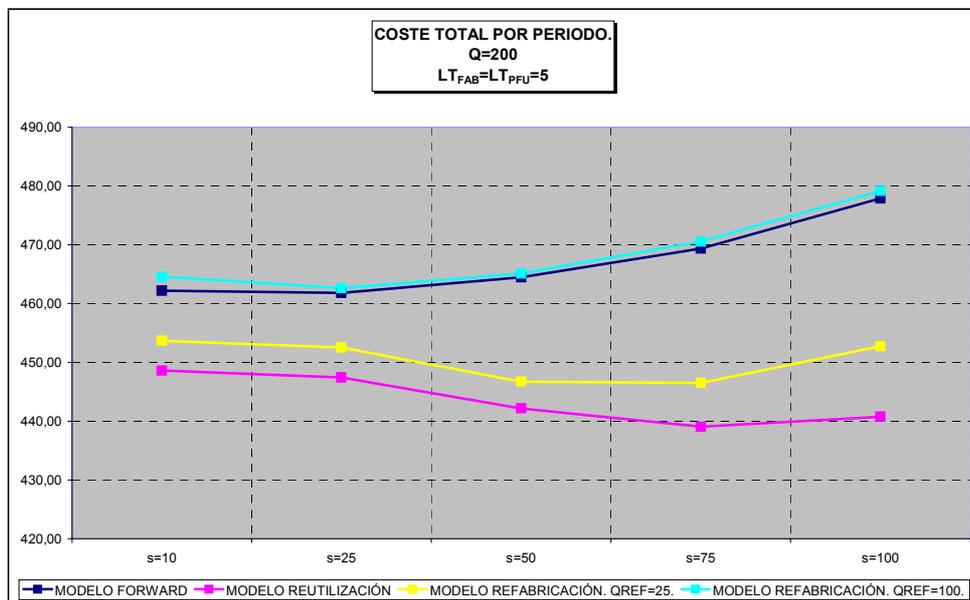
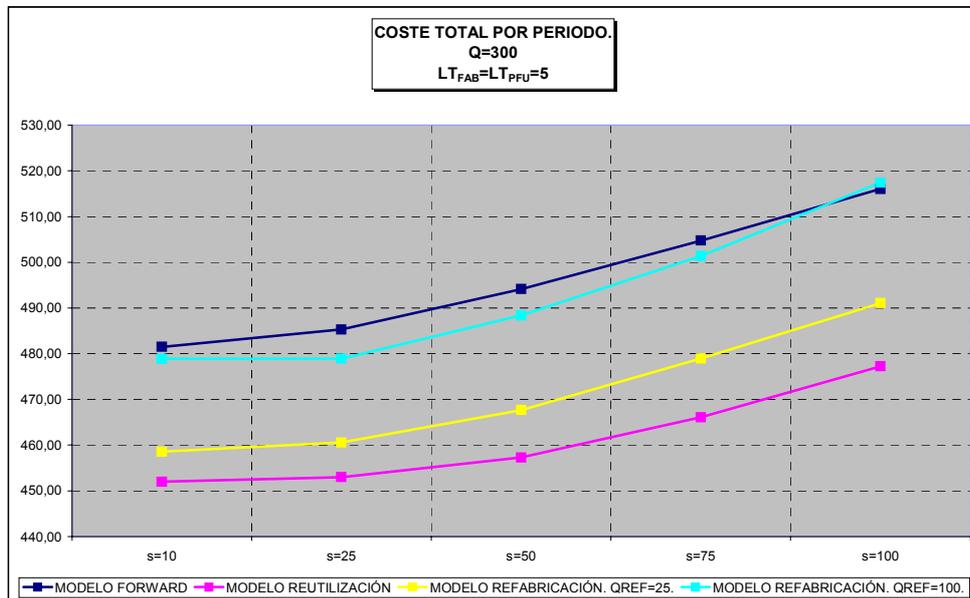


Gráfico 6.1.2.3.c: Variación LT. Q=300.



Detectamos ciertas rigideces en los modelos que incorporan la función inversa de la logística en escalas reducidas del modelo, las cuales van desapareciendo a medida que se aumenta la escala de los mismos, llegándose finalmente a una situación de ventaja comparativa de los modelos con flujo de retorno sobre el modelo forward. Consideramos que un incremento en los plazos de entrega provocan ciertas rigideces en los modelos con flujo de retorno que requieren el empleo de una escala mayor (s , Q) para aprovechar el efecto de los productos retornados.

6.1.3. Cambios en el tiempo de consumo (n).

Realizaremos el análisis de los costes de gestión de stocks en cada modelo de acuerdo con el tamaño del lote de originales, de manera que podamos estudiar el efecto producido sobre la escala (s , Q) empleada.

Gráfico 6.1.3.a: Variación n=4. Q=100

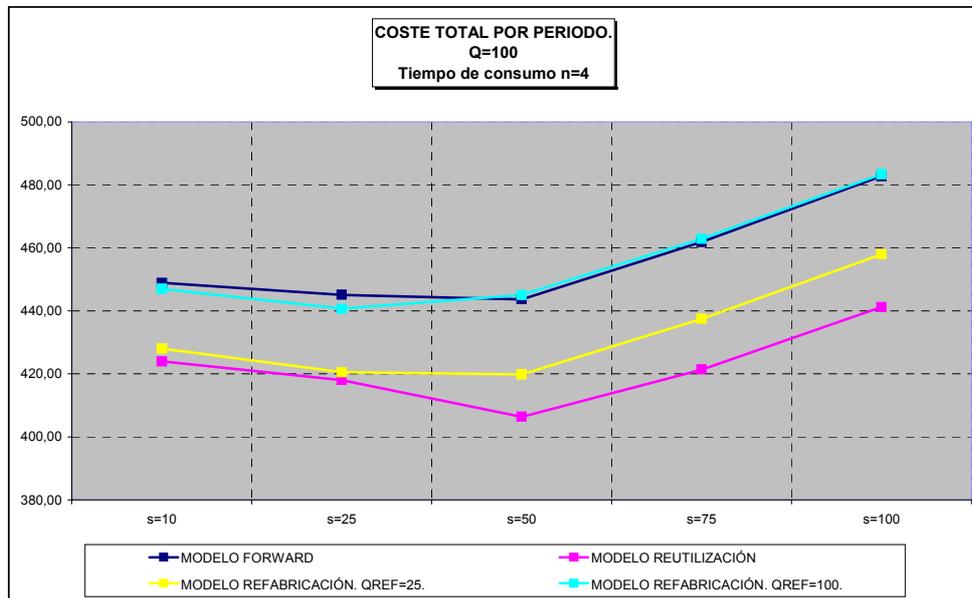


Gráfico 6.1.3.b: Variación n=4. Q=200

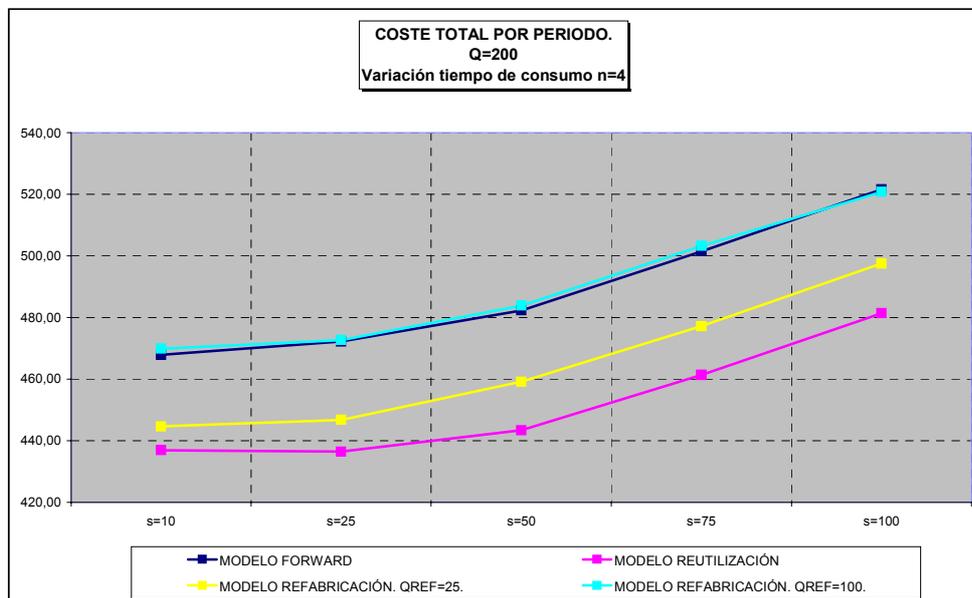


Gráfico 6.1.3.c: Variación n=4. Q=300

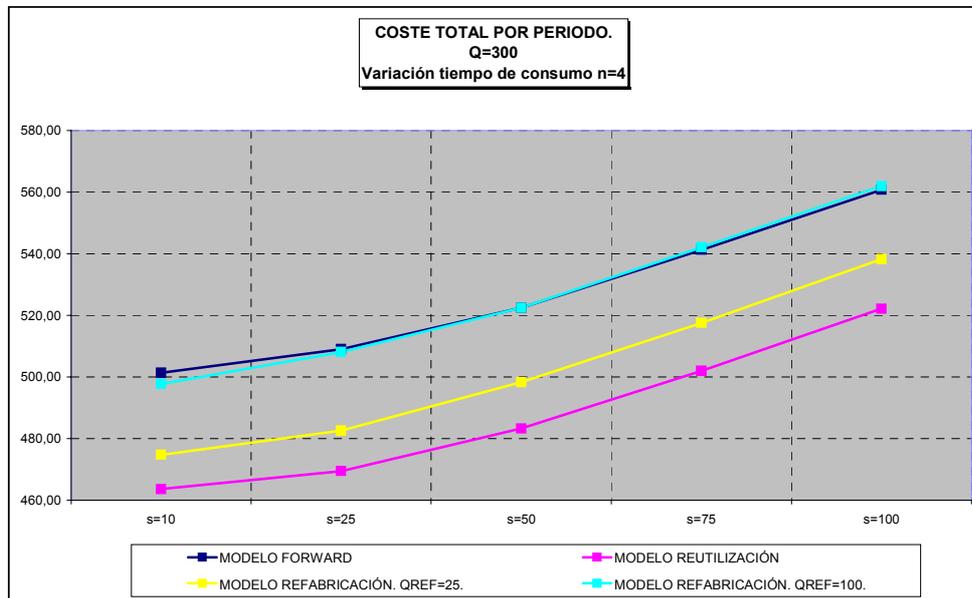


Gráfico 6.1.3.d: Variación n=8. Q=100

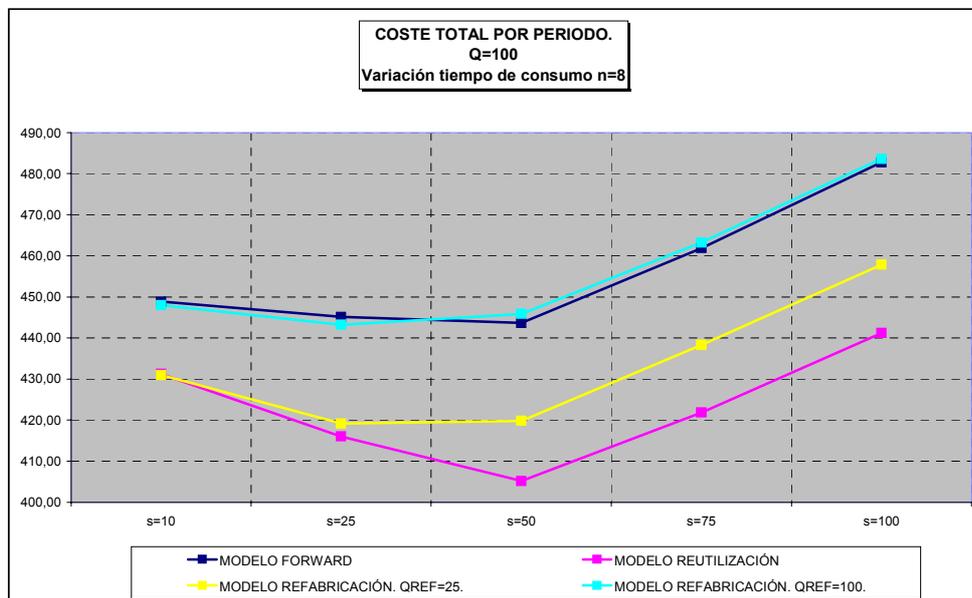


Gráfico 6.1.3.e: Variación n=8. Q=200

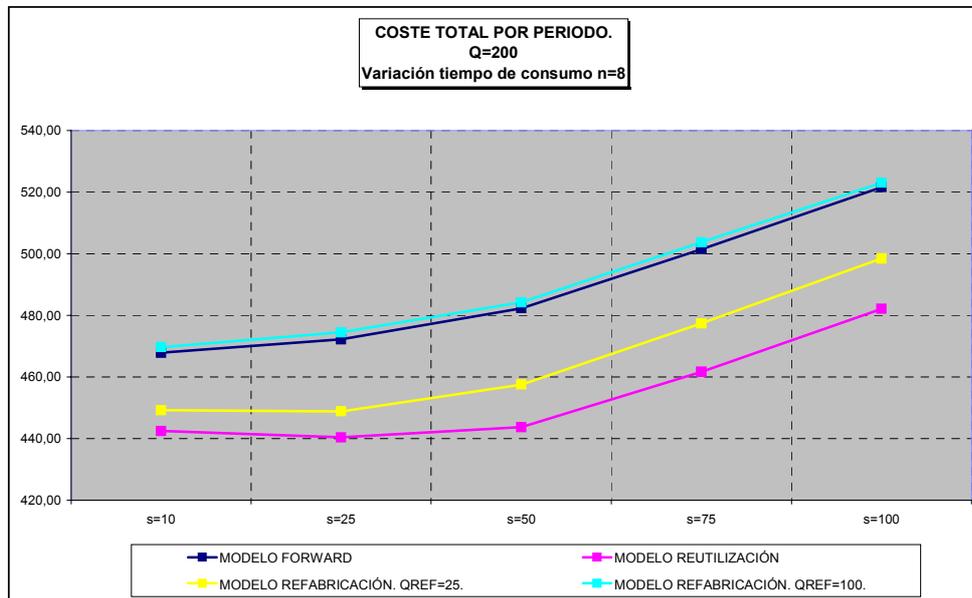
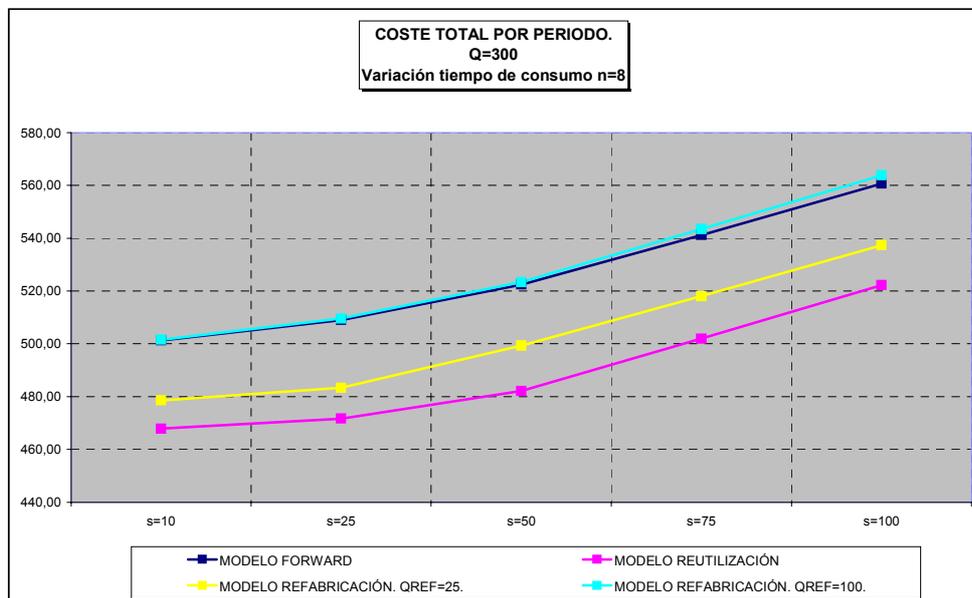


Gráfico 6.1.3.f: Variación n=8. Q=300



Podemos observar que la variación en el tiempo de consumo de los productos no modifica esencialmente la ventaja que, en términos de costes de inventarios y para esta simulación, presentan los modelos que incorporan la posibilidad de recuperar económicamente los PFU.

6.1.4. Cambios en la tasa de recuperación de PFU (p).

Analizaremos los efectos de un cambio en el escenario de recuperación de PFU, suponiendo en primer lugar un escenario optimista de recuperación ($p=80\%$) y posteriormente un escenario pesimista para el que hemos definido $p=20\%$.

Gráfico 6.1.4.a: Escenario optimista. $Q=100$.

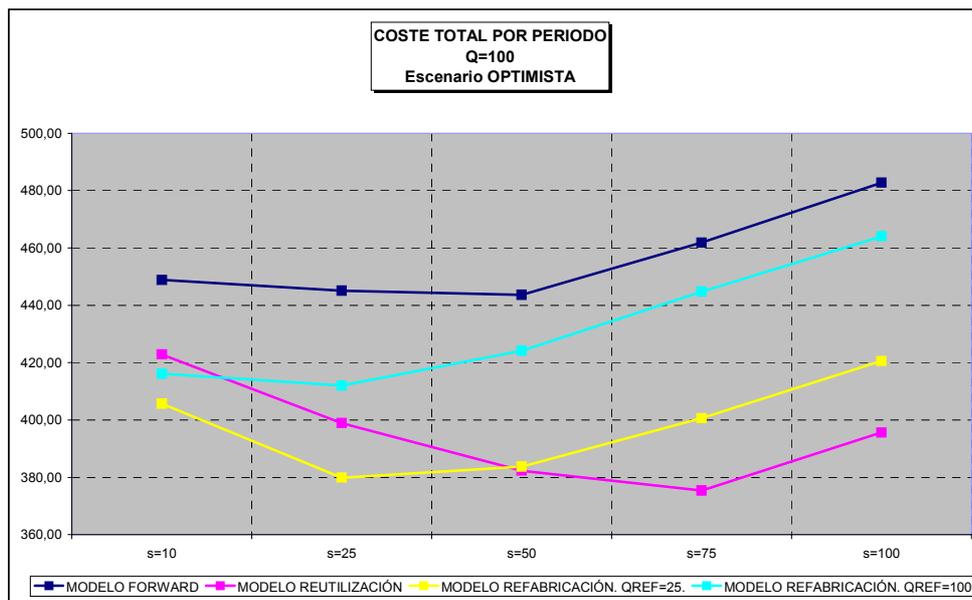


Gráfico 6.1.4.b: Escenario optimista. Q=200.

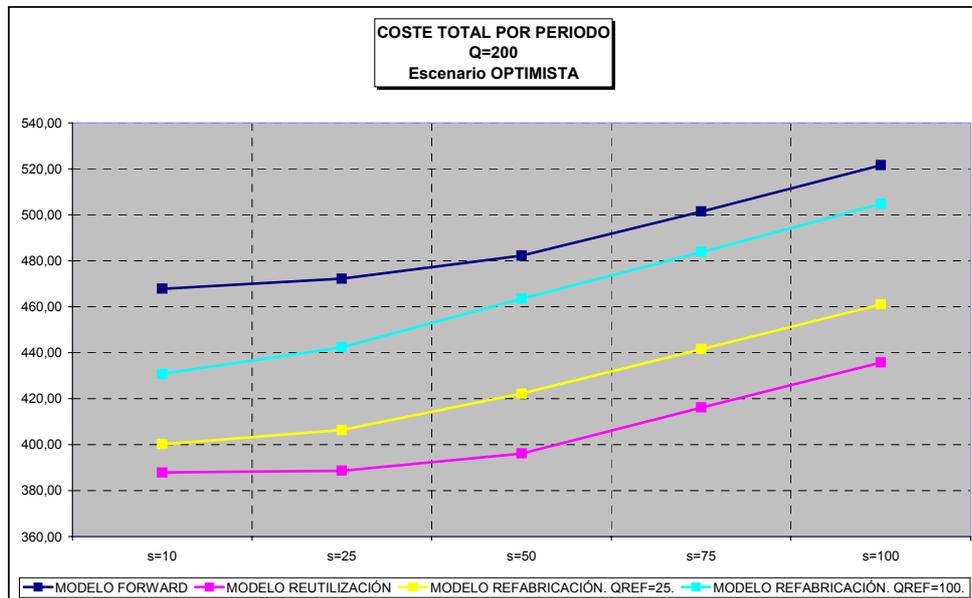


Gráfico 6.1.4.c: Escenario optimista. Q=300.

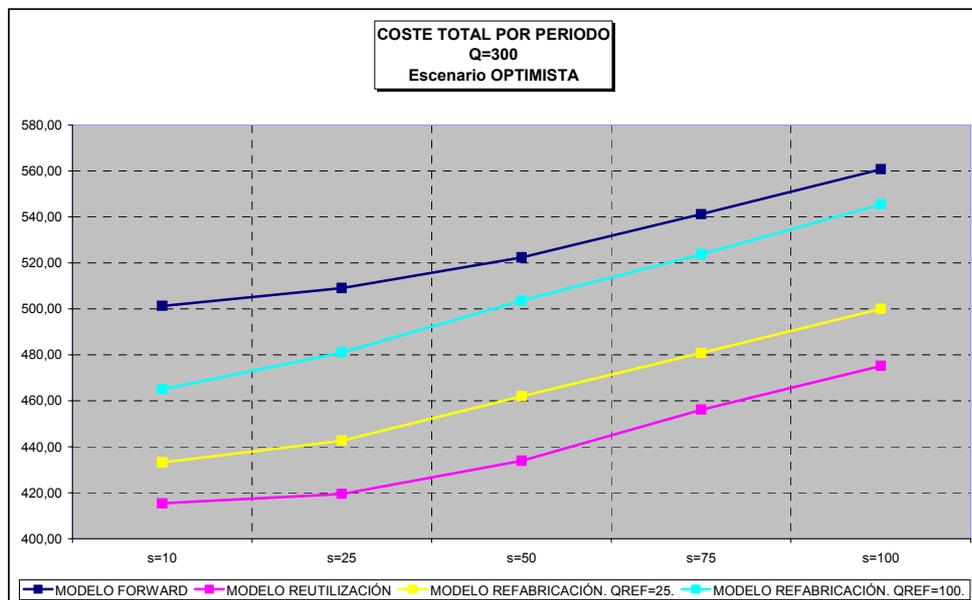


Gráfico 6.1.4.d: Escenario pesimista. Q=100.

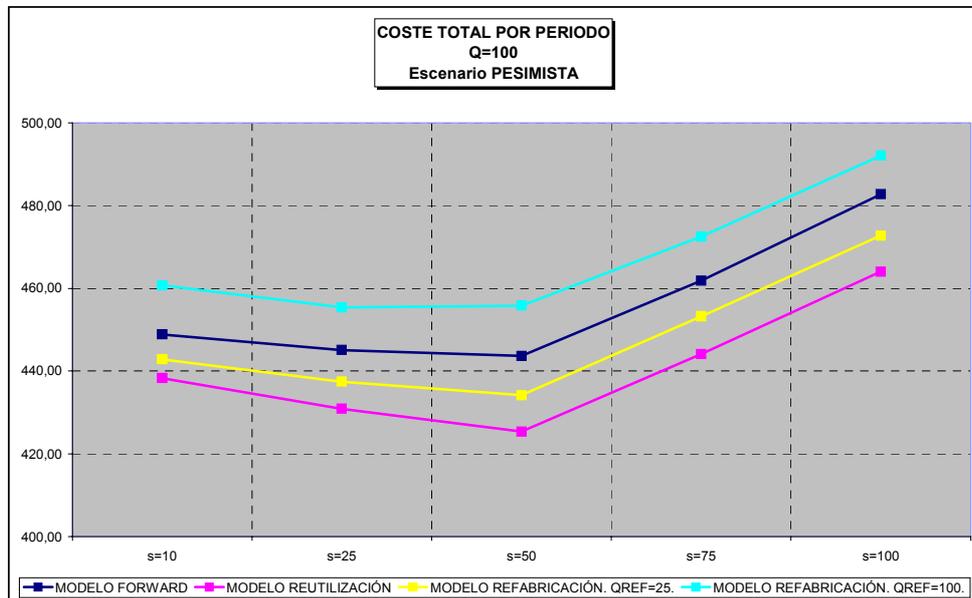


Gráfico 6.1.4.e: Escenario pesimista. Q=200.

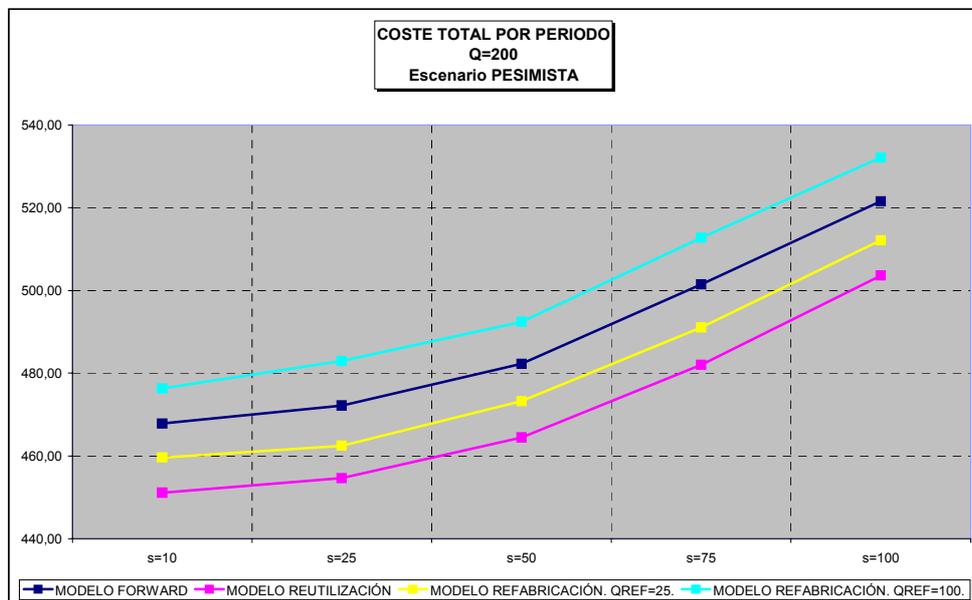
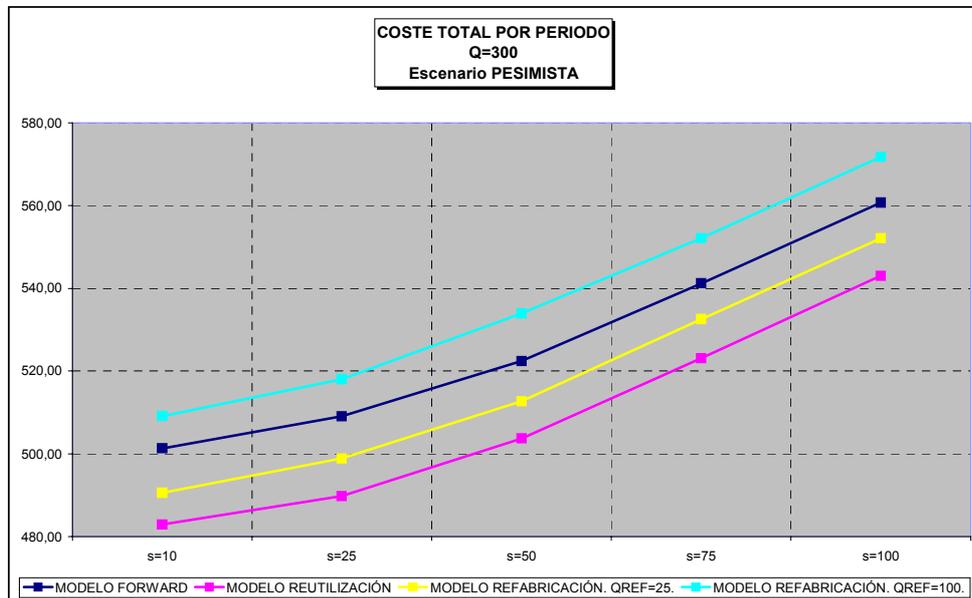


Gráfico 6.1.4.f: Escenario pesimista. Q=300.



Como cabría esperar, en el escenario optimista la ventaja competitiva en costes de gestión de stocks de los modelos con flujo de retorno se acentúa con respecto a escenarios con tasas de recuperación más modestas, especialmente a medida que la escala del modelo, (s, Q), aumenta y por tanto el número de faltantes disminuye, de manera que la dinámica del flujo de retorno puede desarrollar toda su capacidad sobre el inventario de comerciables. Para esta tasa de retorno de PFU ($p=80\%$) todos los modelos de logística inversa son preferibles, desde este punto de vista, al tradicional modelo forward. En cuanto a un escenario pesimista de recuperación de PFU, los modelos menos rígidos de logística inversa siguen presentando ventajas evidentes en términos de coste sobre el modelo sin flujo de retorno, por lo que podríamos aventurar que incluso en situaciones de escaso volumen de retorno podrían generarse oportunidades competitivas para este tipo de sistemas de logística inversa.

6.1.5. Cambios en el coste de demanda insatisfecha (C_F).

A continuación presentamos los resultados de modificar el coste que supone no atender todas las peticiones de la demanda en el momento en que se producen, demorando su entrega hasta que el inventario de comerciables recupere el nivel que permita atender esas unidades no satisfechas. Para la realización de este análisis utilizaremos el conjunto definido en la Tabla 6.1 para este coste de demanda insatisfecha, evaluando cada modelo para cada uno de los tamaños de originales que estamos considerando.

Gráfico 6.1.5.a: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=100$.

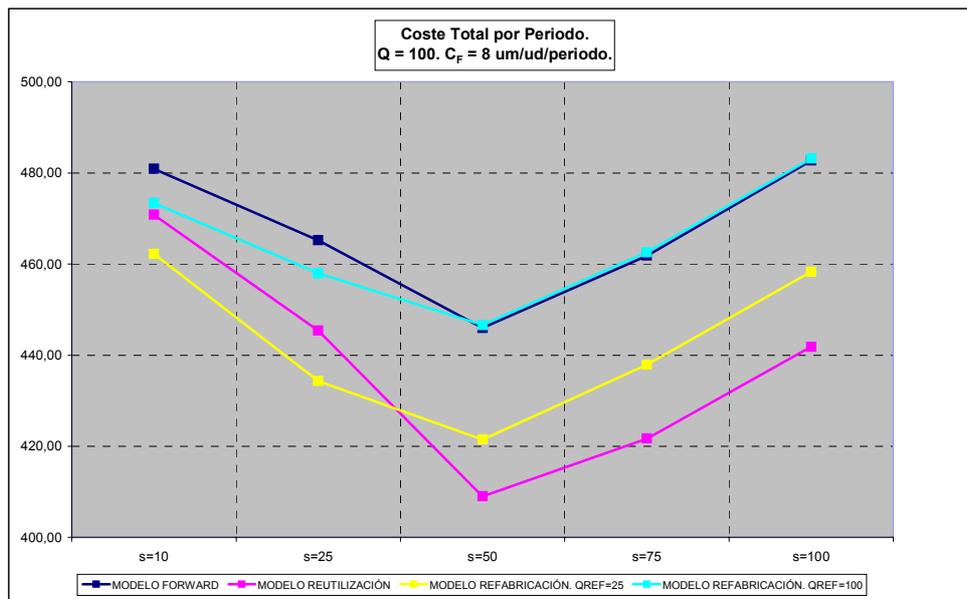


Gráfico 6.1.5.b: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=200$.

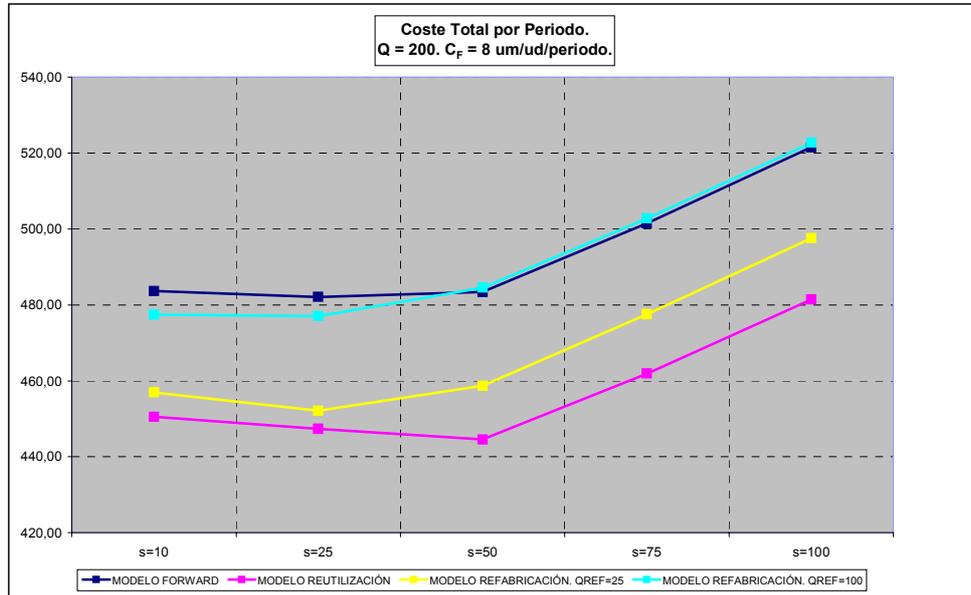


Gráfico 6.1.5.c: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=300$.

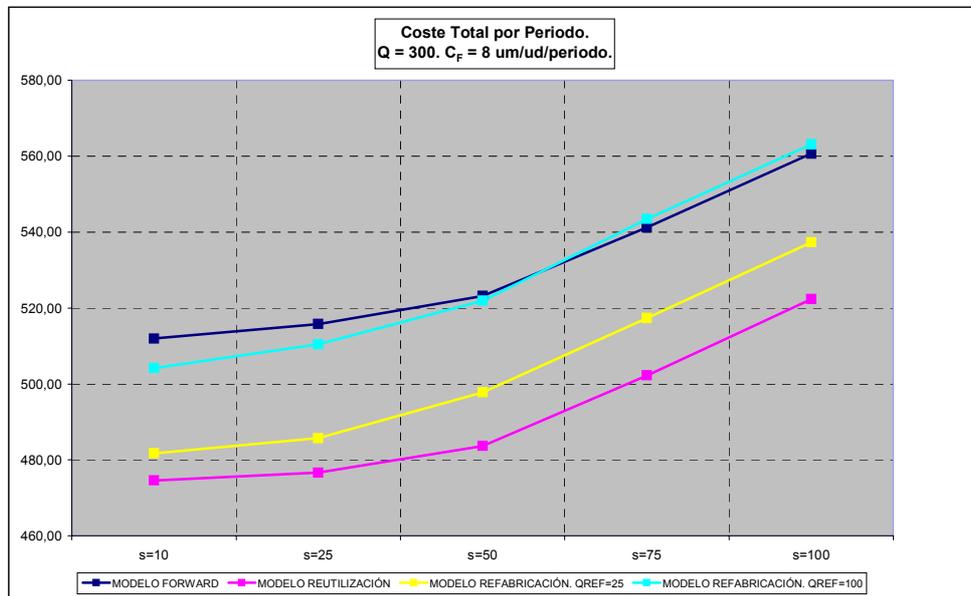


Gráfico 6.1.5.d: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=100$.

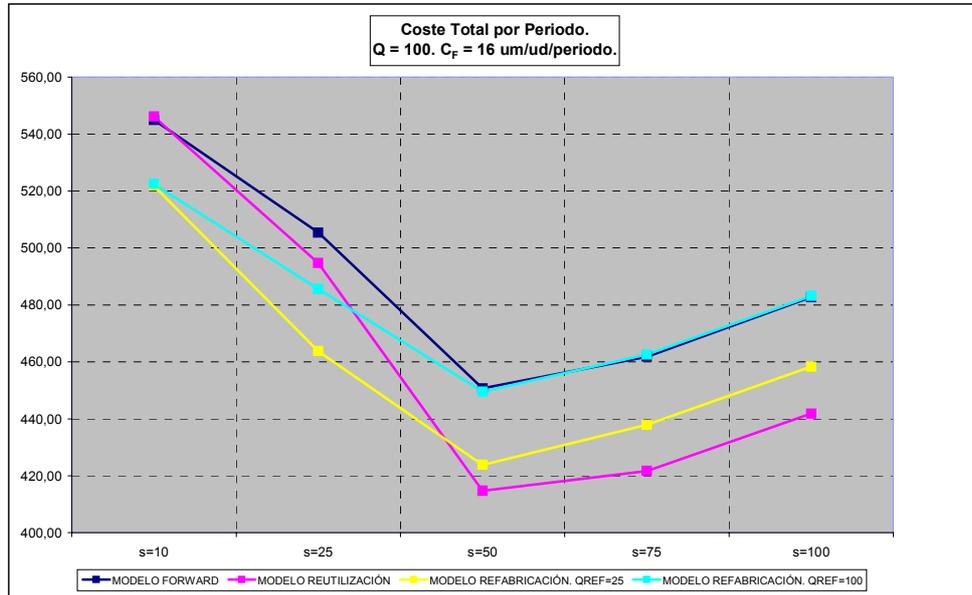


Gráfico 6.1.5.e: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=200$.

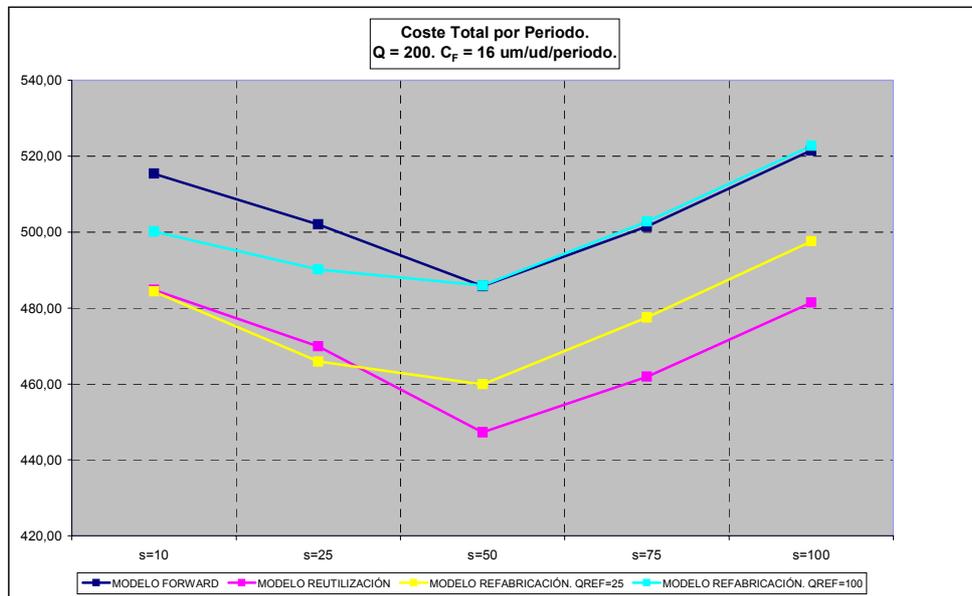


Gráfico 6.1.5.f: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=300$.

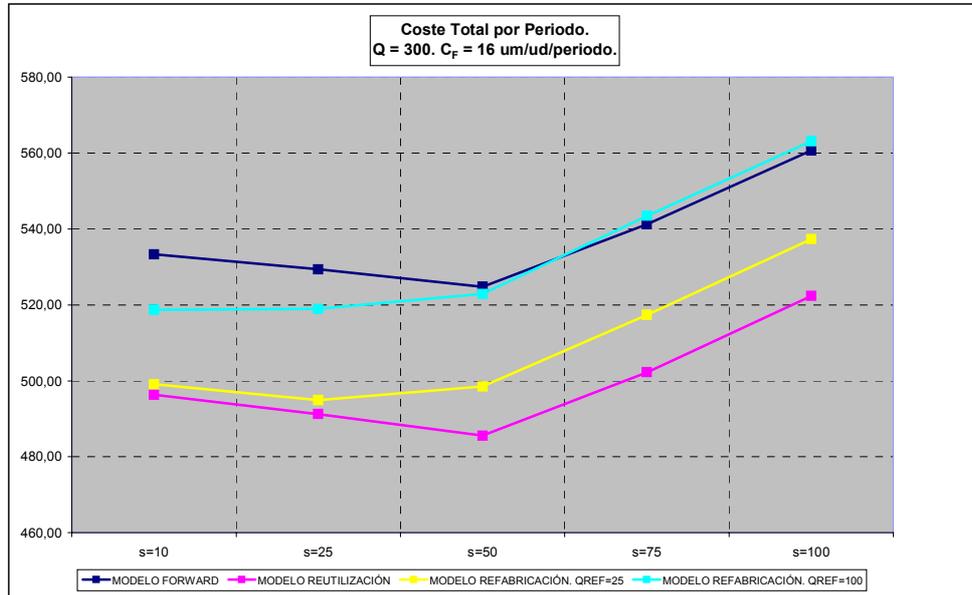


Gráfico 6.1.5.g: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=100$.

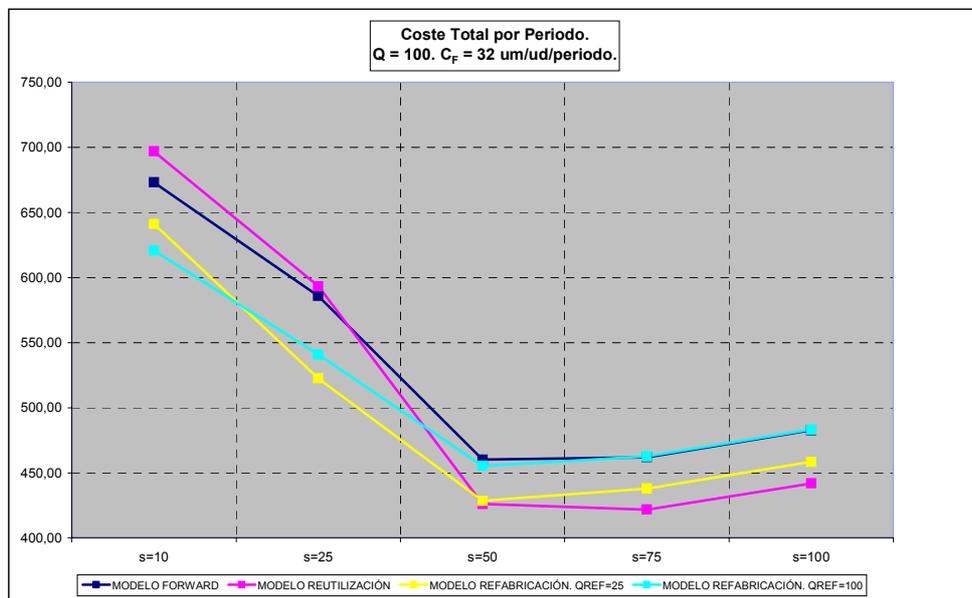


Gráfico 6.1.5.h: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=200$.

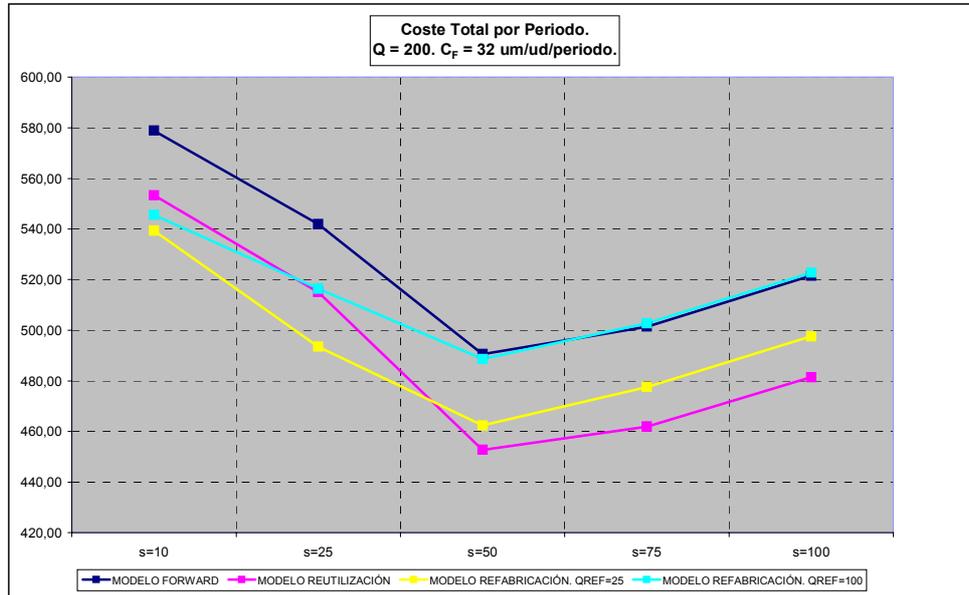
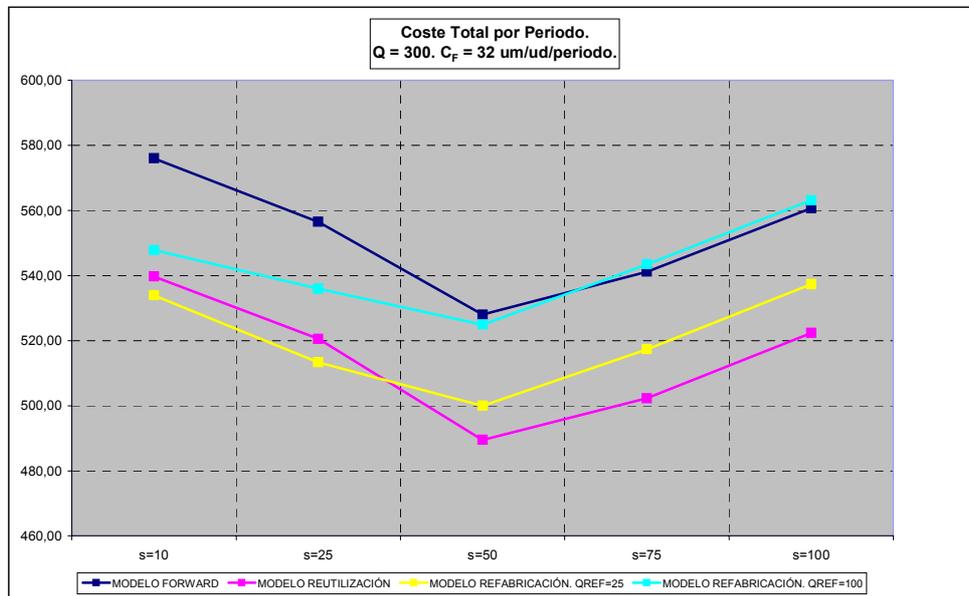


Gráfico 6.1.5.i: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=300$.



Analizando las escalas más reducidas de los modelos (ya que es donde se generan los faltantes) observamos que el incremento de la penalización por la existencia de demanda insatisfecha no merma la capacidad competitiva de los modelos de logística inversa frente al modelo forward, y sólo en una de las posibles combinaciones de escala ($s=10$, $Q=100$), siendo $C_F=32$, el modelo reutilización presenta un valor del coste de gestión de inventarios por periodo superior al del modelo forward (Gráfico 6.1.5.g). Es interesante señalar también que el modelo a priori más rígido (Modelo Refabricación $Q_{REF}=100$) presenta un comportamiento favorable, en términos de coste, respecto al modelo forward en las escalas del modelo en las que se generan situaciones de demanda insatisfecha.

Un análisis de las mejores políticas ensayadas con y sin flujo de retorno de PFU, a través de la escala (s , Q) utilizada, permite observar que el Modelo Reutilización consigue posiciones ventajosas, en términos de costes de gestión de inventario, con respecto al resto de modelos considerados. Comparando este Modelo Reutilización con el Modelo Forward, observamos que las políticas (s , Q) que generan resultados más favorables son, generalmente, comunes en ambos modelos tal y como aparece reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 6.3: Políticas (s , Q) más favorables.

	Modelo Forward		Modelo Reutilización		
			<i>Pesimista</i>	<i>Normal</i>	<i>Optimista</i>
$LT_{FAB}=2$	(50, 100)	$LT_{PFU}=2$	(50, 100)	(50, 100)	(75, 100)
		$LT_{PFU}=5$	(50, 100)	(75, 100)	(100, 100)
$LT_{FAB}=5$	(100, 100)	$LT_{PFU}=2$	(100, 100)	(75, 100)	(75, 100)
		$LT_{PFU}=5$	(100, 100)	(100, 100)	(100, 100)

Comprobamos que cuando el tiempo de entrega de los pedidos de originales (LT_{FAB}) es igual a dos periodos, la política (s, Q) más favorable se sitúa en el nivel $(50, 100)$, aunque a medida que aumenta la tasa de retorno de PFU, el punto de pedido también se incrementa. Un incremento en el plazo de entrega de los pedidos de originales hasta los cinco periodos, requiere aumentar el punto de pedido hasta las 100 unidades, para de esta forma poder satisfacer la demanda media durante ese periodo de aprovisionamiento y evitar incurrir en faltantes, con lo que las políticas más favorables se sitúan en la escala $(100, 100)$, si bien al incrementar la tasa de retorno de PFU, parece permitir una ligera disminución en el valor de s .

Como resumen de este apartado debemos indicar que, para el escenario paramétrico que hemos dibujado, se constata una ventaja comparativa en costes de aquellos modelos que incorporan la función inversa de la logística frente al modelo que no lo hace. Cierto es que, a partir de los resultados obtenidos, no podemos inferir resultados concluyentes para cualquier situación que pudiera presentarse, pero también es cierto que la metodología empleada en este ejercicio permite, sin excesiva dificultad, replicar cualquier conjunto paramétrico que refleje más fielmente la realidad de un sistema logístico en particular, de manera que esta metodología se convertiría en un eficaz sistema de apoyo al proceso de toma de decisiones en la empresa.

Naturalmente, no hemos expuesto todos los resultados que se obtienen en el ejercicio de simulación dinámica ya que entonces, esta tesis podría convertirse en una agrupación de tablas, gráficos y figuras poco coherente y, seguramente, sin demasiado interés. Nuestro objetivo era desarrollar una metodología sencilla que nos mostrara las capacidades existentes en los sistemas de logística inversa a través del análisis de una de las funciones más afectadas por la existencia de un flujo de retorno de PFU: la gestión de inventarios.

6.2. VARIACIONES EN EL MODELO.

Llegados a este punto pensamos que sería relevante considerar dos modificaciones en el diseño de los modelos de gestión de inventarios que hemos venido utilizando, con el objetivo de, en primer lugar, evaluar la importancia de las expectativas acerca del retorno de PFU en la determinación de la posición de inventario y con ello en el lanzamiento de órdenes de pedido de productos originales, y en segundo lugar, considerar el hecho de que generalmente la función de demanda de productos finales suele presentar un patrón estacional que no hemos considerado en la modelización y que pensamos puede aportar más realismo al análisis de la función inversa de la logística en este contexto de la gestión de inventarios.

6.2.1. El papel de las expectativas de retorno de PFU.

La política de pedidos en los modelos que hemos considerado lanza una orden de fabricación o adquisición de originales cuando la posición de inventario al final del periodo anterior cae por debajo de cierto nivel s . Tal y como hemos formulado el Modelo Refabricación, la posición de inventario en este modelo queda determinada por el nivel de inventario al final del periodo anterior, menos los faltantes de dicho periodo, más los pedidos pendientes de entrega (tanto de originales como de refabricados), más las expectativas del decisor acerca de retornos futuros de los PFU, siempre que éstas se consoliden antes de la llegada del siguiente envío (página 127 y siguientes), de manera que obteníamos unas expresiones para la posición de inventario esperada, estimada o modificada en el Modelo Refabricación de acuerdo con la relación entre el tiempo de consumo (n) y el plazo de entrega de los pedidos de refabricación (LT_{PFU}):

Si $n < \mathbf{LT}_{PFU}$:

$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t Q_{REF,j} + E_t \quad (4.15)$$

$$E_t = \begin{cases} \sum_{k=t-n+1}^t e_k & \text{si } \sum_{k=t-n+1}^t e_k \geq Q_{REF} \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases} \quad (4.16)$$

donde $e_t : P(r_t \geq e_t) = \alpha; \quad r_t \sim \text{Binomial}(V_t, p)$

Si $n \geq \mathbf{LT}_{PFU}$:

$$I_t = S'_t - F_t + \sum_{i=t-LT_{FAB}+1}^t Q_i + \sum_{j=t-LT_{PFU}+1}^t Q_{REF,j} + E_t \quad (4.17)$$

$$E_t = \begin{cases} \sum_{k=t-n+1}^{t-(n-LT_{PFU})} e_k & \text{si } \sum_{k=t-n+1}^{t-(n-LT_{PFU})} e_k \geq Q_{REF} \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases} \quad (4.18)$$

donde $e_t : P(r_t \geq e_t) = \alpha; \quad r_t \sim \text{Binomial}(V_t, p)$

¿Son estas expectativas relevantes a la hora de determinar la posición de inventario del modelo?. ¿Afecta E_t a la estructura de costes del Modelo Refabricación?. ¿En qué magnitud?. Estas son algunas de las cuestiones que surgen a la hora de analizar el papel de las expectativas en el diseño de este modelo y son las que pasamos a intentar responder.

Como queda dicho, realizaremos este análisis sobre el Modelo Refabricación y concretamente sobre determinados escenarios que pensamos son los más relevantes. Dado que pretendemos evaluar el papel de las expectativas (E_t) resulta razonable

situarnos en un contexto en el que estas expectativas sean activas, es decir, tomen valores distintos de cero. Para ello pensamos que lo más adecuado es realizar este análisis en un escenario optimista de recuperación de PFU ($p=80\%$) y simular aquellos escenarios en los que tengan un peso específico estas expectativas. Dado que el valor de éstas depende del tiempo de consumo (n) y del plazo de entrega de los pedidos de refabricación (LT_{PFU}), mantendremos constante el plazo de entrega de los pedidos originales (LT_{FAB}) a lo largo de este estudio. Así pues, consideraremos los siguientes valores para los parámetros del modelo:

Tabla 6.4: Modelo sin expectativas. Valores paramétricos

PARÁMETROS	MODELO REFABRICACIÓN
Plazo de entrega de originales (LT_{FAB})	2
Plazo de entrega de refabricados (LT_{PFU})	{ 2, 5 }
Tiempo de consumo (n)	{ 2, 4, 8 }
Tamaño del lote de fabricación (Q)	{ 100, 150, 200, 250, 300 }
Tamaño del lote de refabricación (Q_{REF})	25
Punto de pedido (s)	{ 10, 25, 50, 75, 100 }

Sólo consideramos un tamaño para el lote de refabricación ($Q_{REF}=25$) porque para lotes de tamaño superior, las expectativas nunca terminarán de consolidarse ya que el número de periodos necesarios para ello excedería el plazo de entrega del lote de refabricación.

Los resultados del análisis los presentamos confrontando el modelo que no contempla el efecto de las expectativas (modelo sin expectativas) y el modelo que incluye estas expectativas de retorno de PFU (modelo con expectativas) a través de la función de coste total de gestión de inventarios por periodo. Cada uno de los siguientes

gráficos agrupan un escenario de plazo de entrega de pedidos y de tiempo de consumo común para tres niveles distintos de Q.

Tabla 6.5: Análisis de expectativas. Resultados de la simulación.

MODELO REFABRICACIÓN $Q_{REF}=25$. Tiempo de consumo =2											
MODELO SIN EXPECTATIVAS						MODELO CON EXPECTATIVAS					
Stock medio de Comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)						Stock medio de Comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
$s=10$	21.52	40.14	62.44	87.83	110.46	$s=10$	20.95	39.92	62.52	85.88	111.95
$s=25$	37.05	60.63	85.05	108.95	133.86	$s=25$	36.60	84.35	82.04	107.36	130.86
$s=50$	69.63	95.32	120.40	145.51	170.08	$s=50$	58.92	84.35	108.22	134.37	158.92
$s=75$	95.15	120.47	145.33	170.82	196.34	$s=75$	84.10	108.55	134.72	160.15	184.20
$s=100$	120.33	145.43	170.50	195.65	220.76	$s=100$	108.72	133.92	159.37	183.74	208.82
Nº medio de Faltantes por periodo (F_t)						Nº medio de Faltantes por periodo (F_t)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
$s=10$	6.84	3.31	2.19	1.59	1.32	$s=10$	7.13	3.36	2.22	1.67	1.28
$s=25$	2.14	1.26	0.86	0.68	0.57	$s=25$	2.31	0.21	0.99	0.73	0.63
$s=50$	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	$s=50$	0.35	0.21	0.16	0.14	0.12
$s=75$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	$s=75$	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
$s=100$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	$s=100$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nº medio de PFU retornados por periodo						Nº medio de PFU retornados por periodo					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
$s=10$	10.18	13.00	13.87	14.37	14.55	$s=10$	9.99	12.95	13.82	14.28	14.61
$s=25$	13.89	14.60	14.94	15.11	15.16	$s=25$	13.74	15.41	14.81	15.03	15.10
$s=50$	15.59	15.55	15.54	15.58	15.58	$s=50$	15.33	15.41	15.49	15.46	15.52
$s=75$	15.66	15.64	15.58	15.60	15.60	$s=75$	15.61	15.62	15.54	15.57	15.60
$s=100$	15.60	15.59	15.62	15.59	15.63	$s=100$	15.61	15.62	15.60	15.62	15.57
Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU,t}$)						Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU,t}$)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	Q=100	Q=150	Q=200	Q=250	Q=300
$s=10$	17.24	18.47	19.00	19.25	19.22	$s=10$	17.21	18.43	18.91	19.23	19.29
$s=25$	18.89	19.25	19.51	19.59	19.62	$s=25$	19.03	19.76	19.49	19.54	19.60
$s=50$	19.76	19.73	19.68	19.77	19.79	$s=50$	19.65	19.76	19.66	19.75	19.75
$s=75$	19.75	19.76	19.74	19.77	19.82	$s=75$	19.73	19.81	19.77	19.78	19.78
$s=100$	19.82	19.88	19.89	19.77	19.81	$s=100$	19.77	19.86	19.80	19.69	19.77
Nº medio de Originales por periodo (O_t)						Nº medio de Originales por periodo (O_t)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300
$s=10$	9.83	7.00	6.13	5.65	5.46	$s=10$	10.03	7.07	6.16	5.72	5.42
$s=25$	6.09	5.40	5.08	4.90	4.87	$s=25$	6.25	4.60	5.18	4.96	4.89
$s=50$	4.46	4.43	4.46	4.44	4.43	$s=50$	4.69	4.60	4.57	4.55	4.51
$s=75$	4.36	4.38	4.42	4.47	4.43	$s=75$	4.39	4.42	4.47	4.40	4.41
$s=100$	4.44	4.41	4.45	4.41	4.41	$s=100$	4.40	4.43	4.41	4.40	4.41
Nº medio de Periodos por ciclo Originales ($P_{FAB,t}$)						Nº medio de Periodos por ciclo Originales ($P_{FAB,t}$)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300
$s=10$	10.17	21.44	32.63	44.27	54.90	$s=10$	9.97	21.21	32.44	43.69	55.30
$s=25$	16.41	27.79	39.41	51.02	61.59	$s=25$	16.00	32.62	38.63	50.42	61.31
$s=50$	22.41	33.88	44.82	56.27	67.76	$s=50$	21.31	32.62	43.77	54.94	66.45
$s=75$	22.92	34.23	45.21	55.96	67.78	$s=75$	22.80	33.90	44.72	56.77	68.02
$s=100$	22.54	34.02	44.95	56.70	67.96	$s=100$	22.75	33.83	45.36	56.85	68.01
Nº medio de Periodos por ciclo Refabricados ($P_{REF,t}$)						Nº medio de Periodos por ciclo Refabricados ($P_{REF,t}$)					
$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300	$LT_{FAB}-LT_{PFU}=2$	100	150	200	250	300
$s=10$	2.46	1.92	1.80	1.74	1.72	$s=10$	2.50	1.93	1.81	1.75	1.71
$s=25$	1.80	1.71	1.67	1.65	1.65	$s=25$	1.82	1.62	1.69	1.66	1.66
$s=50$	1.60	1.61	1.61	1.60	1.60	$s=50$	1.63	1.62	1.61	1.62	1.61
$s=75$	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	$s=75$	1.60	1.60	1.61	1.61	1.60
$s=100$	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	$s=100$	1.60	1.60	1.60	1.60	1.61

La Tabla 6.5 recoge los valores de las variables de interés del modelo en el escenario $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$, $n=2$, que representa la tendencia general de los resultados del análisis realizado. El modelo sin expectativas se caracteriza por un stock medio de comerciables ($S_{FAB,t}$) superior al generado por el modelo con expectativas, principalmente en las escalas altas del modelo. El resto de las variables que se estudian presentan valores parecidos y no entraremos a discutirlos. Sin embargo hemos de hacer notar que, a medida que se incrementa el tiempo de consumo, el modelo sin expectativas tiende a generar pedidos de originales con menor frecuencia de lo que se hace en el modelo con expectativas. Al ser los ciclos de fabricación más largos, los costes por periodo asociados a estos lanzamientos se reducen, beneficiando así la posición del modelo sin expectativas en el total de costes de gestión. Este resultado lo compensa el modelo con expectativas ajustando mucho más el nivel medio de comerciables de manera que, finalmente, en escalas altas del modelo el comportamiento en costes del modelo con expectativas es claramente superior. Los siguientes gráficos intentan aportar luz sobre estos aspectos.

Gráfico 6.2.1.a: Análisis de expectativas. LT(2, 2). n=2.

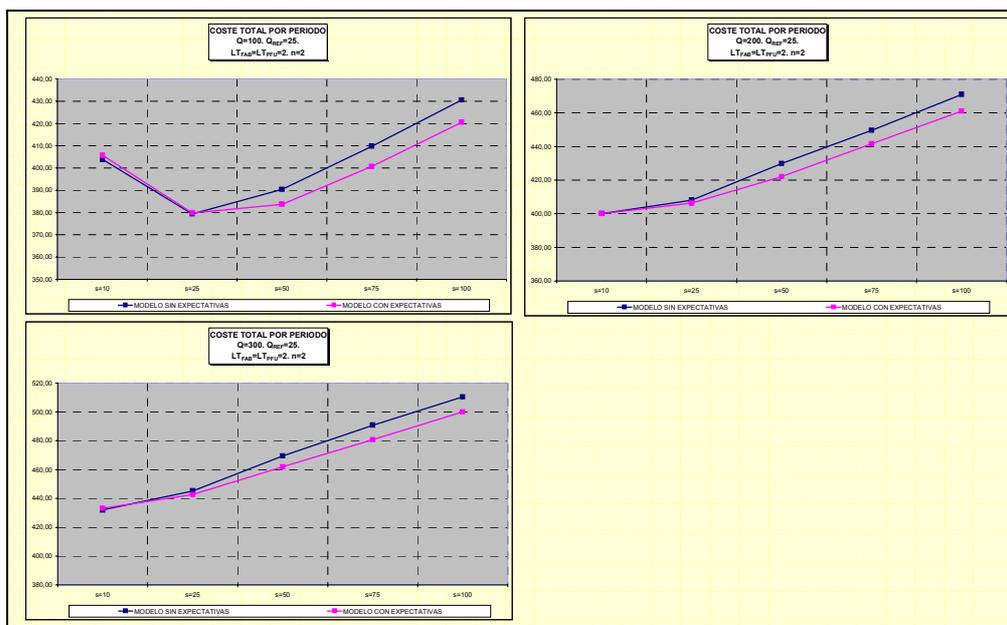


Gráfico 6.2.1.b: Análisis de expectativas. LT(2, 2). n=4.

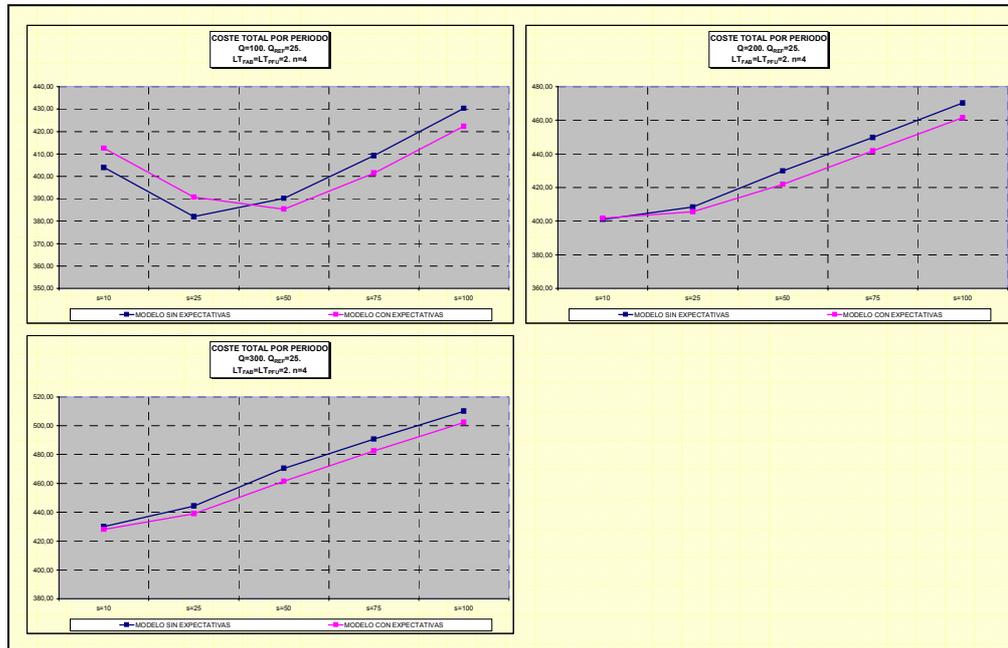


Gráfico 6.2.1.c: Análisis de expectativas. LT(2, 2). n=8.

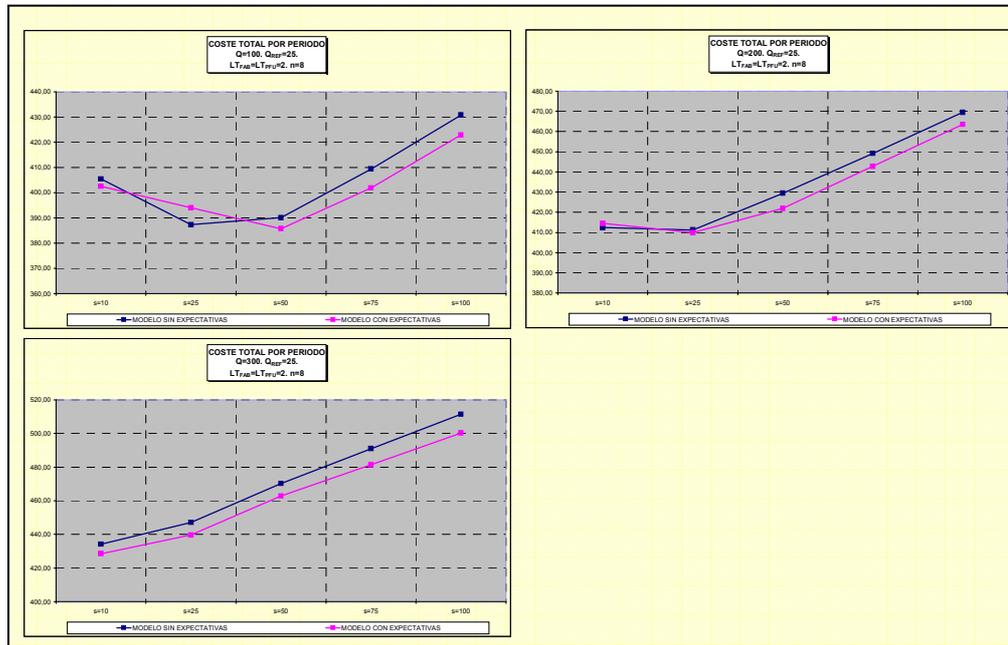


Gráfico 6.2.1.d: Análisis de expectativas. LT(2, 5). n=2.

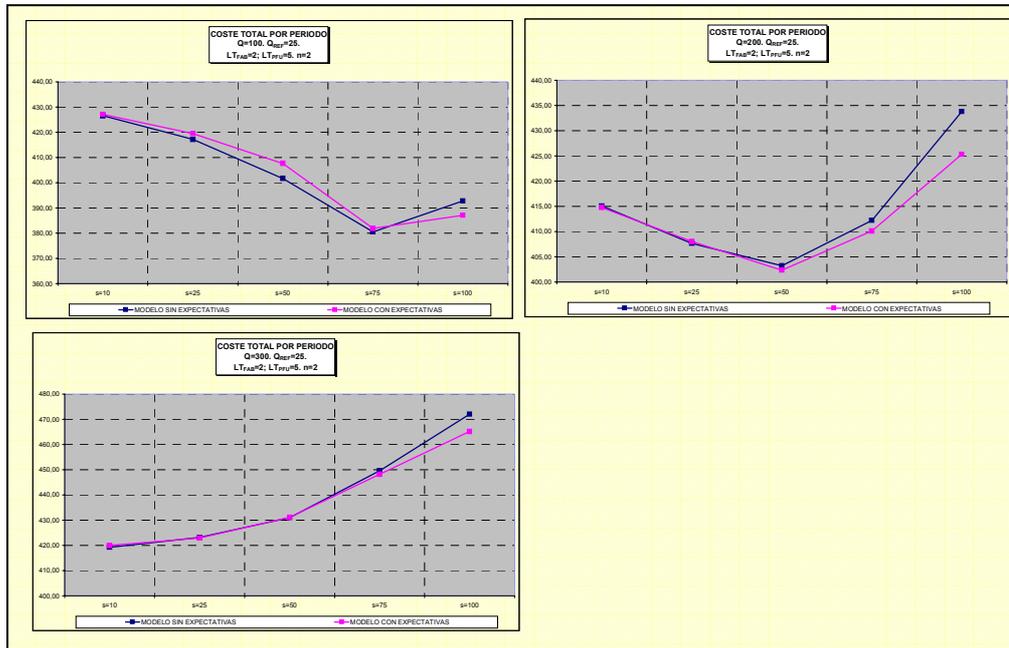


Gráfico 6.2.1.e: Análisis de expectativas. LT(2, 5). n=4.

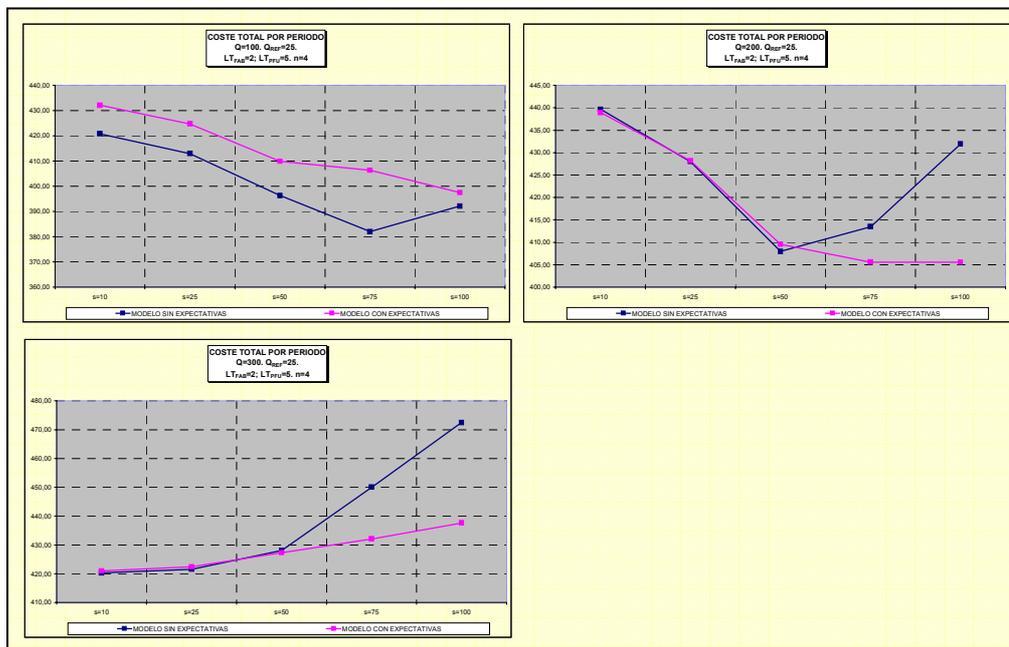
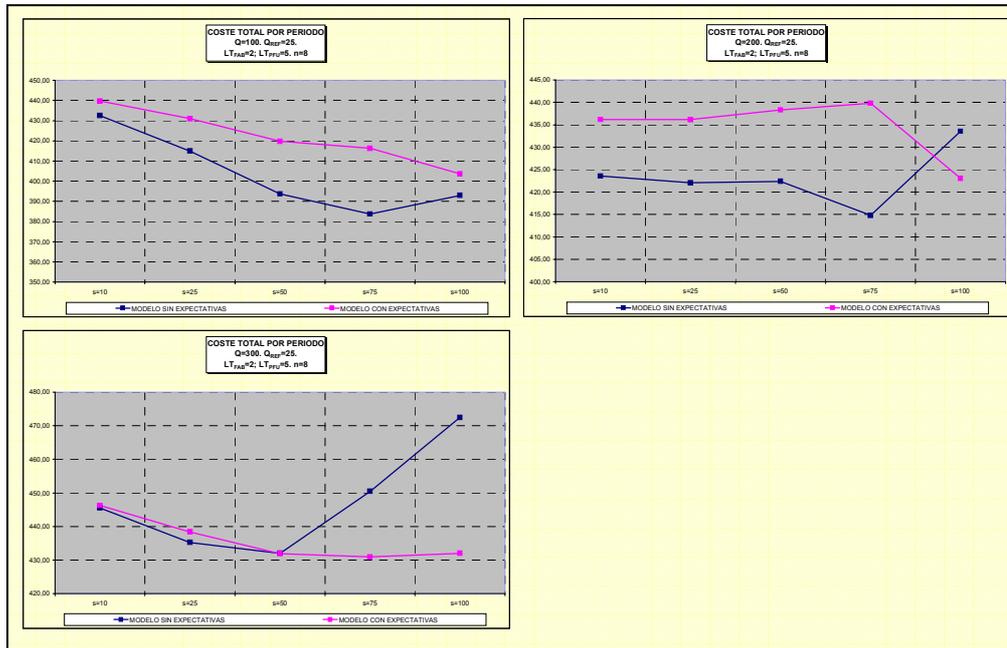


Gráfico 6.2.1.f: Análisis de expectativas. LT(2, 5). n=8.



Los principales resultados que obtenemos se resumen en los siguientes puntos:

- 1) El modelo sin expectativas genera un stock medio de comerciables por periodo superior al que genera el modelo con expectativas, debido a que este último anticipa el retorno de los PFU, incrementando la posición de inventario
- 2) El modelo sin expectativas consigue reducir la frecuencia de pedidos de originales en relación al modelo con expectativas al aumentar el tiempo de consumo, lo cual beneficia al primero en las escalas pequeñas del modelo, sin embargo a escalas grandes, el mejor ajuste del modelo con expectativas de los niveles de comerciables benefician la posición global de éste.
- 3) El modelo con expectativas presenta un comportamiento más favorable en términos de coste, principalmente cuando el modelo funciona a una escala grande que le permita aprovecharse de la dinámica del flujo de retorno.

6.2.2. Demanda estacional.

La inclusión de un componente estacional en la demanda de productos comerciables se justifica por el hecho de que, generalmente, ésta suele presentar un patrón de estacionalidad que bien pudiera afectar a la dinámica de los modelos propuestos y a los resultados obtenidos en el ejercicio de simulación. Este es el principal motivo de incluir este epígrafe en el que intentamos ofrecer una primera aproximación a las implicaciones del componente estacional de la demanda en la modelización de los sistemas de gestión de inventarios con flujo de retorno de PFU.

Sobre la misma distribución de probabilidad que hemos utilizado para generar el proceso estocástico de demanda de productos comerciables (una Normal (20; 2,5)) supondremos un patrón de estacionalidad consistente en un incremento de la demanda media del periodo en un valor igual a la esperanza matemática de la distribución de la demanda. Este incremento en el valor medio ($\mu=20$) se produce cada 20 periodos durante 4 periodos consecutivos, es decir, cada 20 periodos la demanda de productos comerciables experimenta un incremento respecto a su nivel medio de un 100% durante 4 periodos seguidos, momento en el cual la demanda vuelve a su senda de comportamiento $N(20; 2,5)$.

La modelización de este patrón de estacionalidad es arbitraria y bien podríamos haber considerado cualquier otro, que presentaría ventajas e inconvenientes similares al que estamos utilizando.

El análisis que vamos a realizar representa un complemento o extensión del ejercicio de simulación desarrollado anteriormente, de manera que no pensamos que sea necesario replicar esta simulación, en todos y cada uno de los escenarios propuestos, ya que excederíamos el objetivo propuesto. Sin embargo, sí realizaremos este estudio para un número suficiente de valores paramétricos de modo que podamos observar los

efectos de un comportamiento estacional de la demanda. De esta forma, el escenario paramétrico que consideraremos será el siguiente:

Tabla 6. 6: Demanda estacional. Valores paramétricos

	MODELO FORWARD	MODELO REUTILIZACIÓN	MODELO REFABRICACIÓN
LT_{FAB}	{2, 5}	{2, 5}	{2, 5}
LT_{PFU}	-	{2, 5}	{2, 5}
p	-	80%	80%
n	-	{2, 8}	{2, 8}

La selección únicamente del escenario optimista ($p=80\%$) para realizar la simulación se debe a que, bajo estas circunstancias de recuperación de PFU, es cuando se logra una mayor dinámica del flujo de retorno, lo que constituye nuestro principal punto de interés. Se contemplan, asimismo, dos periodos distintos de tiempo de consumo (n) que nos permitan apreciar posibles diferencias en la respuesta de las variables de interés del modelo ante cambios en este parámetro. Por último, se analizarán dos combinaciones diferentes para los plazos de entrega de los productos originales (LT_{FAB}) y para los productos refabricados (LT_{PFU}); en concreto, presentaremos los resultados de la simulación de los 3 modelos propuestos para $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$, y para $LT_{FAB}=LT_{PFU}=5$.

El análisis realizado muestra que la existencia de estacionalidad en la demanda de productos comerciables provoca un incremento en la función de costes con relación al modelo original de demanda no estacional, aunque la estructura de costes es

esencialmente la misma al realizar una comparación entre los diferentes modelos del escenario estacional. Es decir, los modelos que incorporan la posibilidad de recuperar económicamente los PFU (reutilización y refabricación) presentan un comportamiento en costes más favorable que el modelo forward, para cada uno de los escenarios analizados en el caso de demanda estacional. A continuación presentamos una serie de gráficos que ilustran los resultados de la simulación.

Gráfico 6.2.2.a: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$. $n=2$.

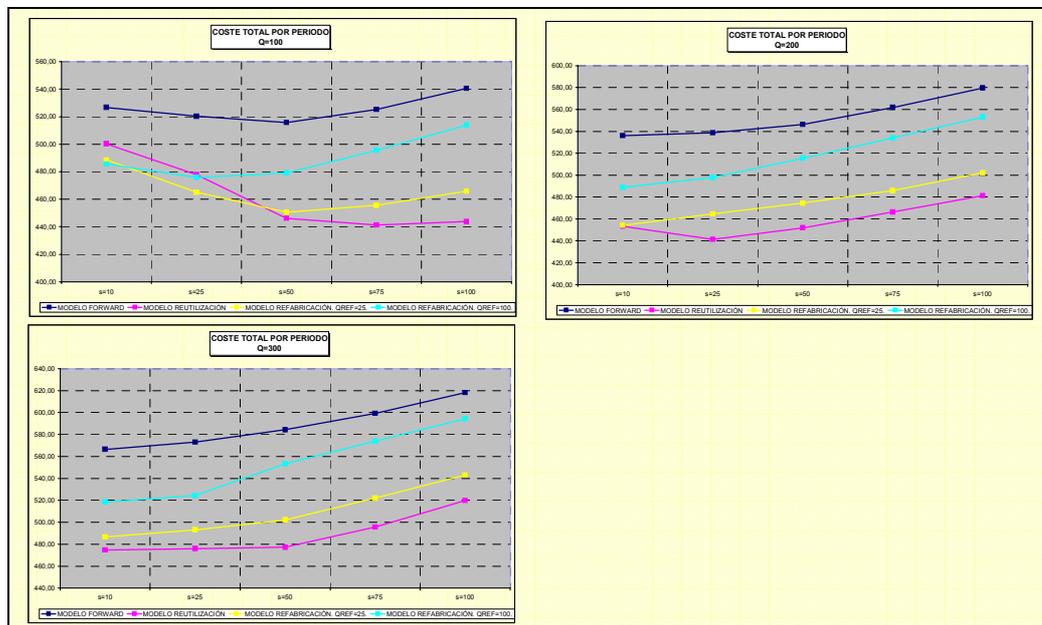


Gráfico 6.2.2.b: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=5$. $n=2$.

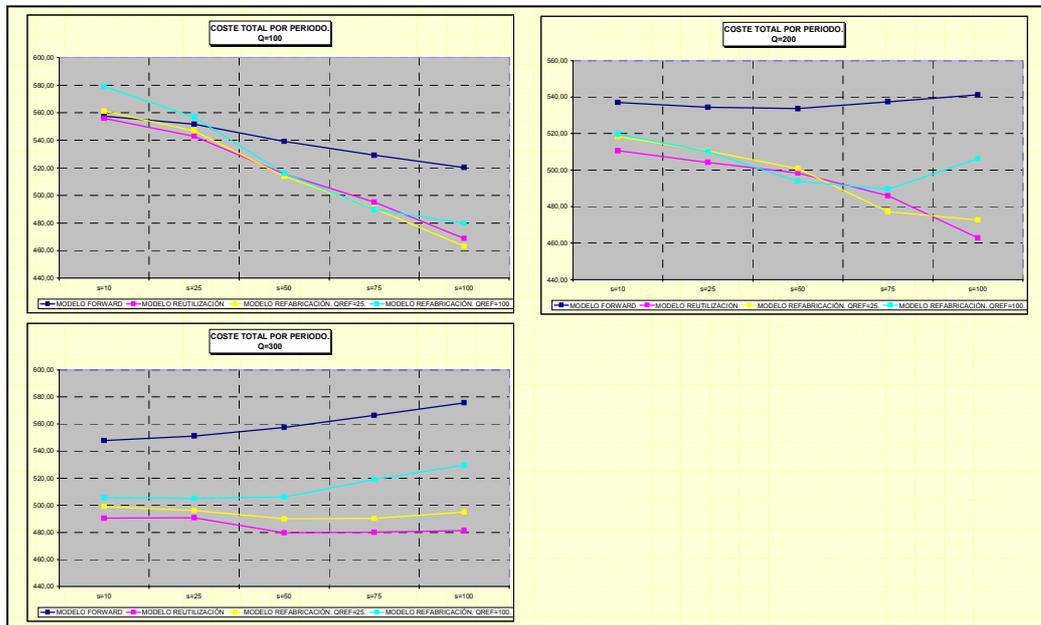


Gráfico 6.2.2.c: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$. $n=8$.

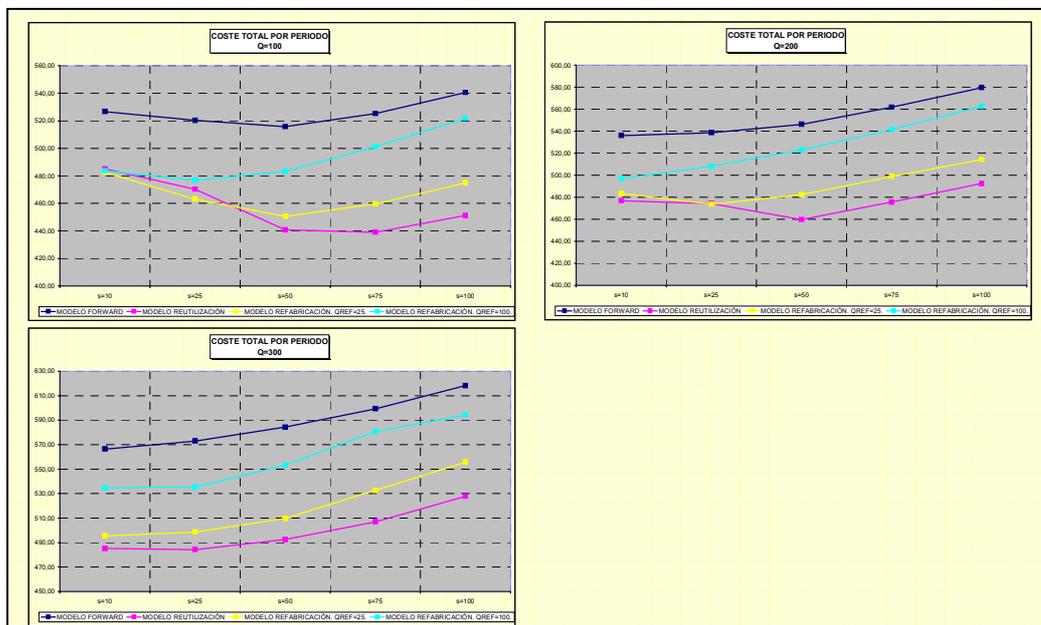
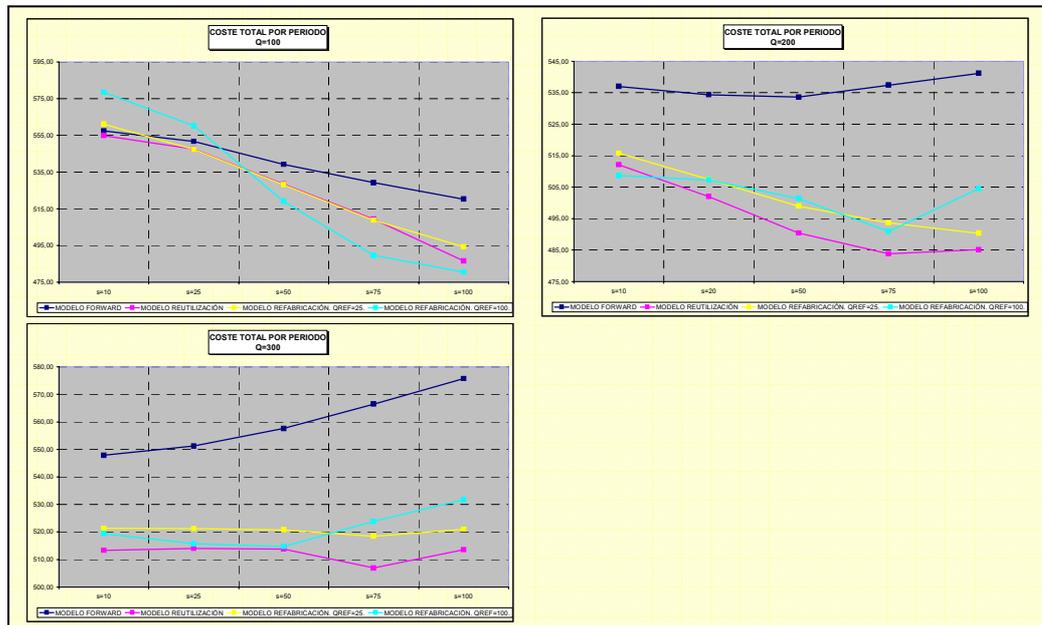


Gráfico 6.2.2.d: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=5$. $n=8$.

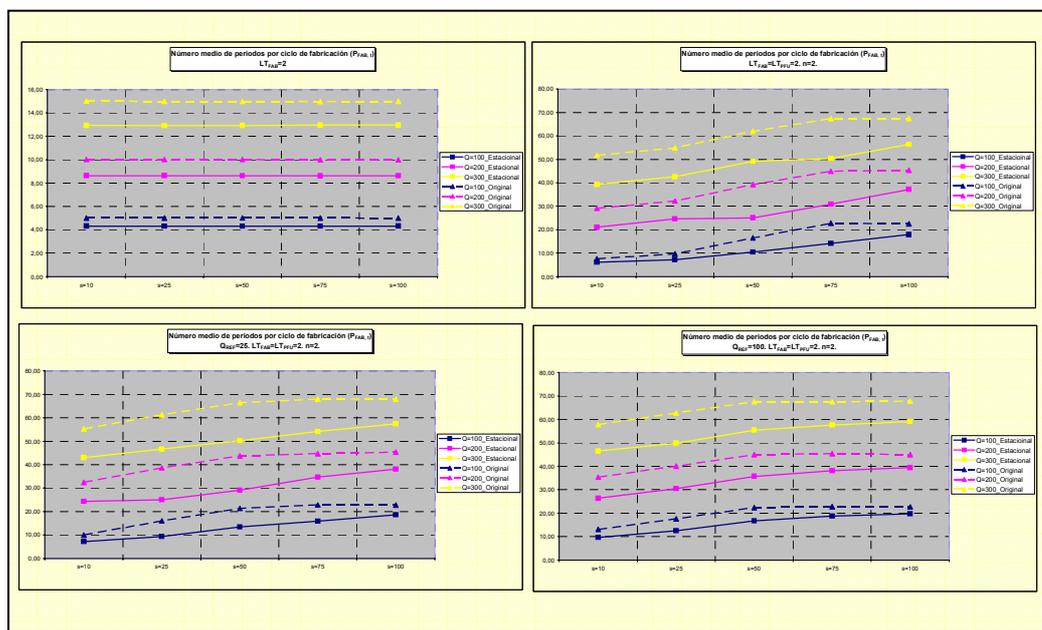


La consideración de este patrón de estacionalidad introduce una serie de rigideces en el sistema de gestión de inventarios, en comparación con el modelo original, observables en el comportamiento de las variables de interés del modelo. En concreto, podemos señalar los siguientes aspectos como los más relevantes en este sentido:

- 1) La consideración de picos de demanda estacional incrementa el valor medio de la demanda por periodo, lo cual provoca incrementos tanto en el número de PFU retornados por periodo, como en el número de originales por periodo necesarios para satisfacer esa demanda.
- 2) El componente estacional tiende a disminuir el valor medio del stock de productos comerciables ($S_{FAB, t}$) en todos los modelos y para los escenarios considerados.
- 3) En consecuencia, se observa un incremento del número medio de faltantes por periodo en los modelos con demanda estacional.

- 4) El número medio de periodos por ciclo de fabricación ($P_{FAB, t}$) experimenta una disminución relevante en todos los casos analizados lo que genera pedidos de originales con mayor frecuencia en los modelos con demanda estacional, que bien pudiera deberse a la rigidez de estos modelos a la hora de aprovechar la inercia que les proporciona el flujo de retorno de PFU.

Gráfico 6.2.2.e: Demanda estacional. $P_{FAB, t}$, $n=2$.



Quizá sea ésta la consecuencia más significativa de la existencia de un componente estacional en este tipo de modelos: la generación de ciclos de originales de longitud más reducida, de manera que se estarían generando pedidos de este tipo de productos con mayor frecuencia. Este resultado, sin embargo, era previsible en cuanto que el volumen de demanda en este supuesto de estacionalidad es superior al considerado originalmente.

En cualquier caso, la inclusión de un flujo de retorno en el sistema de gestión de inventarios sigue proporcionando ventajas competitivas en términos de coste respecto al modelo tradicional de gestión de inventarios, aun cuando al considerar un patrón de estacionalidad en la demanda aumente el valor de la función de costes totales en el contexto de los valores paramétricos considerados en este ejercicio de simulación.

CAPÍTULO VII

RESUMEN Y CONCLUSIONES

- 7.1. RESUMEN.**
- 7.2. CONCLUSIONES.**
- 7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.**

CAPÍTULO VII

RESUMEN Y CONCLUSIONES

7.1. RESUMEN.

Para sintetizar el contenido de esta propuesta de tesis doctoral iremos desgranando las que consideramos principales aportaciones de este trabajo en el ámbito de la dirección de operaciones.

En primer lugar hemos definido y analizado el concepto de Logística Inversa dentro del marco de la función logística, mediante una visión integral de esta función que permita considerar, conjuntamente, el tradicional flujo directo de materiales, productos e información, y el novedoso flujo de retorno de PFU. Además hemos planteado el análisis de la función inversa de la logística a través de un enfoque de recursos y capacidades, realizando una clasificación de combinaciones de activos y habilidades que permitan obtener una ventaja competitiva sostenible a través de esta función.

La consideración de este flujo inverso tiene, como hemos visto en el capítulo II, efectos sobre el sistema de operaciones de la empresa que hemos clasificado a través del proceso de toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas, lo cual constituye la segunda aportación de nuestro trabajo.

Para desarrollar eficientemente las actividades de recuperación de los PFU se requiere la implantación de sistemas logísticos capaces de poner en manos del recuperador los PFU, para así poderles aplicar la opción de gestión más adecuada (reutilización, reciclaje, refabricación). De esta forma, hemos realizado una clasificación para los sistemas de logística inversa (SLI) atendiendo a quién desarrolla esta función inversa y hemos presentado las características más relevantes de cada uno de ellos. De esta manera, cualquier empresa podría apoyarse en esta clasificación para determinar el sistema más adecuado a sus necesidades, en función de las propias características de la empresa, del tipo de producto de que se trate, del proceso productivo, del mercado al que se dirija o de las posibilidades de recuperación económica. Ésta constituiría otra aportación de nuestro trabajo.

Durante el análisis de los diferentes sistemas de logística inversa hemos realizado un repaso bibliográfico de los principales modelos diseñados para la recuperación económica de PFU, señalando elementos de incertidumbre que condicionan, de manera importante, el diseño, desarrollo y control de estos sistemas. Para el tratamiento de esta incertidumbre se plantean distintas opciones de diseño de los modelos a través, principalmente, de herramientas y técnicas de investigación operativa. En este trabajo, hemos centrado nuestro interés en el estudio de uno de los aspectos funcionales más afectados por la consideración de la función inversa de la logística: la gestión de inventarios. Para ello, hemos desarrollado un análisis numérico de simulación a través del cual se ilustra el comportamiento de un modelo de gestión de

inventarios ante la posibilidad de recuperación de los PFU y su reintroducción en la cadena de suministro.

En este sentido, cabe mencionar la definición que hemos realizado del concepto de posición de inventario en el que se consideran, de manera explícita, las expectativas de los agentes acerca de la recuperación en el futuro de PFU, lo cual afecta a la política de gestión de inventarios y representa una aportación dentro del modelo que hemos utilizado.

Finalmente, hemos realizado un análisis de sensibilidad para ilustrar el comportamiento de las variables de interés del modelo ante variaciones en los parámetros que lo definen.

7.2. CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones que obtenemos del trabajo de investigación realizado son las siguientes:

- 1) El diseño de la función logística de la empresa debe contemplar tanto el flujo directo productor-consumidor, como el flujo inverso consumidor-productor (recuperador), de manera que, a través de este enfoque integral, se amplifiquen las oportunidades competitivas que ofrece esta función logística.
- 2) La función inversa de la logística, para poder generar de manera eficiente estas oportunidades competitivas, requiere un proceso de planificación, desarrollo y control similar al existente para la función directa de la logística. Es decir, la logística inversa presenta un carácter intrínsecamente estratégico.

- 3) Este cariz estratégico se traslada a los ámbitos táctico y operativo en los que se consolida la actividad logística, para lo cual deberán desarrollarse sistemas logísticos capaces de aprovechar las oportunidades económicas de esta función.
- 4) Los sistemas de logística inversa posibilitan tanto la recuperación económica de los PFU, como el cumplimiento de la normativa existente en esta materia. De esta forma, estas actividades de recuperación no se ciñen a una mera imposición legislativa sino que representan una oportunidad de rentabilidad económica.
- 5) El diseño y desarrollo de los sistemas de logística inversa conlleva una importante carga de incertidumbre acerca de la cantidad y calidad de los PFU, así como del momento en el que se recuperarán dichos productos. Por eso resulta necesario profundizar en el diseño de modelos de sistemas logísticos que ayuden a despejar estas incógnitas asociadas con la recuperación física de los PFU.
- 6) La utilización de técnicas de investigación operativa parece ser un buen método para amortiguar el efecto de esta incertidumbre en el diseño de sistemas de logística inversa. Sin embargo, estas técnicas y herramientas deben ser, principalmente, una forma de mejorar nuestro proceso de toma de decisiones y de lograr los objetivos propuestos por la organización, y nunca deberán constituirse por sí solas en el criterio definitorio de nuestras decisiones.

Esta última conclusión nos da pie para señalar una serie de limitaciones que presenta nuestro trabajo y de las que somos perfectamente conscientes, asumiéndolas en su totalidad:

- 1) Lo novedoso de este tema de investigación hace que el tratamiento científico del mismo sea todavía escaso, lo cual puede comprobarse en el

número de referencias bibliográficas que hemos utilizado, y que presentan cierto sesgo, de carácter cuantitativo, hacia la modelización del problema y sus técnicas de resolución, es decir, hacia la investigación operativa. De esta forma, los aspectos relativos a la organización y gestión de la función inversa de la logística todavía son algo excepcional en las publicaciones de dirección de operaciones, aunque esperamos que este trabajo sirva de estímulo para continuar trabajando en este tema.

- 2) También en el plano empresarial y profesional, la logística inversa es todavía un concepto poco reconocible por lo que su análisis cualitativo (a través de estudio de casos, encuestas o visitas a empresas) resulta difícil y, en cualquier caso, pensamos que sería poco representativo.
- 3) Este último ha sido uno de los motivos de emplear la simulación como técnica cuantitativa de análisis y de la que asumimos, como ya hicimos en el capítulo IV, todos y cada uno de los inconvenientes que presenta. Además, tal y como hemos indicado en el proceso de análisis de los resultados, éstos reflejan exclusivamente el escenario definido por los parámetros considerados y cualquier ejercicio de inferencia a otros escenarios no tendría validez en sí mismo. De todas formas, pensamos que la flexibilidad de esta herramienta y su fácil aplicación permitirán generalizar el modelo a escenarios particulares que puedan considerarse en el mundo empresarial.

En cualquier caso, la logística inversa es aún, como ya hemos señalado, un concepto muy novedoso, no sólo para la sociedad en su conjunto, sino también dentro de los ámbitos empresarial, académico y de investigación, para los que esta tesis doctoral pretende ser una puerta de entrada a este prometedor campo de investigación para unos y elemento competitivo para todos.

7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Lo novedoso del tema hace que las posibilidades futuras de investigación en el ámbito de la logística inversa sean muy diversas y en algunos casos, aún estarían por determinar. Como no pretendemos acotar el conjunto de dichas posibilidades, nos limitaremos a apuntar ciertas direcciones en las que, al menos nosotros, encaminaremos nuestro trabajo a partir de ahora.

En primer lugar, pensamos conveniente completar el estudio teórico realizado de los diferentes sistemas de logística inversa con estudios de casos sobre empresas que hayan adoptado alguno de los sistemas propuestos, así como profundizar más en las consideraciones estratégicas de la logística inversa a través del enfoque basado en recursos. De esta forma no sólo estaríamos contrastando cualitativamente las hipótesis formuladas en la tesis, sino que además podríamos ilustrar las potencialidades del concepto de logística inversa en la obtención de ventajas competitivas sostenibles.

En cuanto a la parte cuantitativa de nuestro trabajo, pretendemos aproximarnos un poco más a la problemática de la gestión de inventarios con flujo de retorno de PFU a través de, por ejemplo, la consideración de otros modelos de gestión de stocks (entre ellos, los modelos de revisión periódica), la utilización de funciones de demanda de productos comerciables más cercanas a las reales o que incluyan más estructura (por ejemplo, los procesos estocásticos autorregresivos) que la que hemos definido para este modelo, el diseño de un mecanismo de corrección de expectativas acerca del retorno de PFU o la generación de procesos de retorno de PFU más elaborados (procesos de retardos distribuidos, por ejemplo). Por supuesto, y tal y como señalamos en el capítulo IV, el debate acerca del concepto de posición de inventario sigue abierto y por tanto, continuaremos trabajando sobre esta cuestión.

No iremos más allá en nuestras pretensiones, no sea que todo se quede finalmente en eso y, de momento, pondremos punto y seguido a esta investigación que naturalmente continuaremos con la ilusión de buscar como quien espera hallar y de hallar como quien espera seguir buscando. (Adaptación libre de S. Agustín en Novales, 1994).

APÉNDICE GRÁFICO

1. Modelo Reutilización.

Gráfico 2.1.a: $S_{FAB,t}$, Variación LT_{FAB} .

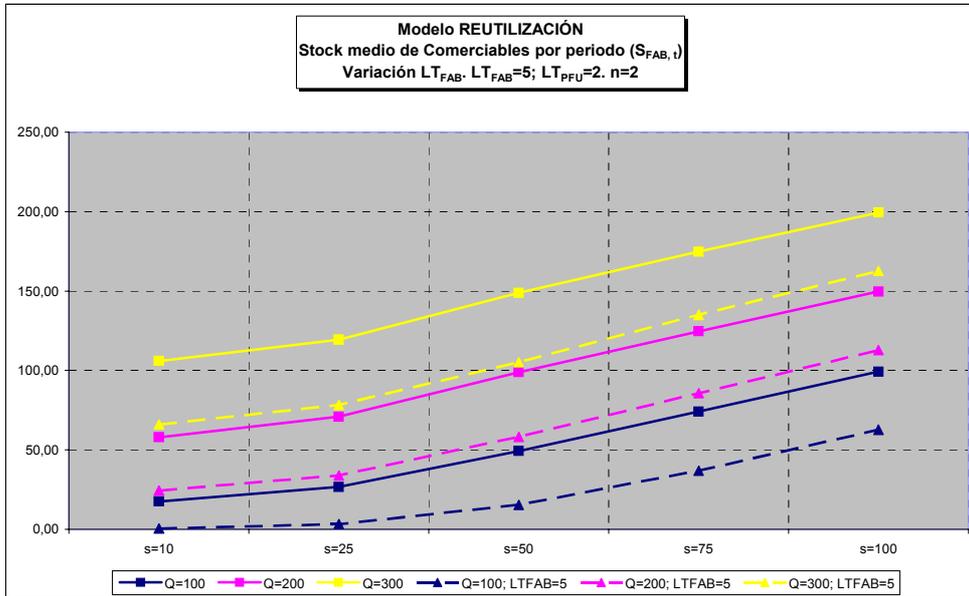


Gráfico 2.1.b: $S_{FAB,t}$, Variación LT_{PFU} .

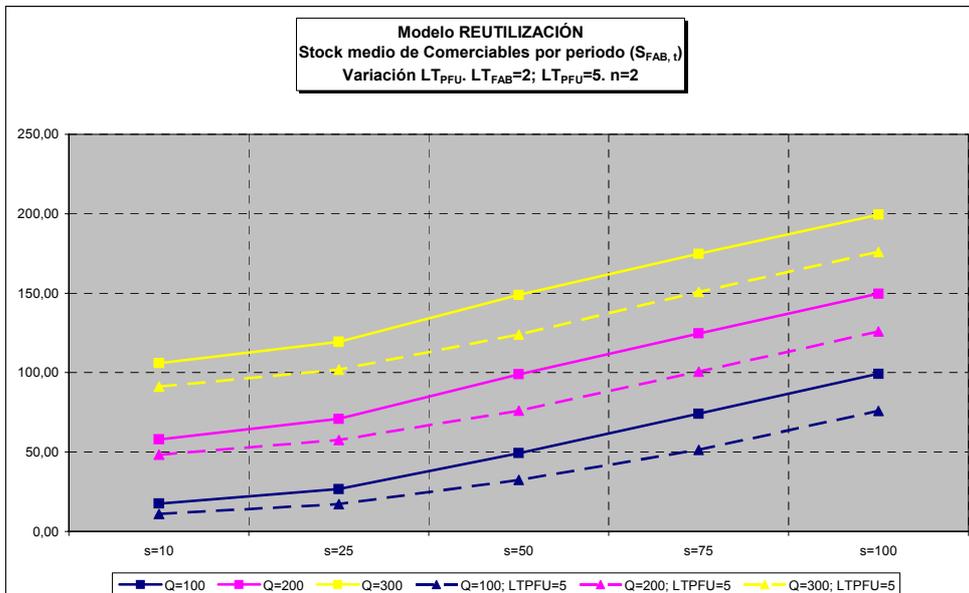


Gráfico 2.1.c: $S_{FAB, t}$. Variación LT_{FAB} y LT_{PFU} .

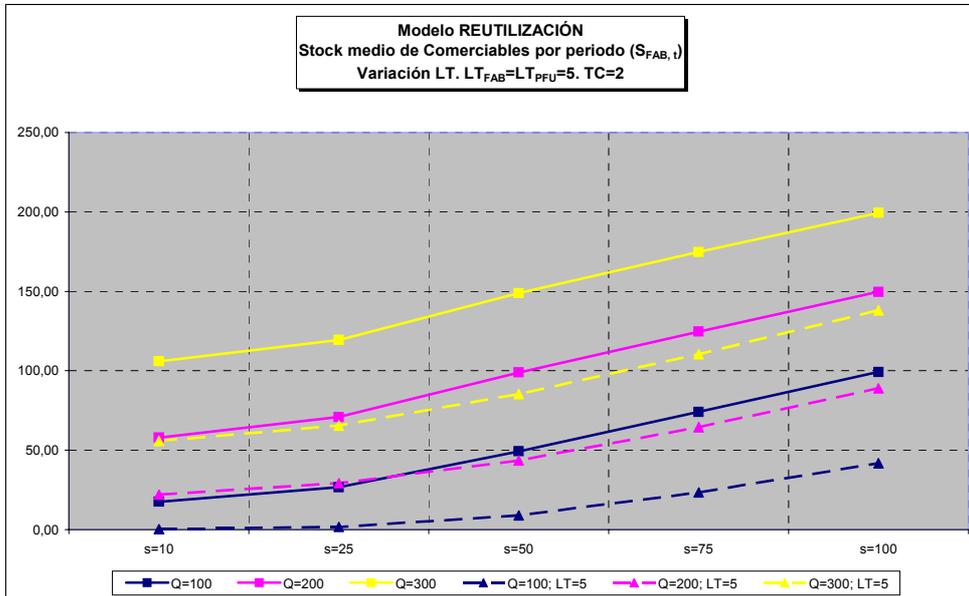


Gráfico 2.1.d: $S_{FAB, t}$. Variación en el tiempo de consumo ($n=4$).

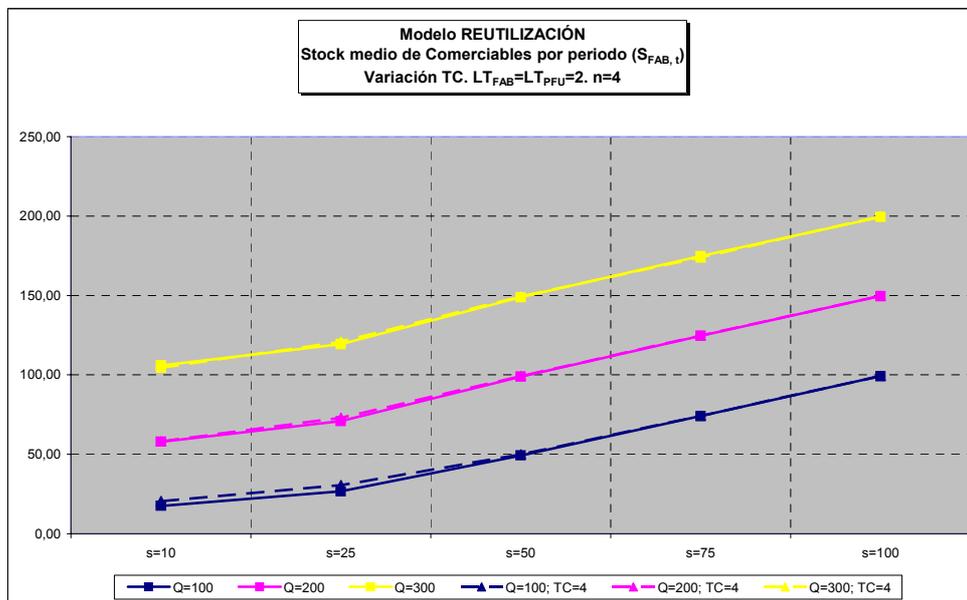


Gráfico 2.1.e: $S_{FAB, t}$. Variación en el tiempo de consumo (n=8).

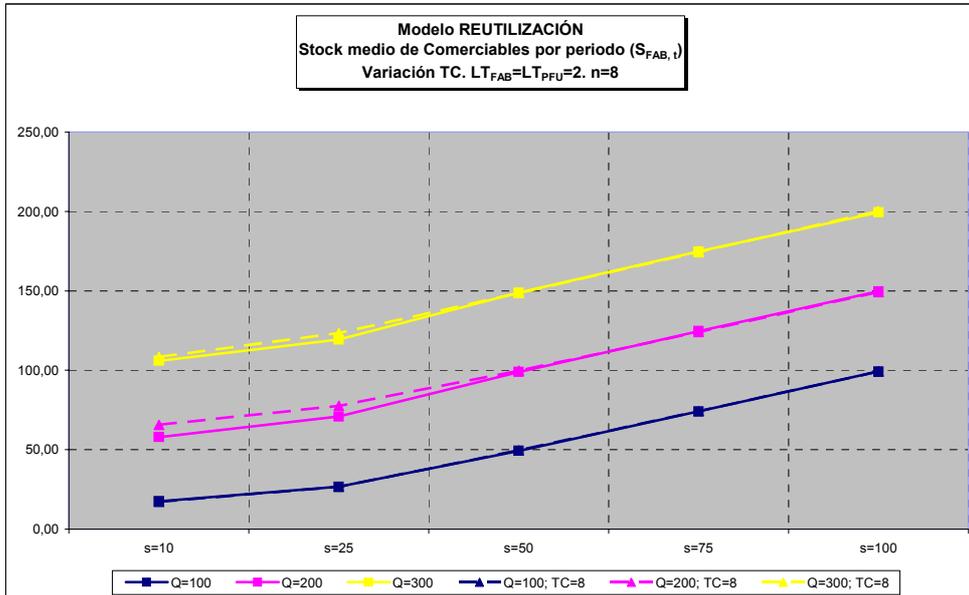


Gráfico 2.1.f: $S_{FAB, t}$. Variación en la tasa de retorno PFU (p=80%).

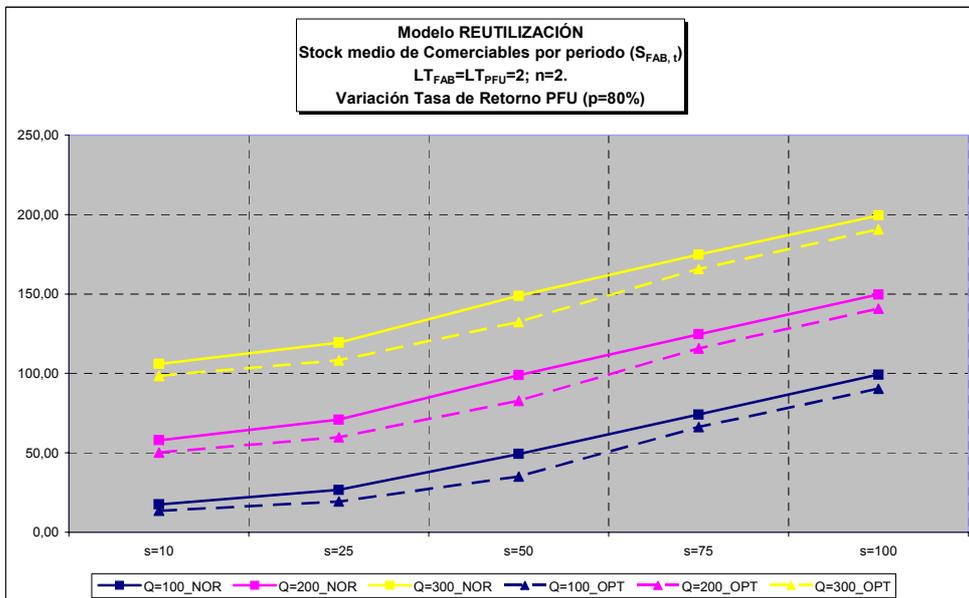


Gráfico 2.1.g: $S_{FAB,t}$. Variación en la tasa de retorno PFU ($p=20\%$).

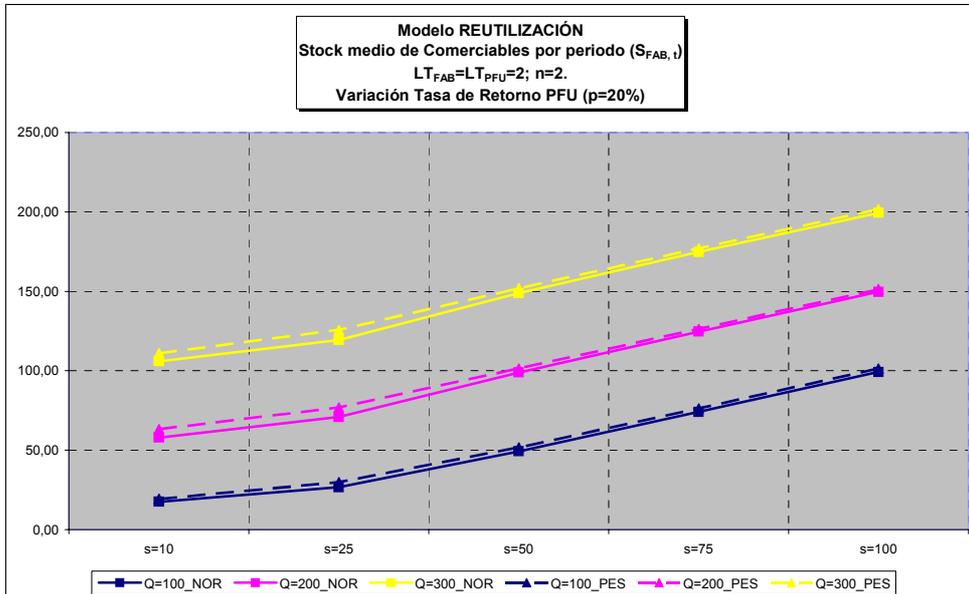


Gráfico 2.2.a: F_t . Variación en LT_{FAB}

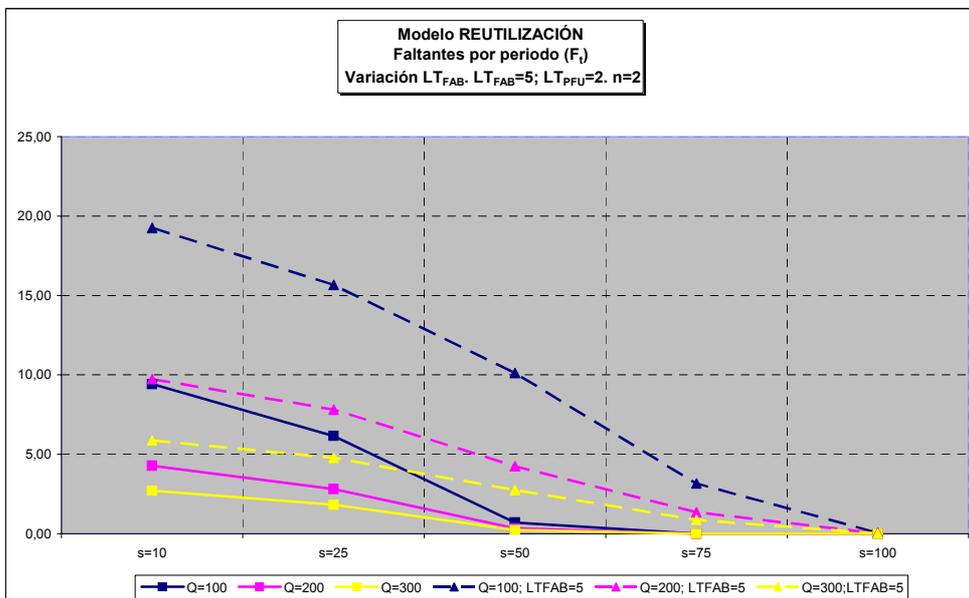


Gráfico 2.2.b: F_t . Variación en LT_{PFU}

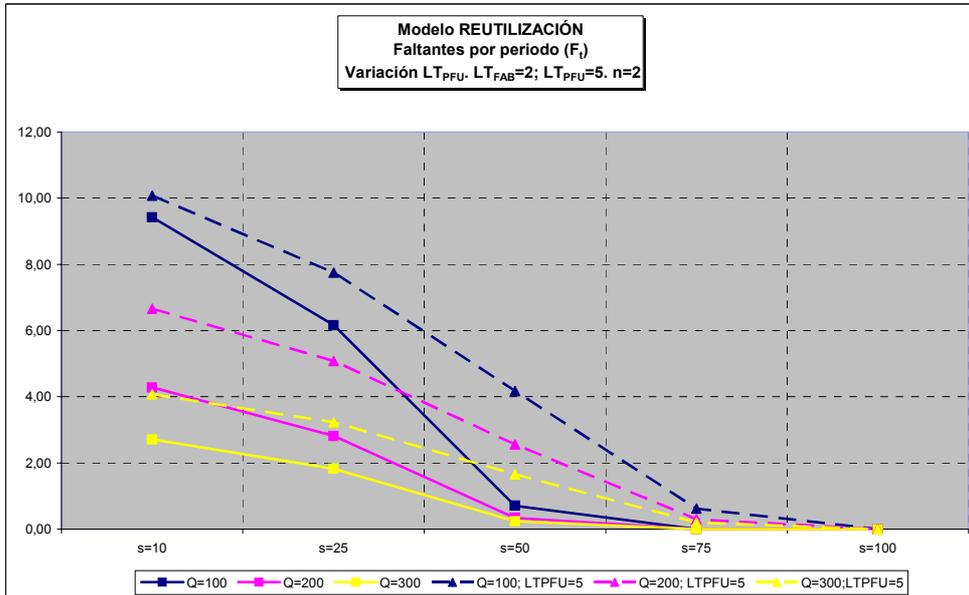


Gráfico 2.2.c: F_t . Variación en tiempo de consumo ($n=4$)

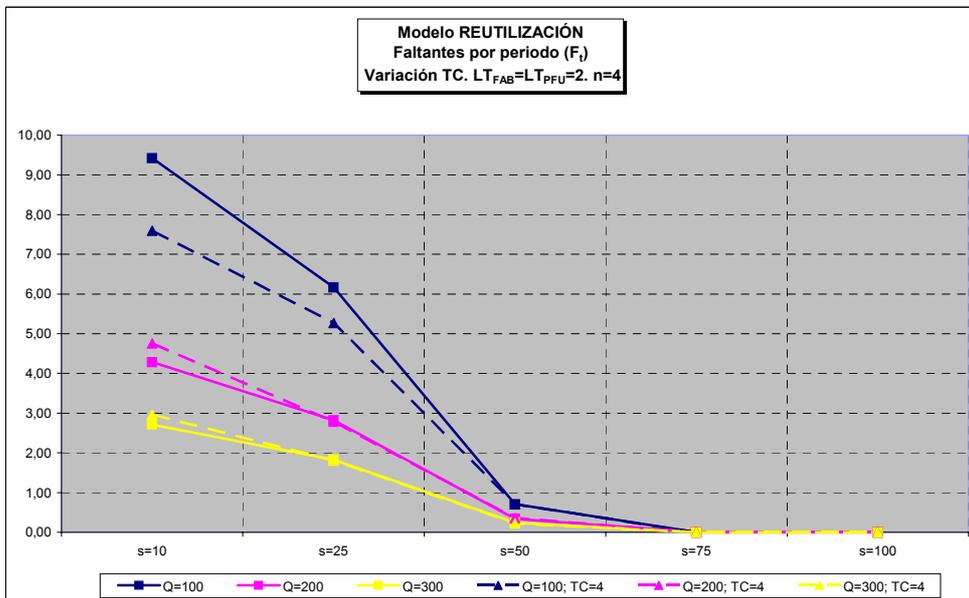


Gráfico 2.2.d: F_t . Variación en tiempo de consumo ($n=8$)

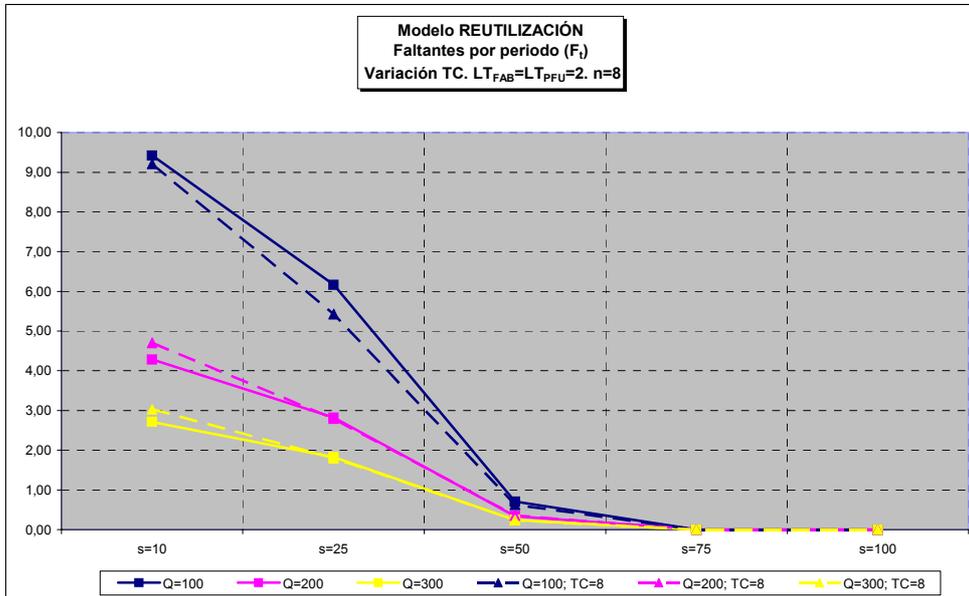


Gráfico 2.2.e: F_t . Variación en la tasa de retorno PFU ($p=80\%$)

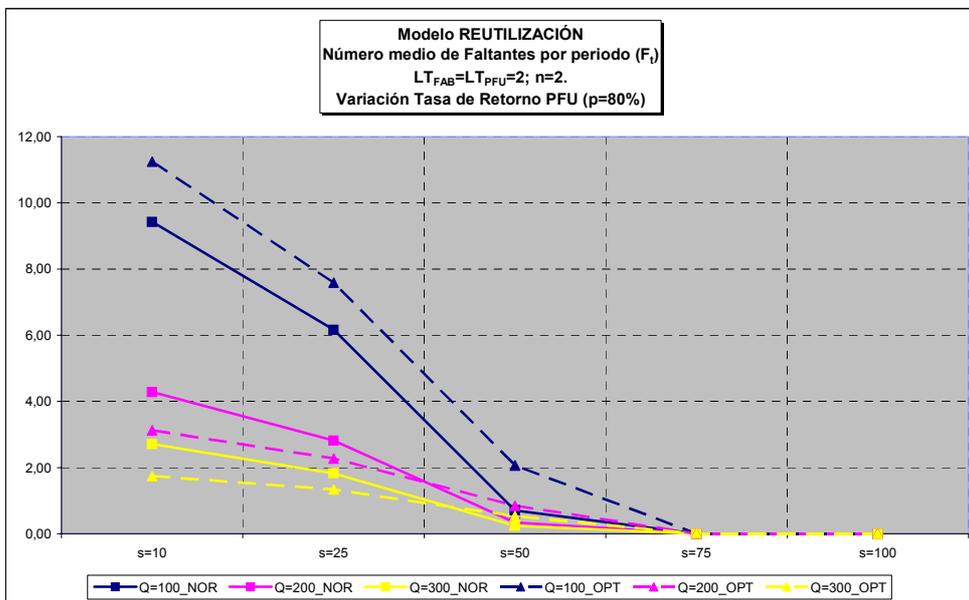


Gráfico 2.2.f: F_t . Variación en la tasa de retorno PFU ($p=20\%$)

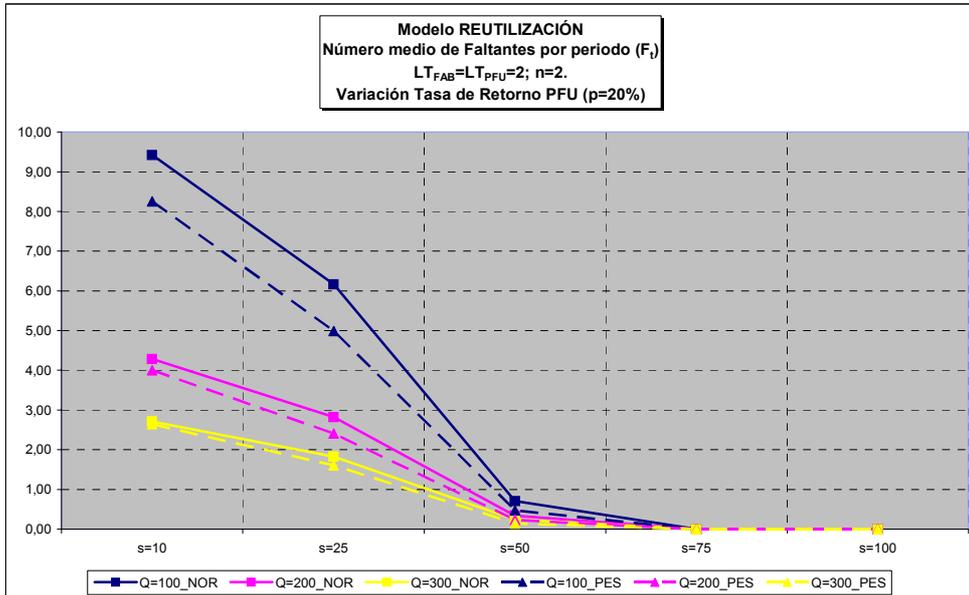


Gráfico 2.3.a: PFU_t . Variación en LT_{FAB}

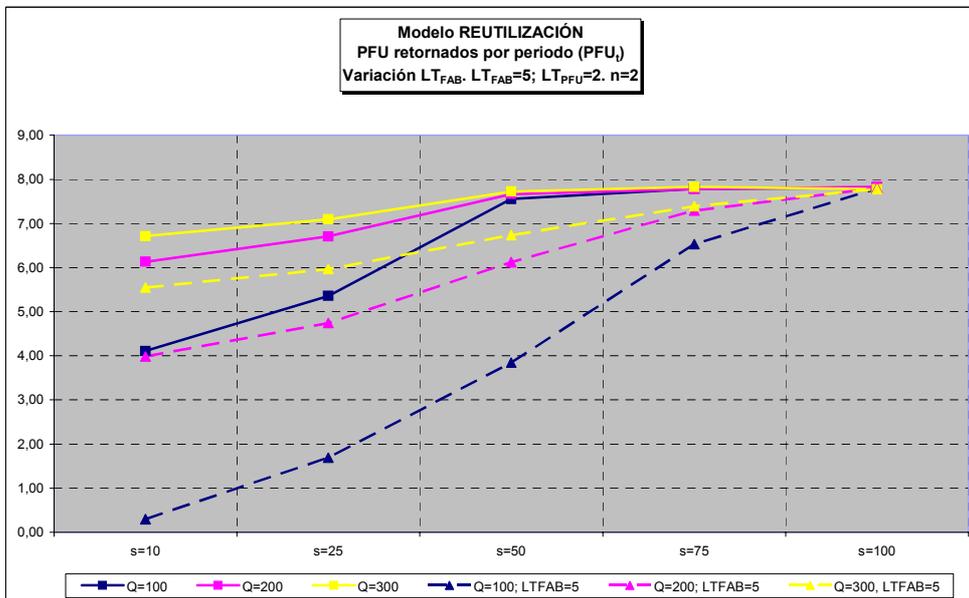


Gráfico 2.3.b: PFU_t . Variación en LT_{PFU}

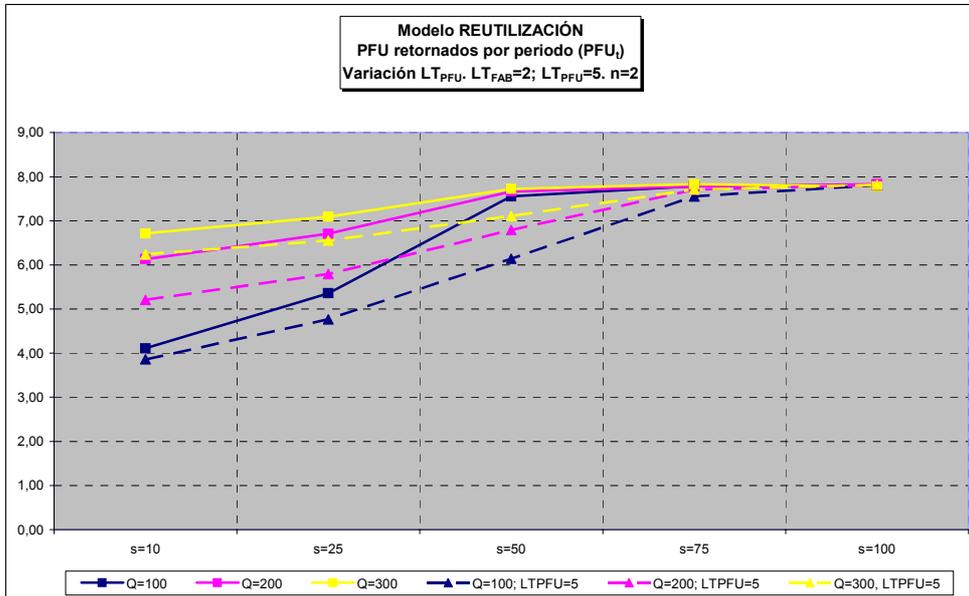


Gráfico 2.3.c: PFU_t . Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU}

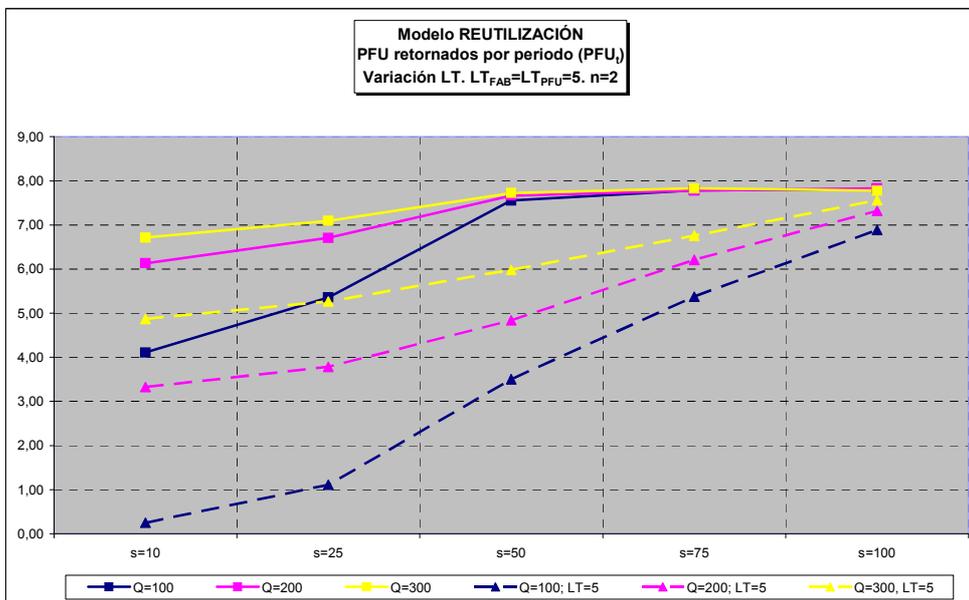


Gráfico 2.3.d: PFU_t . Variación en tiempo de consumo ($n=4$)

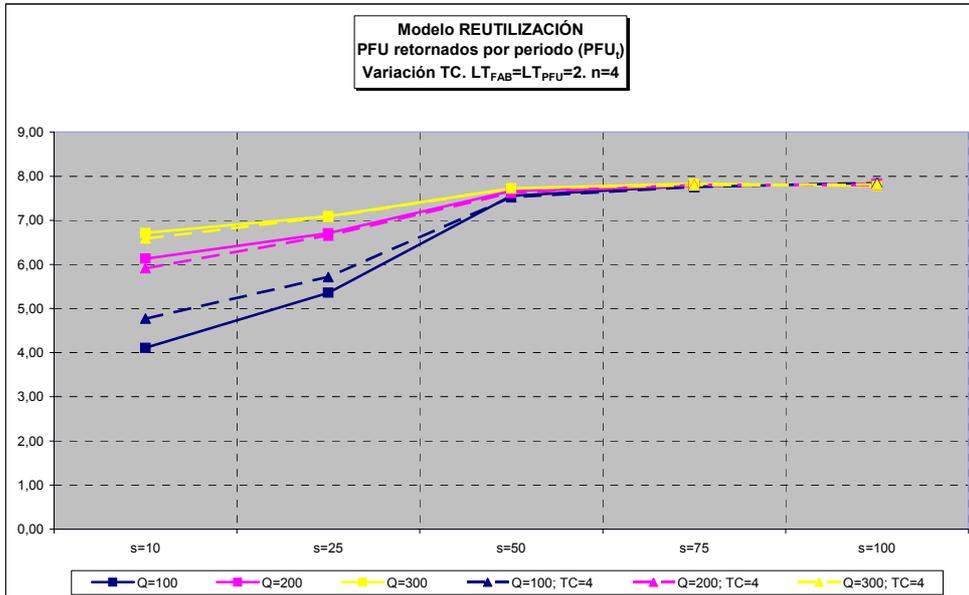


Gráfico 2.3.e: PFU_t . Variación en tiempo de consumo ($n=8$)

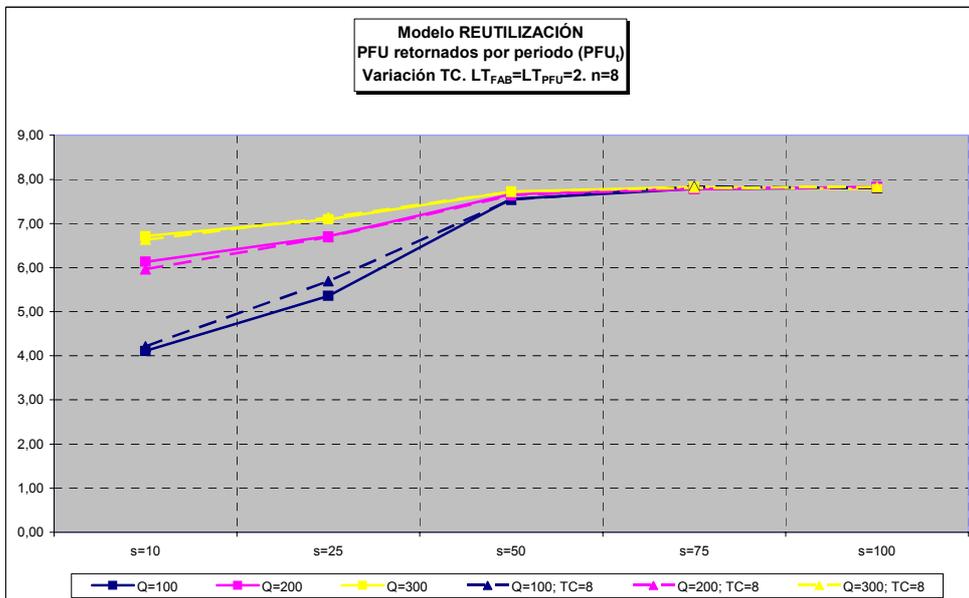


Gráfico 2.3.f: PFU_t . Variación en la tasa de retorno PFU ($p=80\%$)

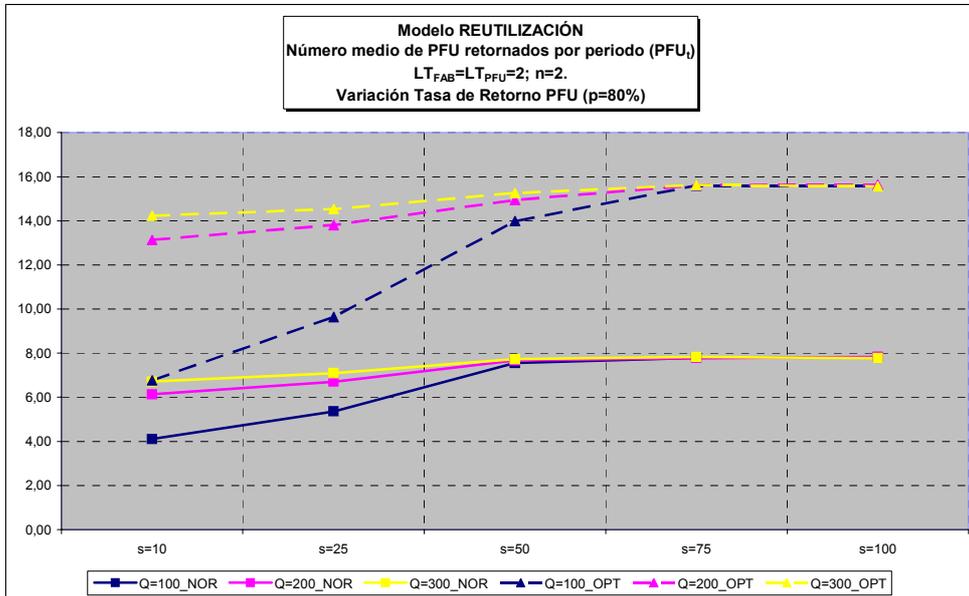


Gráfico 2.3.g: PFU_t . Variación en la tasa de retorno PFU ($p=20\%$)

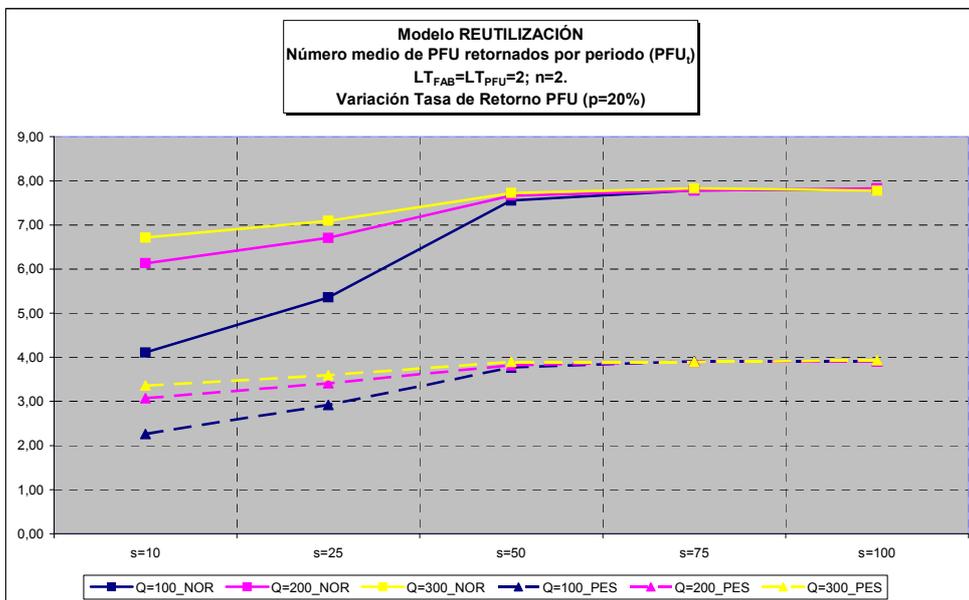


Gráfico 2.4.a: O_t . Variación en LT_{FAB}

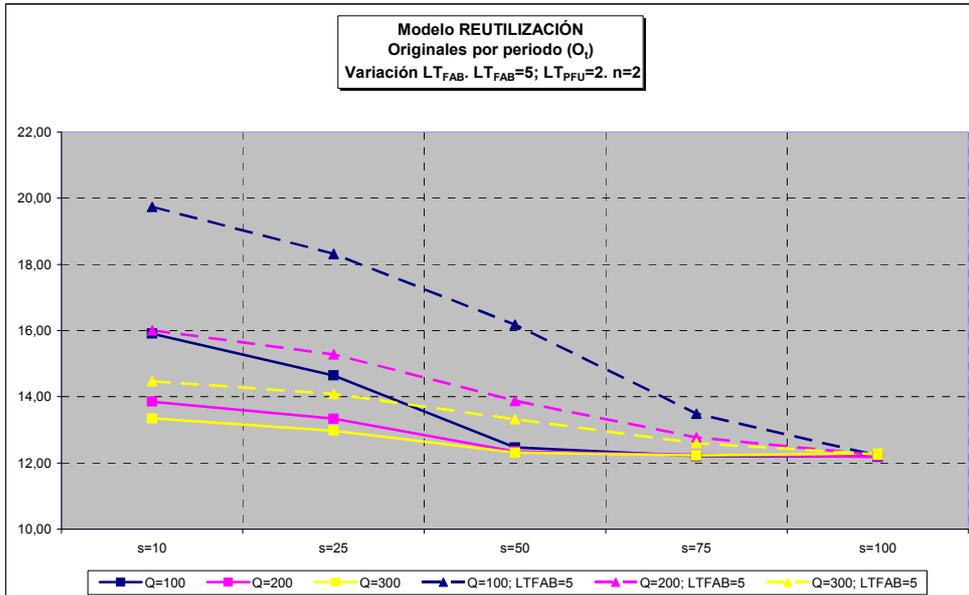


Gráfico 2.4.b: O_t . Variación en LT_{PFU}

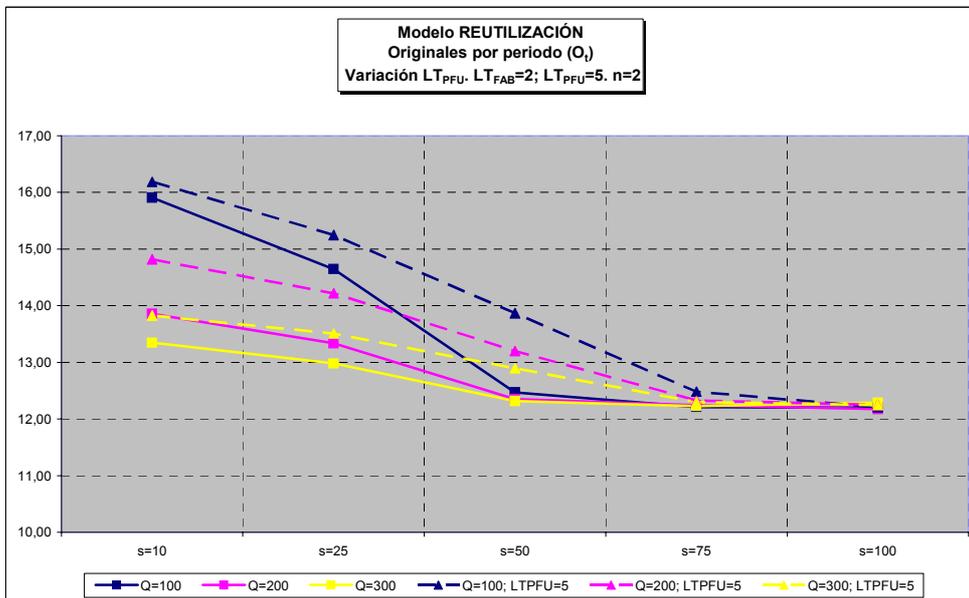


Gráfico 2.4.c: O_t . Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU}

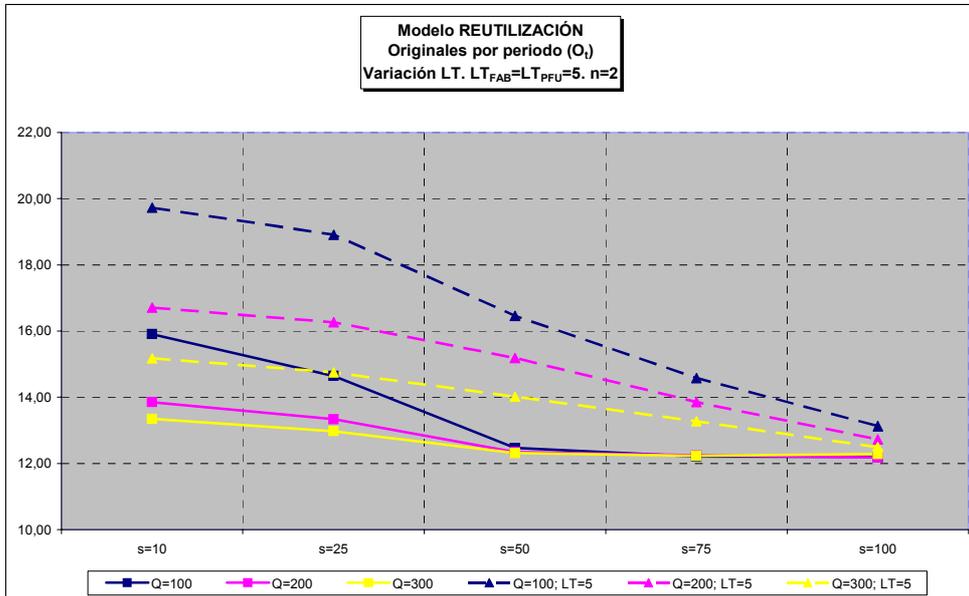


Gráfico 2.4.d: O_t . Variación en tiempo de consumo ($n=4$)

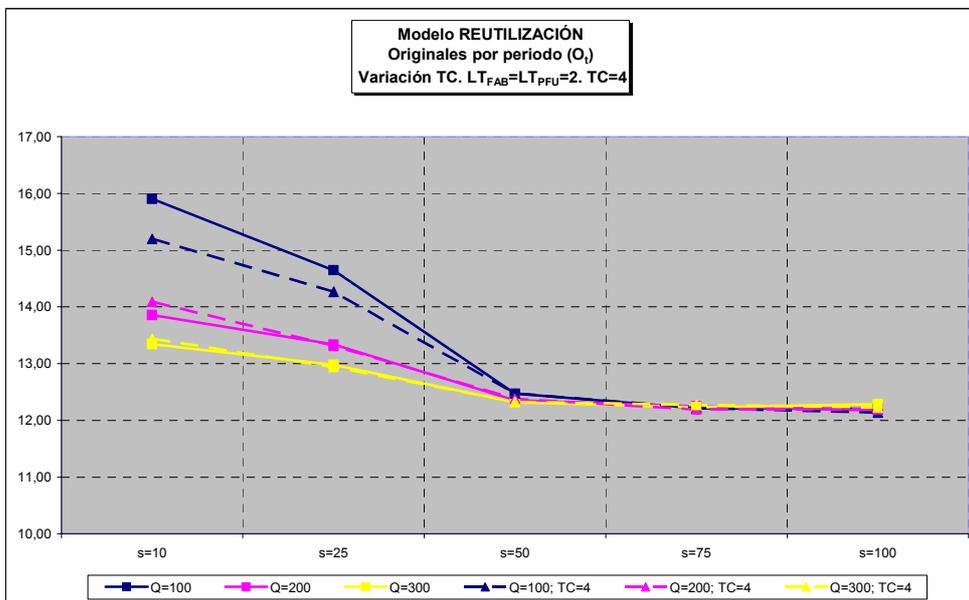


Gráfico 2.4.e: O_t . Variación en tiempo de consumo (n=8)

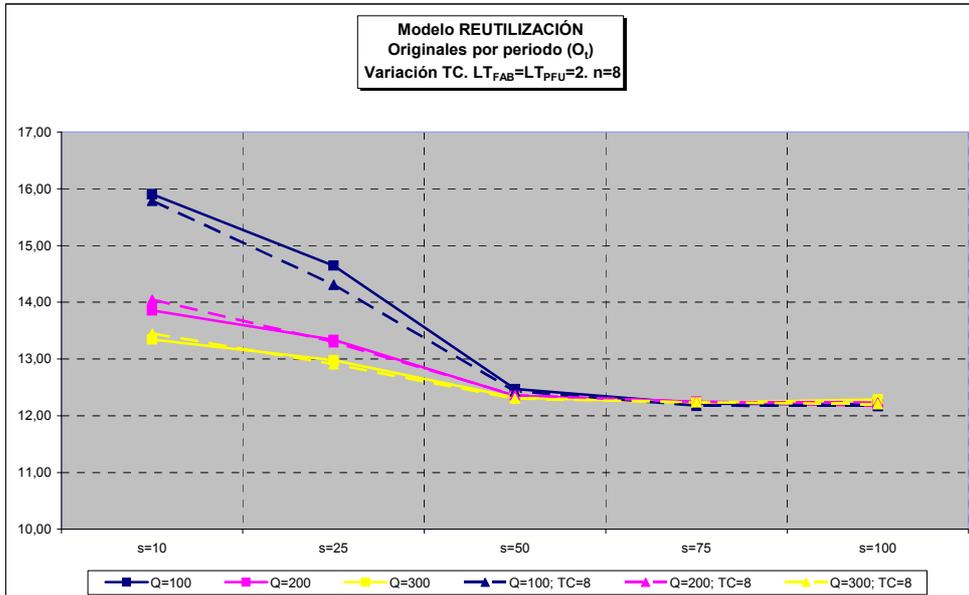


Gráfico 2.4.f: O_t . Variación en la tasa de retorno PFU (p=80%)

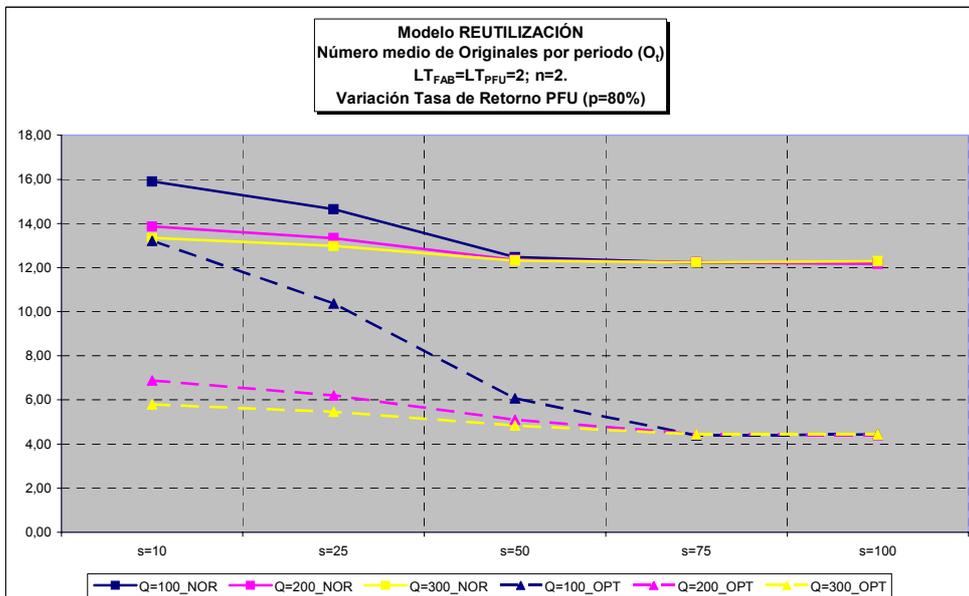


Gráfico 2.4.g: O_t . Variación en la tasa de retorno PFU ($p=20\%$)

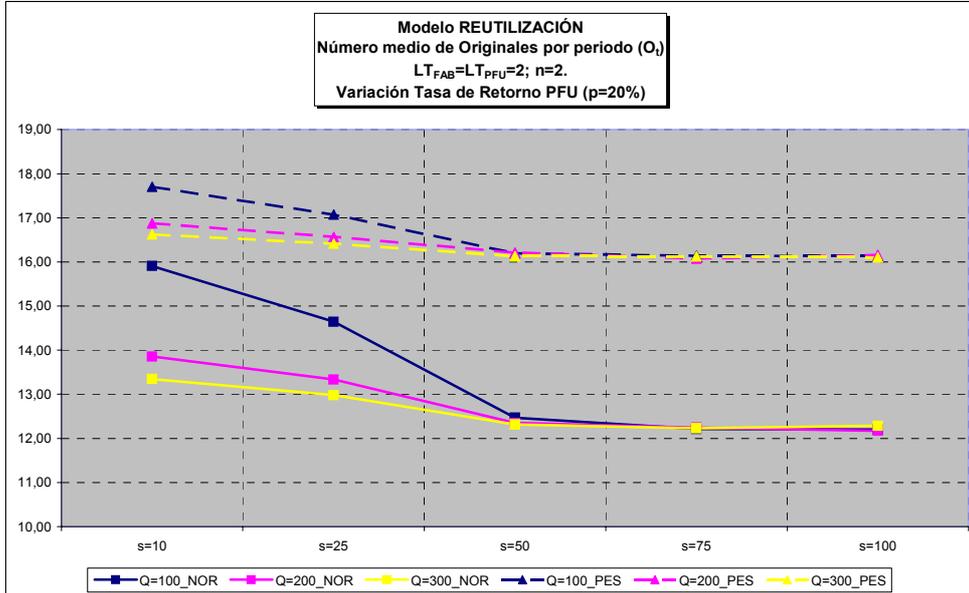


Gráfico 2.5.a: $P_{FAB,t}$. Variación en LT_{FAB}

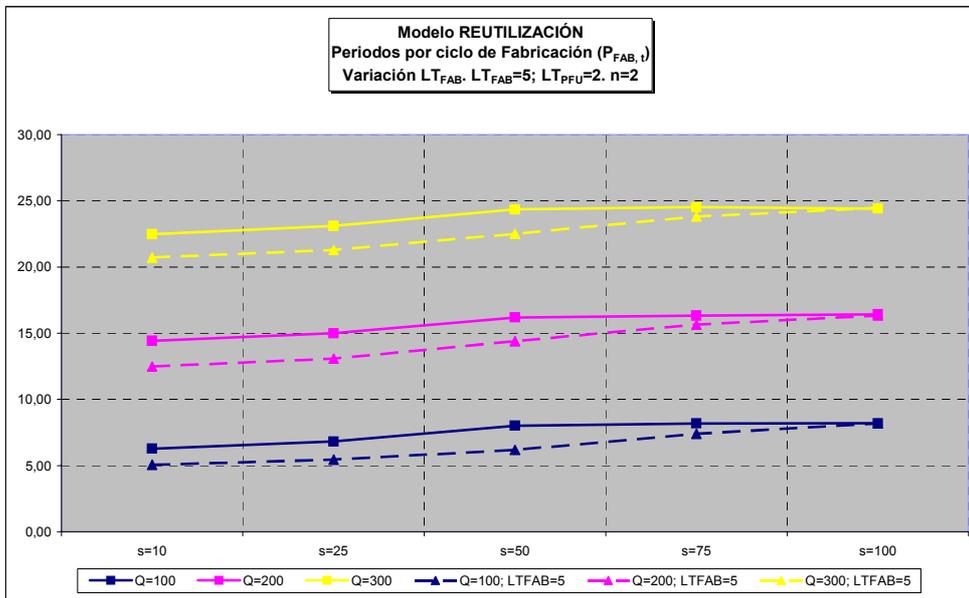


Gráfico 2.5.b: $P_{FAB,t}$. Variación en LT_{PFU}

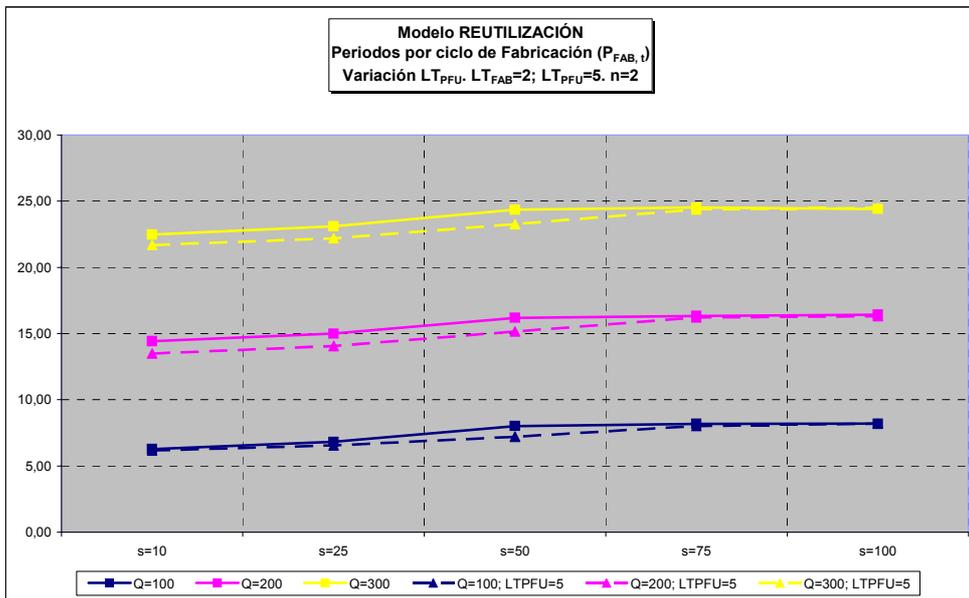


Gráfico 2.5.c: $P_{FAB,t}$. Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU}

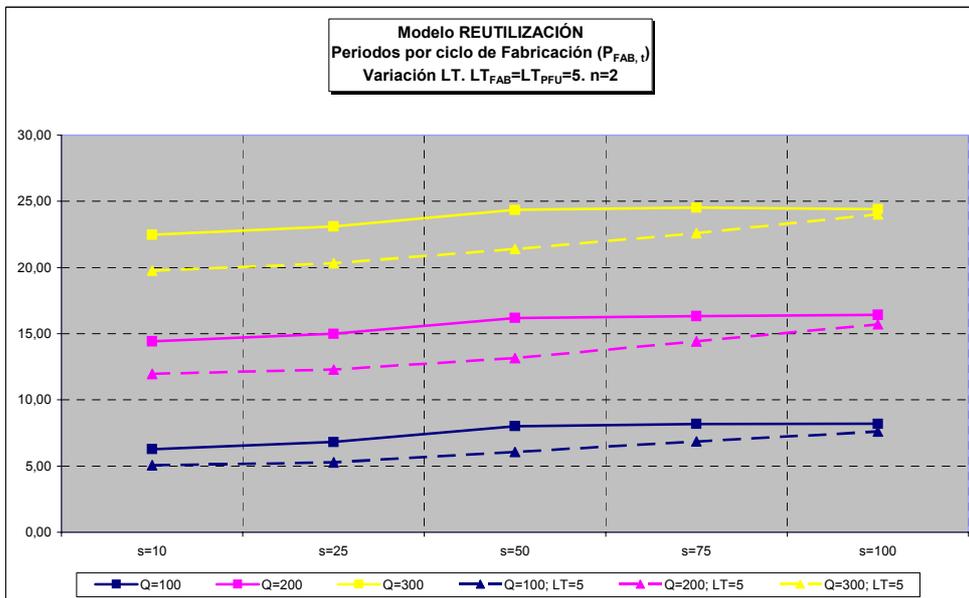


Gráfico 2.5.d: $P_{FAB,t}$. Variación en tiempo de consumo (n=4)

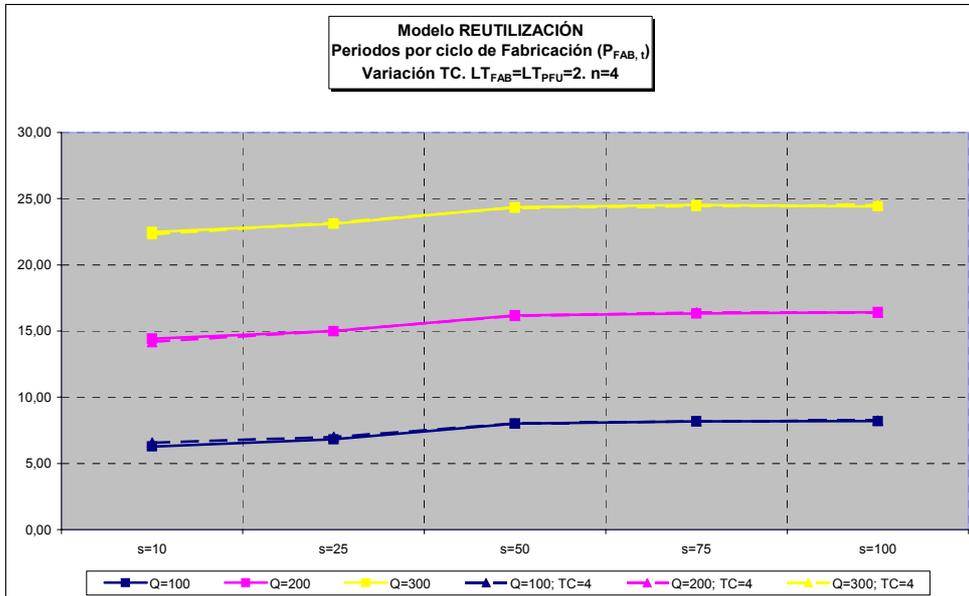


Gráfico 2.5.e: $P_{FAB,t}$. Variación en tiempo de consumo (n=8)

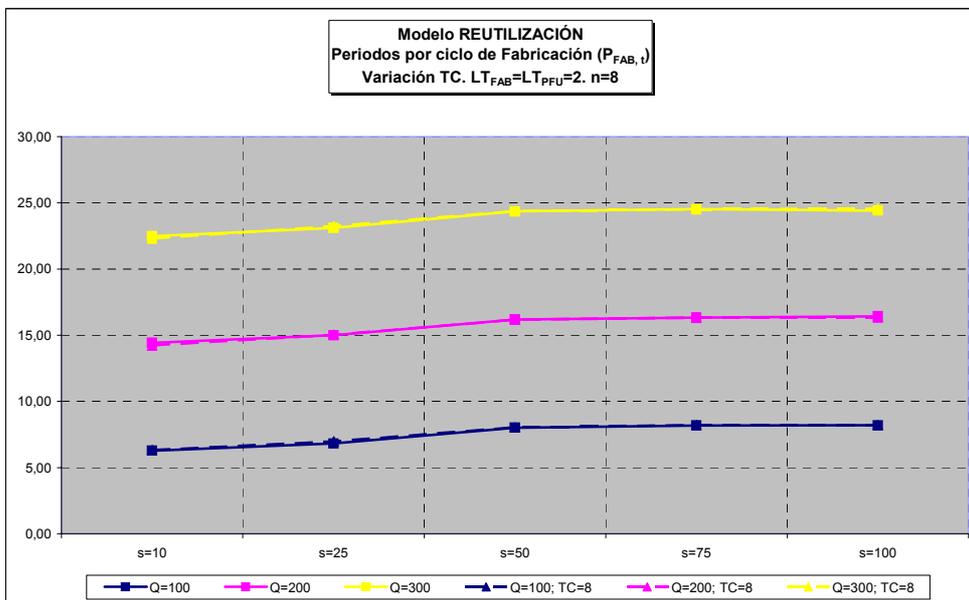


Gráfico 2.5.f: $P_{FAB,t}$. Variación en tasa de retorno de PFU ($p=80\%$)

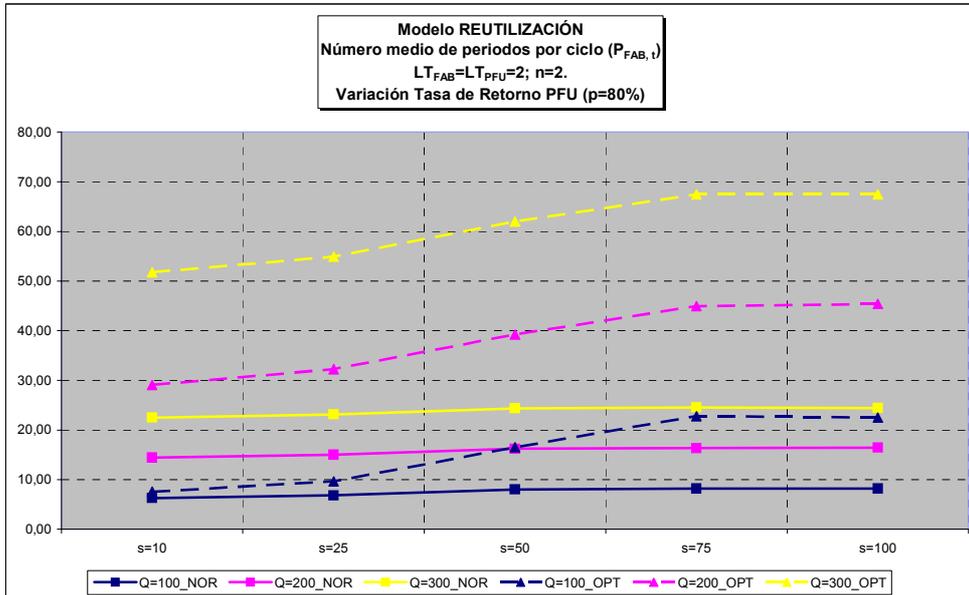
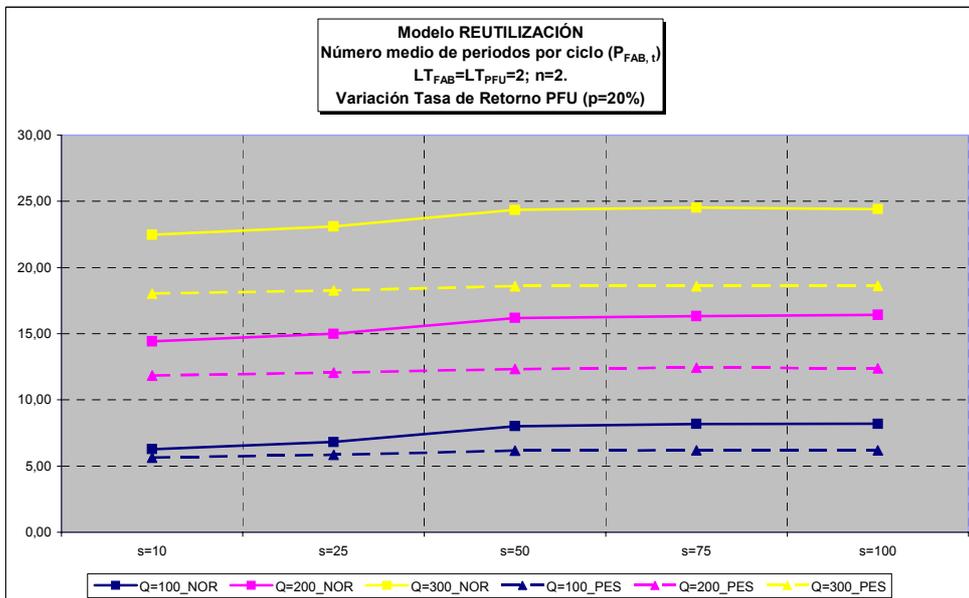


Gráfico 2.5.g: $P_{FAB,t}$. Variación en tasa de retorno de PFU ($p=20\%$)



2. Modelo Refabricación.

Gráfico 3.1.a: $S_{FAB,t}$ Variación en LT_{FAB} .

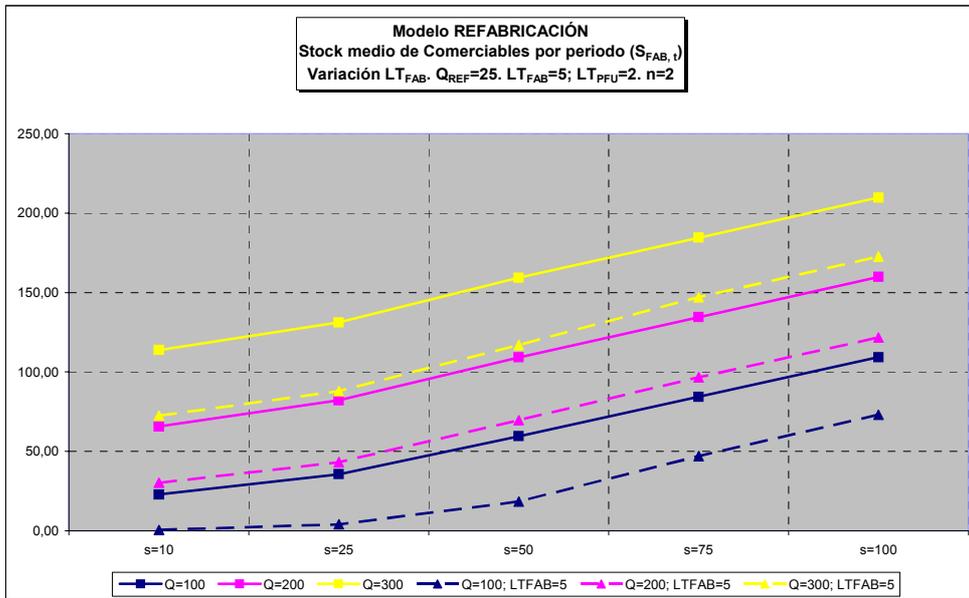


Gráfico 3.1.b: $S_{FAB,t}$ Variación en LT_{PFU} .

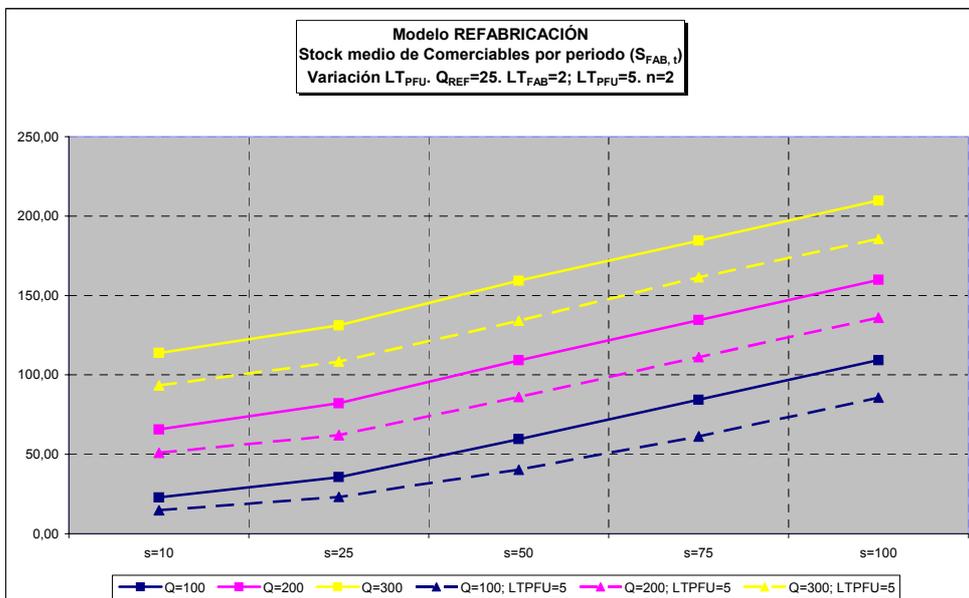


Gráfico 3.1.c: $S_{FAB, t}$. Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

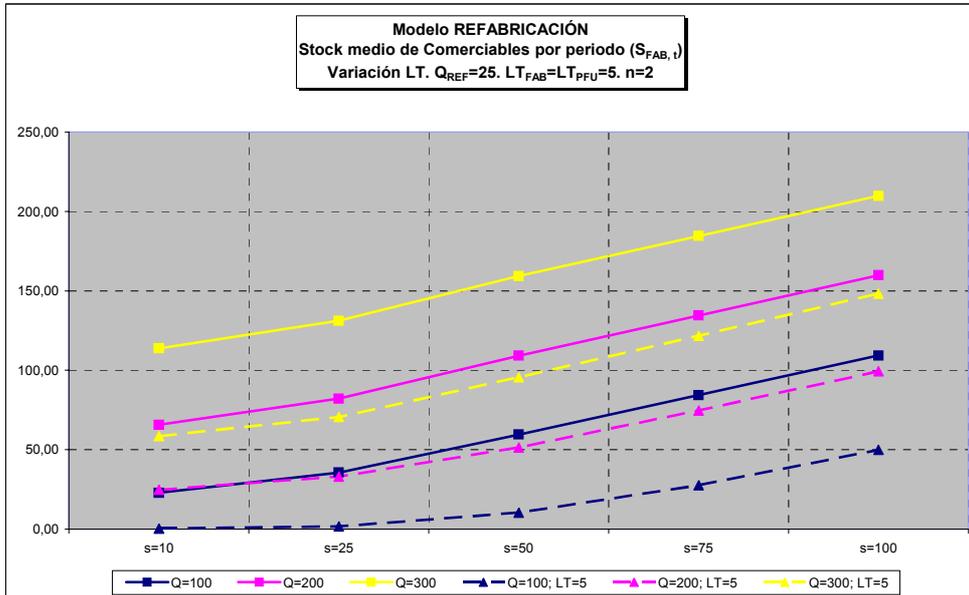


Gráfico 3.1.d: $S_{FAB, t}$. Variación en Q_{REF} .

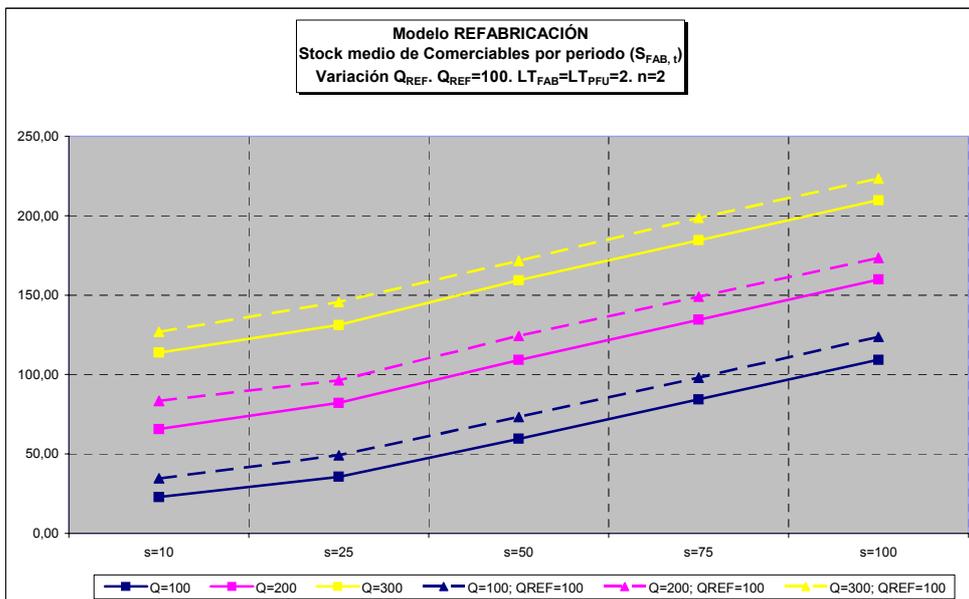


Gráfico 3.1.e: $S_{FAB,t}$. Variación en el tiempo de consumo (n=4).

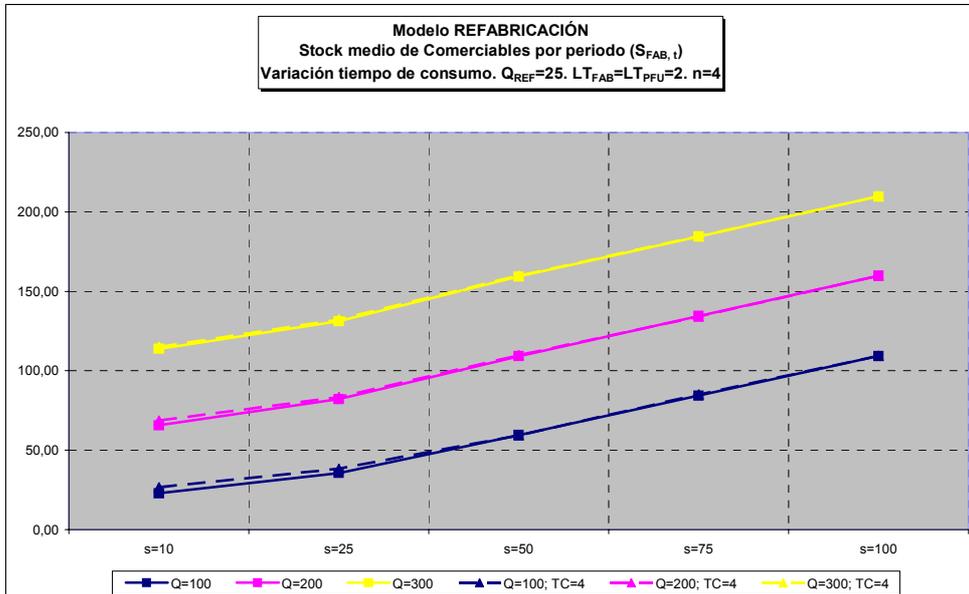


Gráfico 3.1.f: $S_{FAB,t}$. Variación en el tiempo de consumo (n=8).

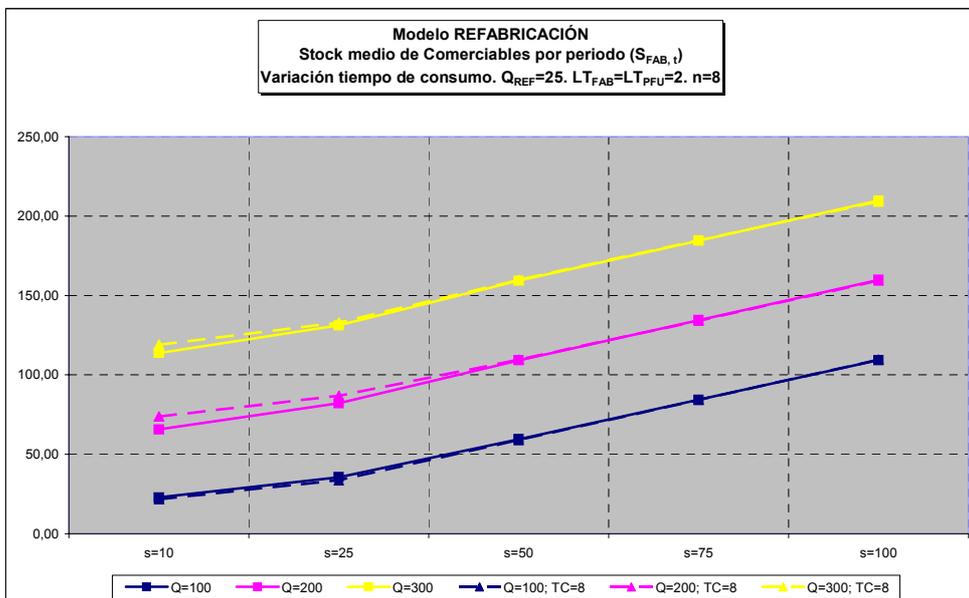


Gráfico 3.1.g: $S_{FAB,t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=80\%$).

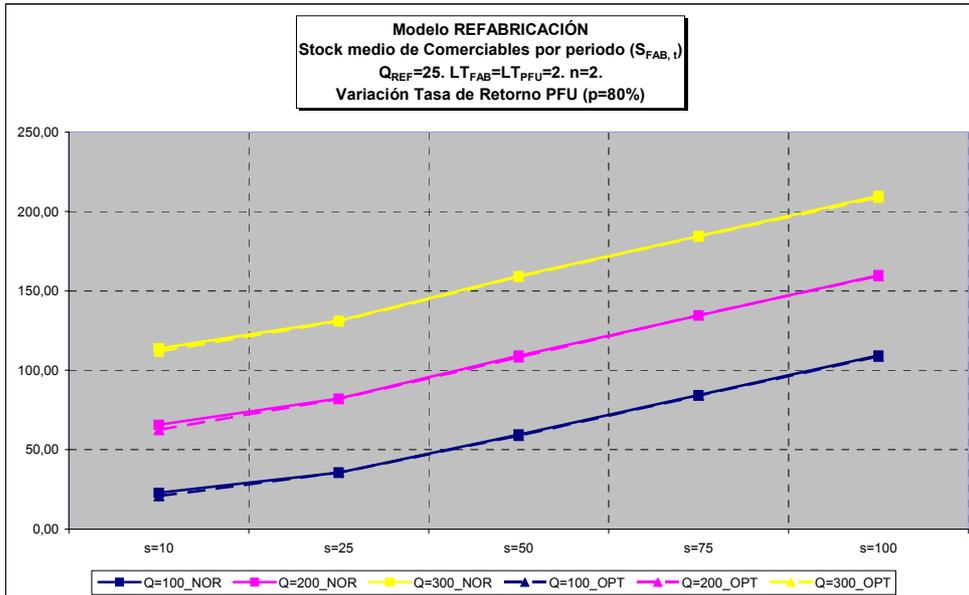


Gráfico 3.1.h: $S_{FAB,t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=20\%$).

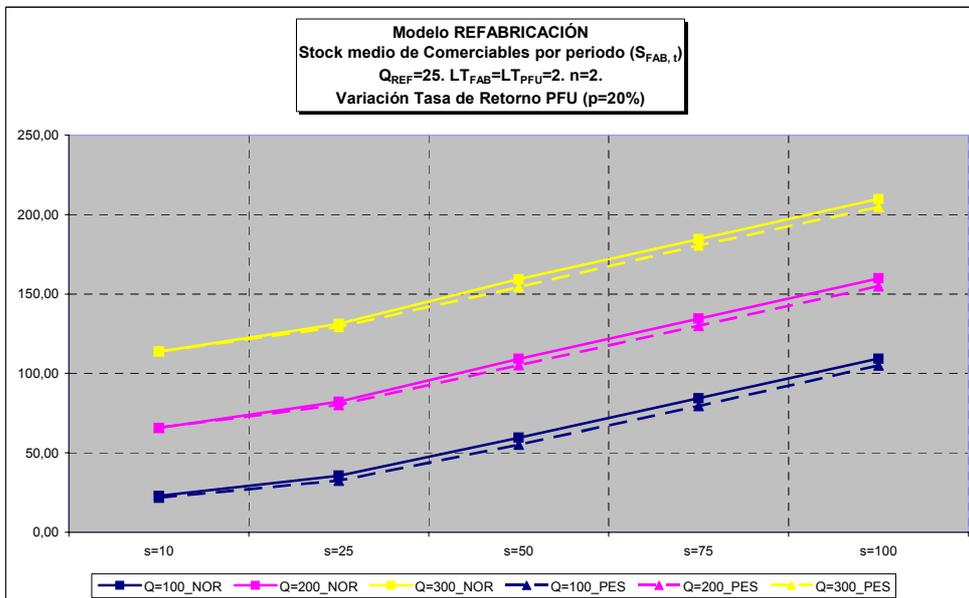


Gráfico 3.2.a: F_t . Variación en LT_{FAB} .

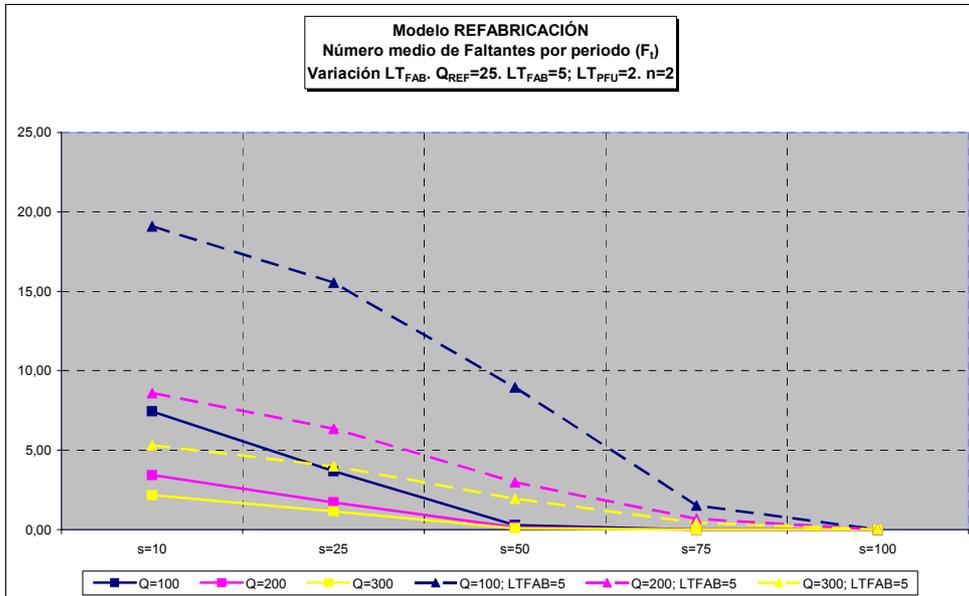


Gráfico 3.2.b: F_t . Variación en LT_{PFU} .

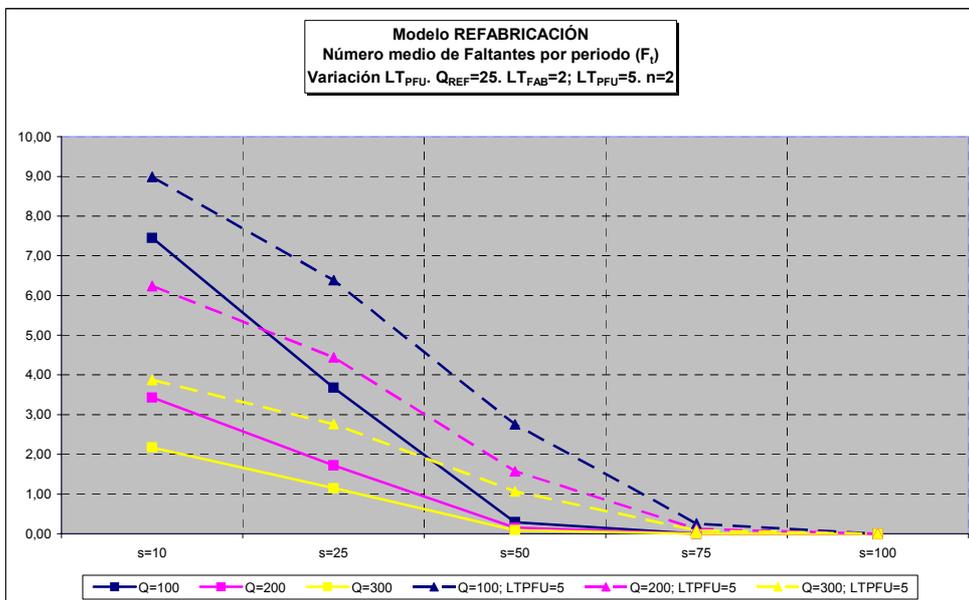


Gráfico 3.2.c: F_t . Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

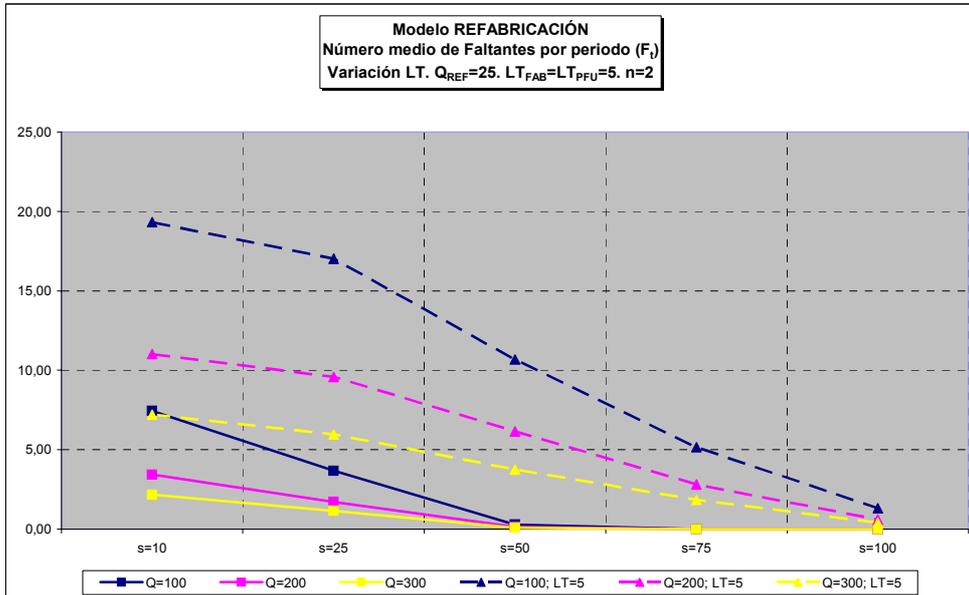


Gráfico 3.2.d: F_t . Variación de Q_{REF} .

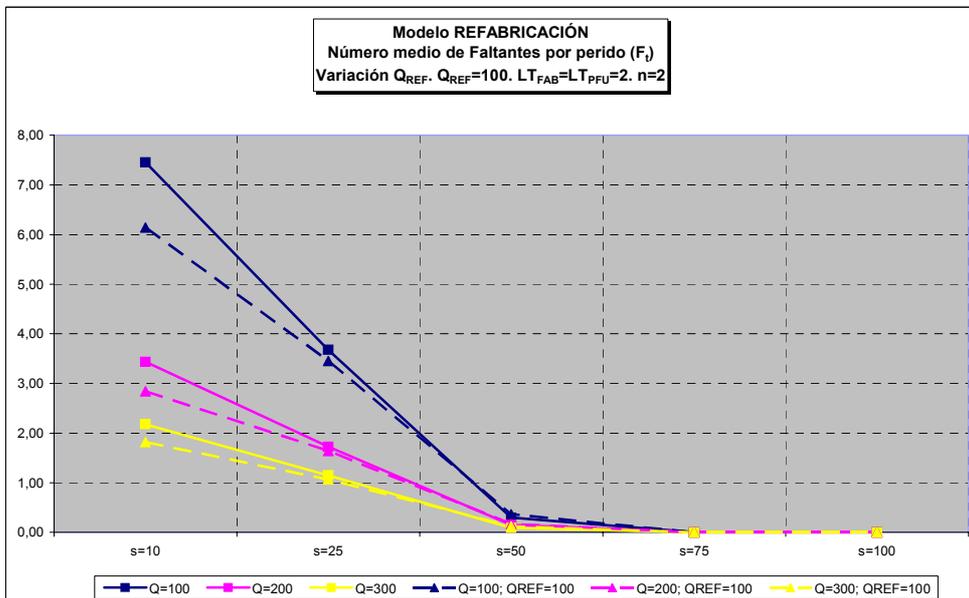


Gráfico 3.2.e: F_t . Variación en el tiempo de consumo ($n=4$).

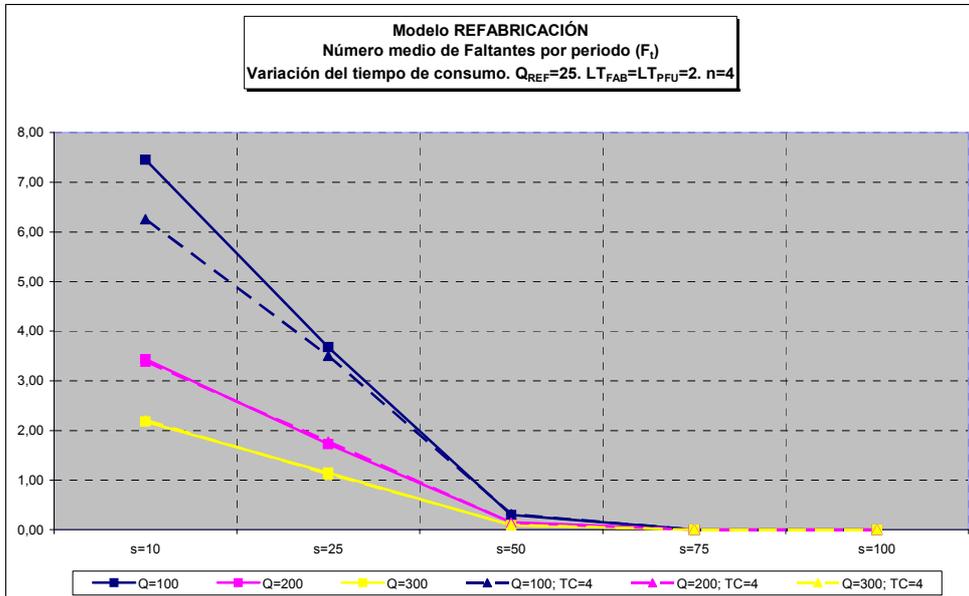


Gráfico 3.2.f: F_t . Variación en el tiempo de consumo ($n=8$).

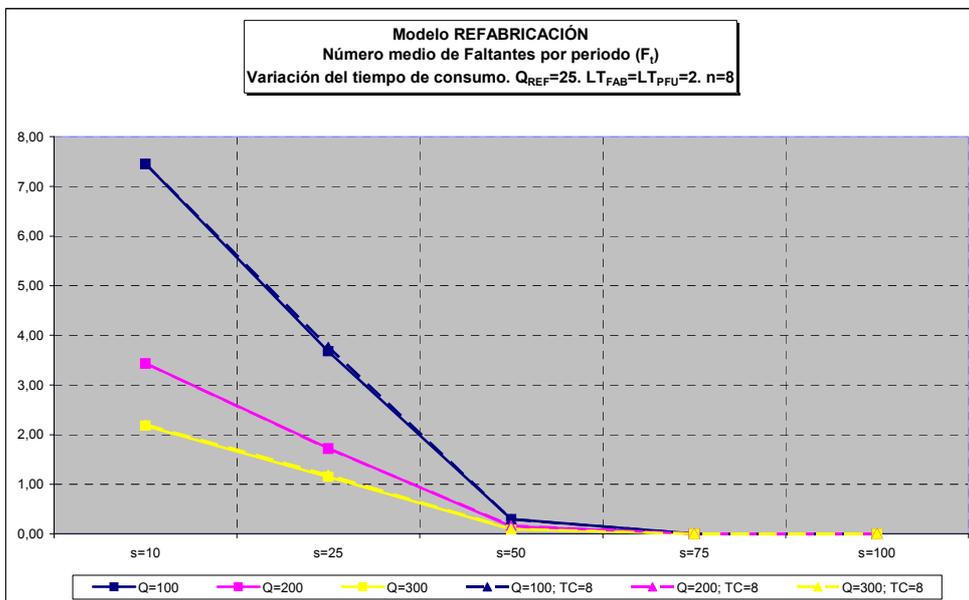


Gráfico 3.2.g: F_t . Variación tasa de retorno PFU ($p=80\%$).

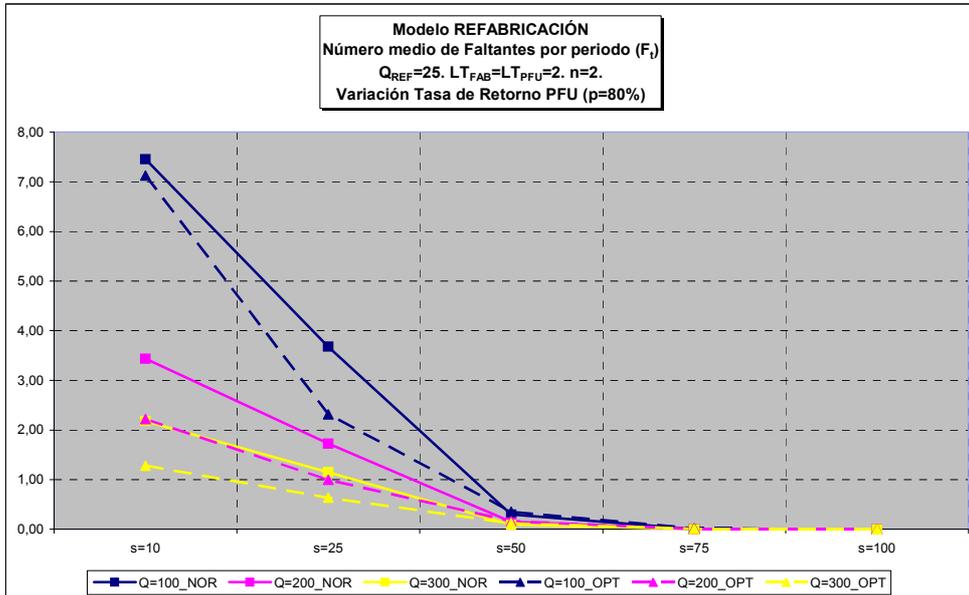


Gráfico 3.2.h: F_t . Variación tasa de retorno PFU ($p=20\%$).

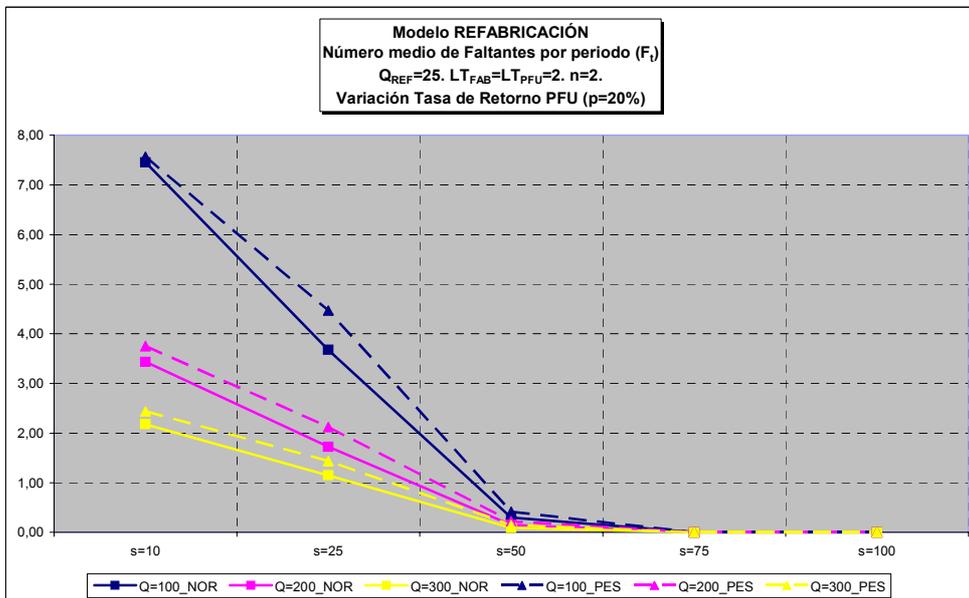


Gráfico 3.3.a: PFU_t . Variación en LT_{FAB} .

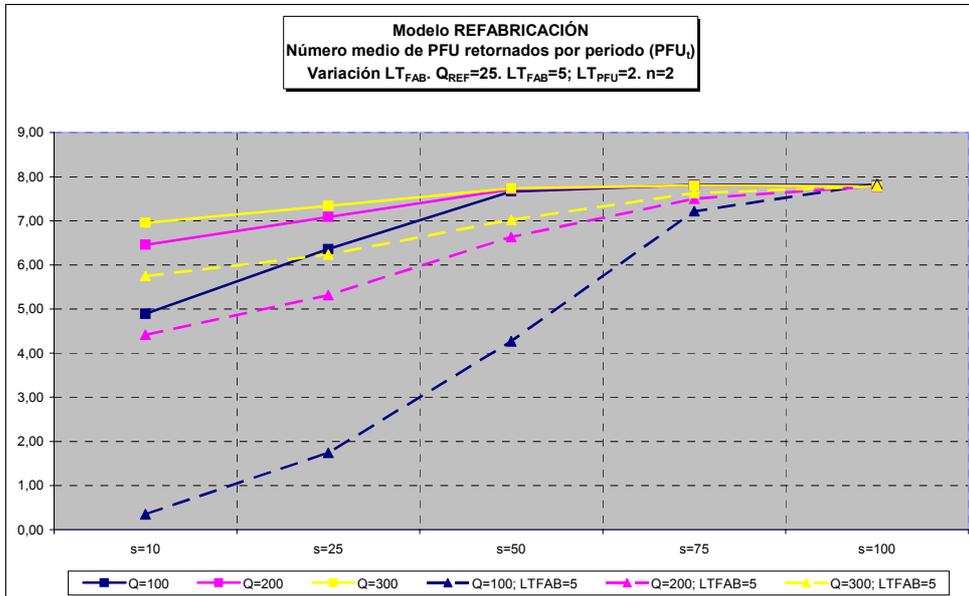


Gráfico 3.3.b: PFU_t . Variación en LT_{PFU} .

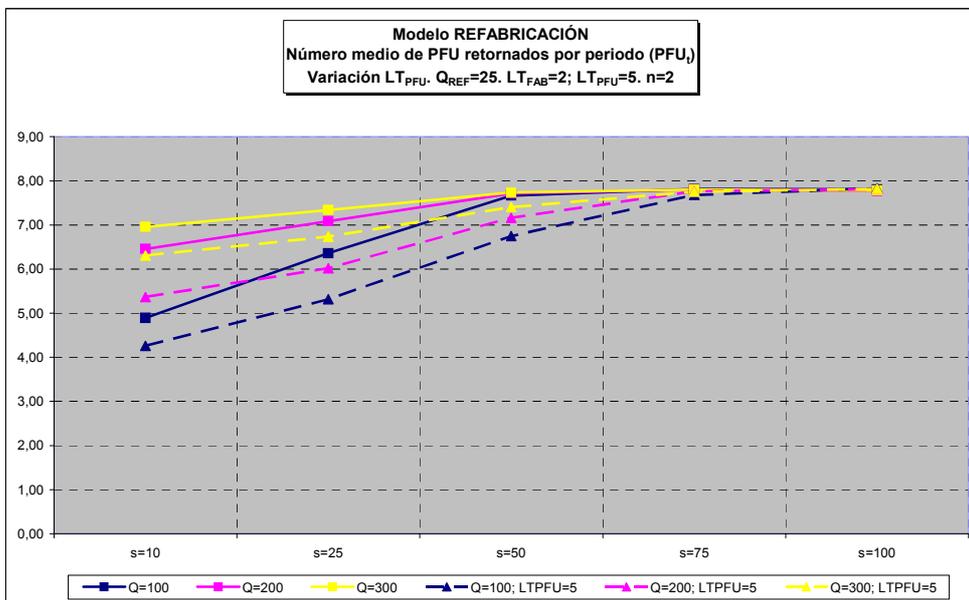


Gráfico 3.3.c: PFU_t . Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

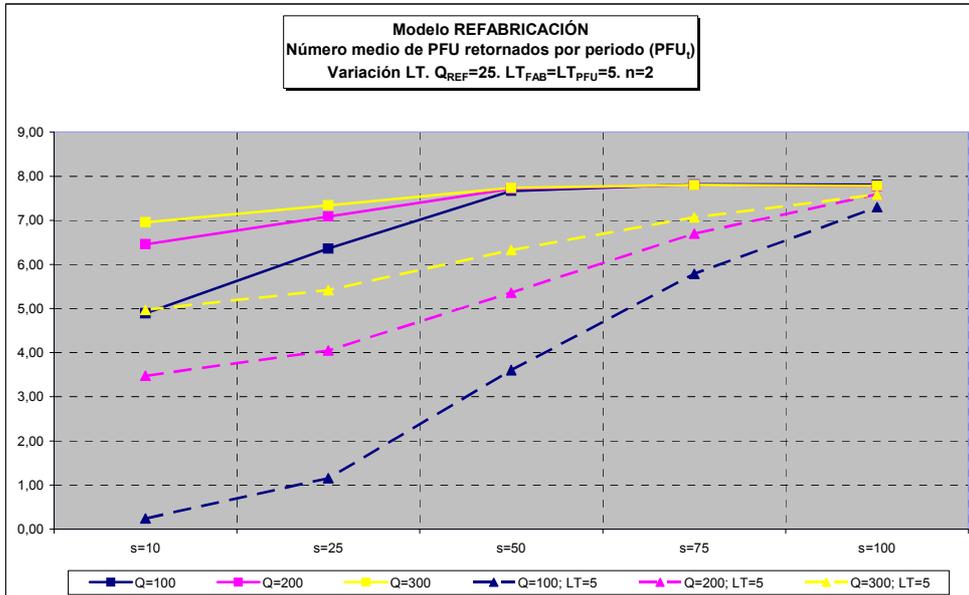


Gráfico 3.3.d: PFU_t . Variación en Q_{REF} .

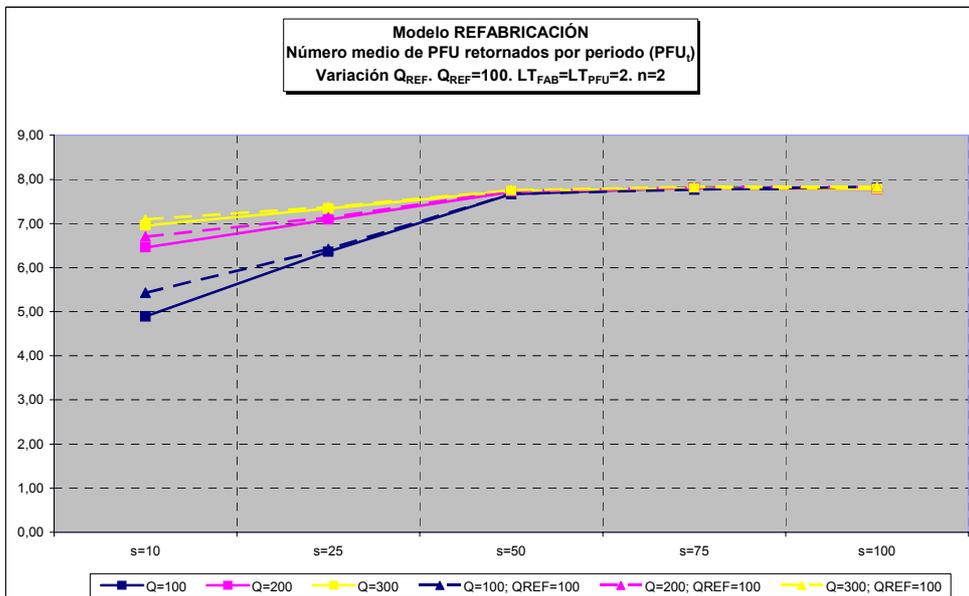


Gráfico 3.3.e: PFU_t . Variación del tiempo de consumo ($n=4$).

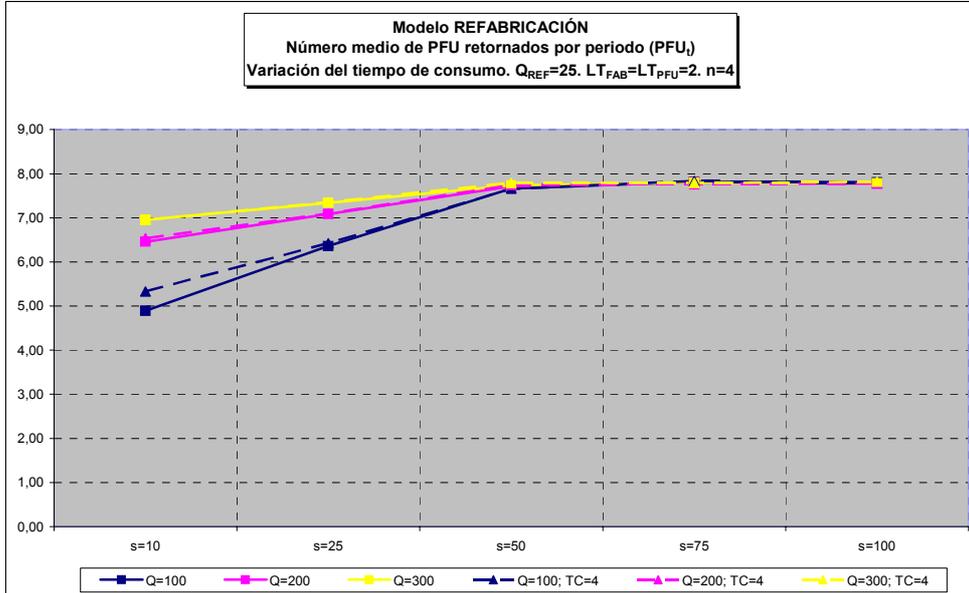


Gráfico 3.3.f: PFU_t . Variación del tiempo de consumo ($n=8$).

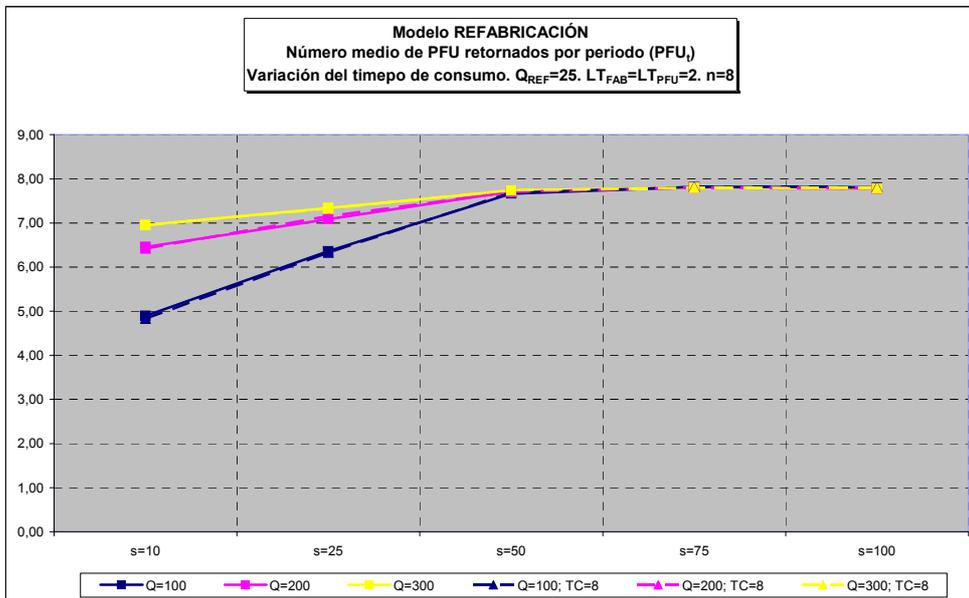


Gráfico 3.3.g: PFU_t. Variación tasa de retorno de PFU (p=80%)

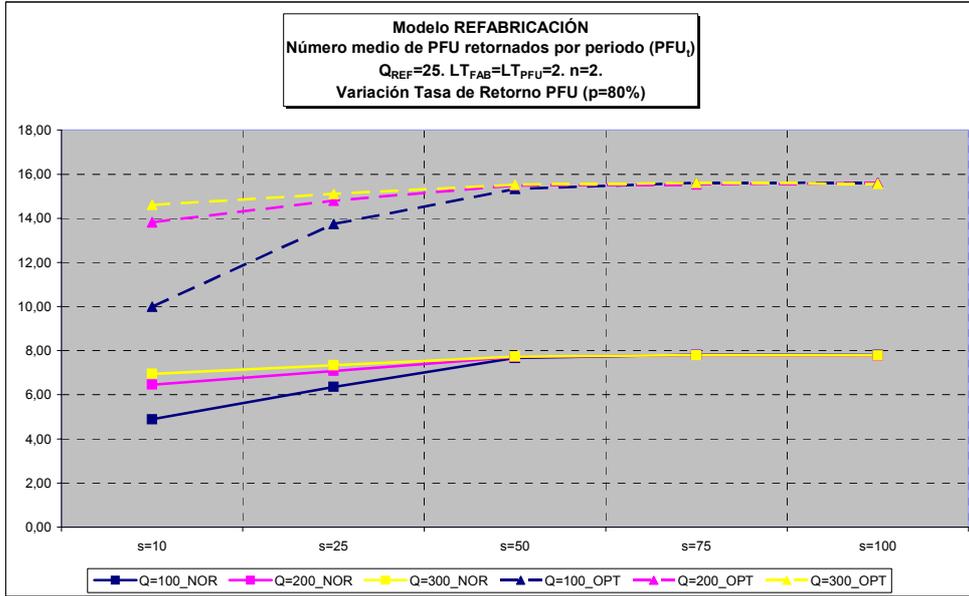


Gráfico 3.3.h: PFU_t. Variación tasa de retorno de PFU (p=20%)

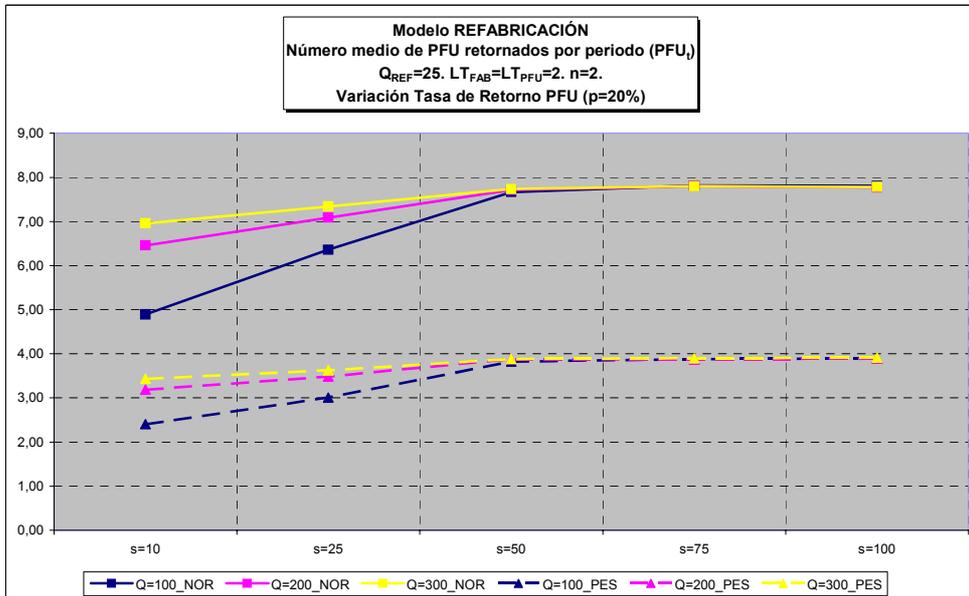


Gráfico 3.4.a: $S_{PFU,t}$, Variación en LT_{FAB} .

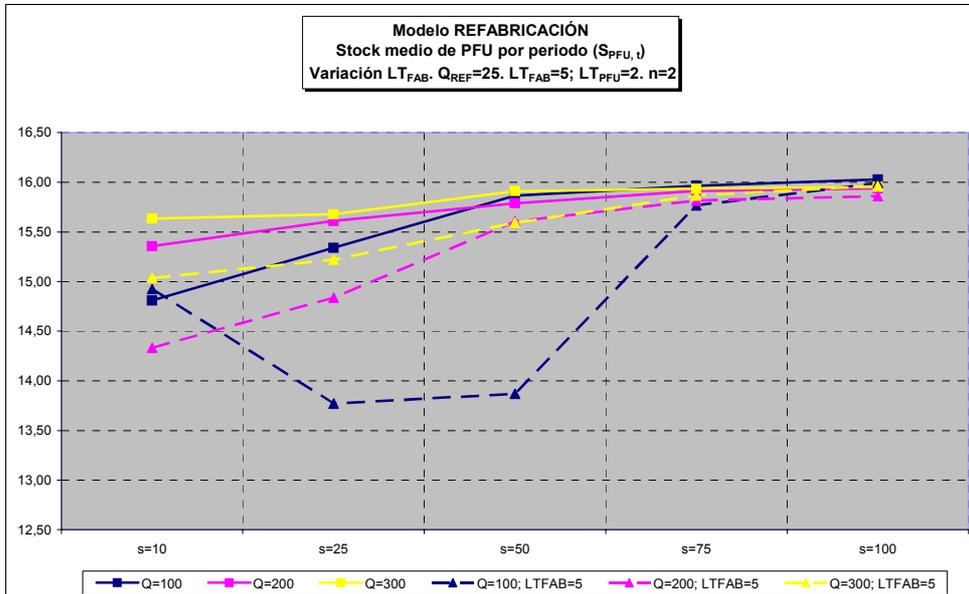


Gráfico 3.4.b: $S_{PFU,t}$, Variación en LT_{PFU} .

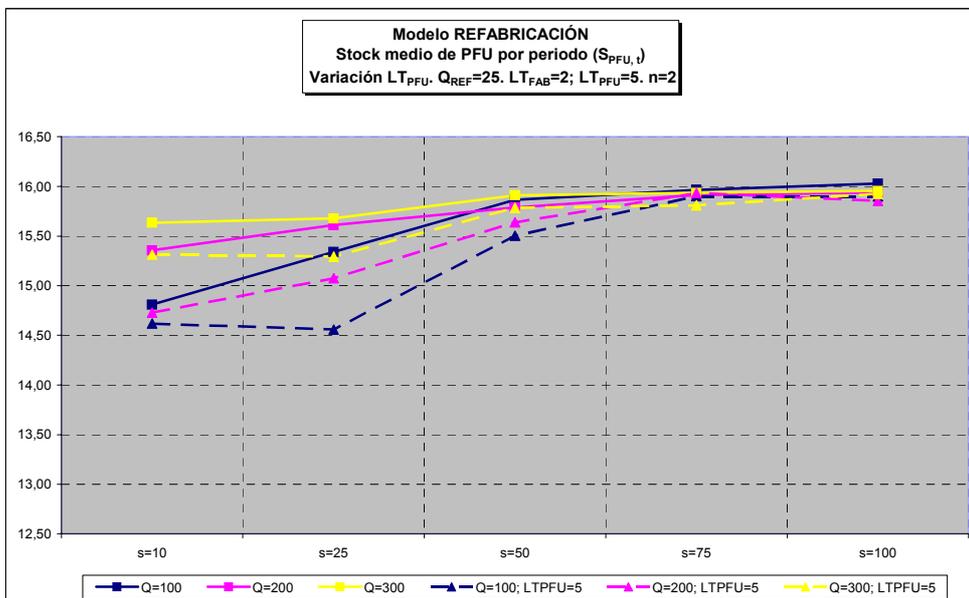


Gráfico 3.4.c: $S_{PFU, t}$. Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

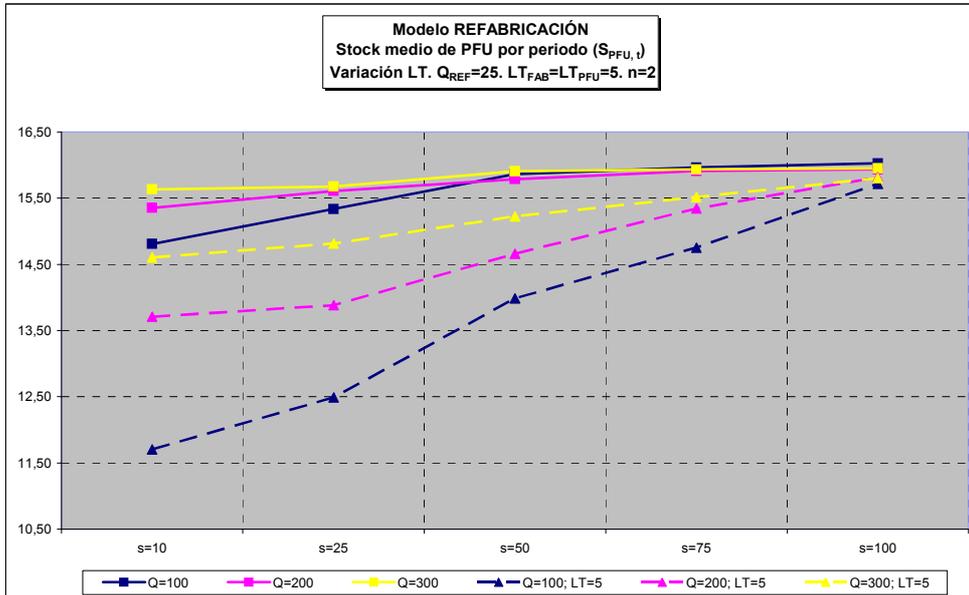


Gráfico 3.4.d: $S_{PFU, t}$. Variación en Q_{REF} .

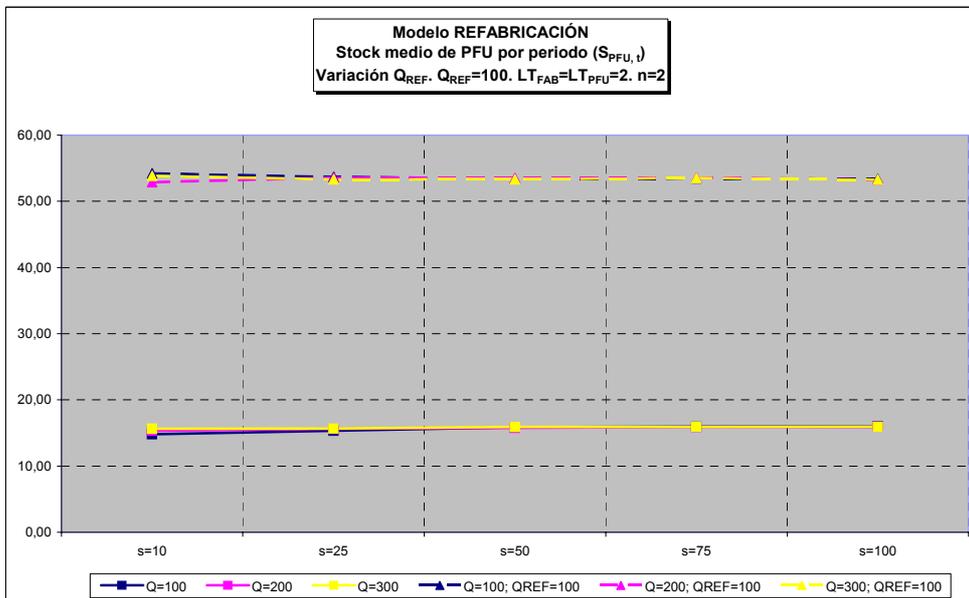


Gráfico 3.4.e: $S_{PFU,t}$. Variación del tiempo de consumo (n=4)

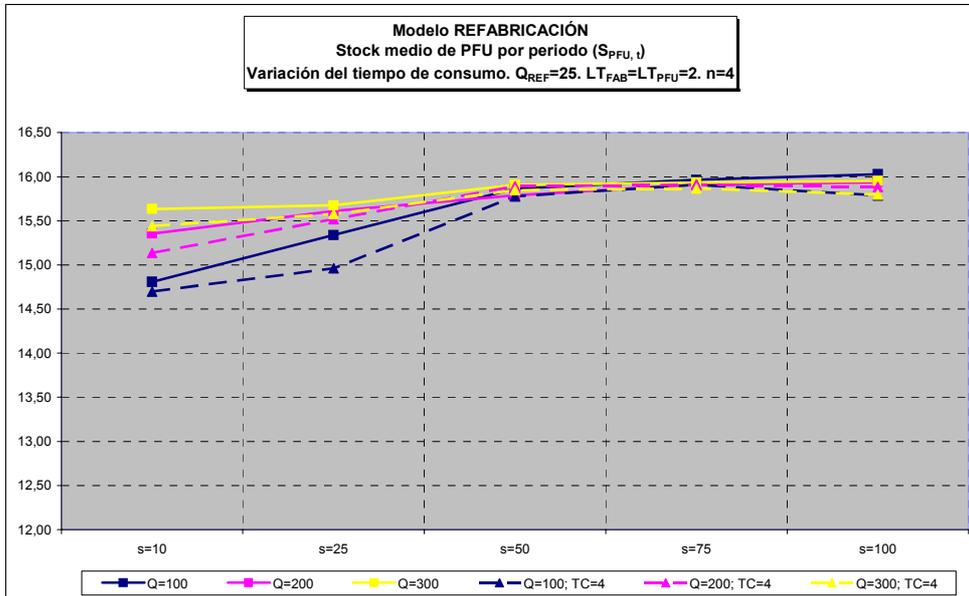


Gráfico 3.4.f: $S_{PFU,t}$. Variación del tiempo de consumo (n=8)

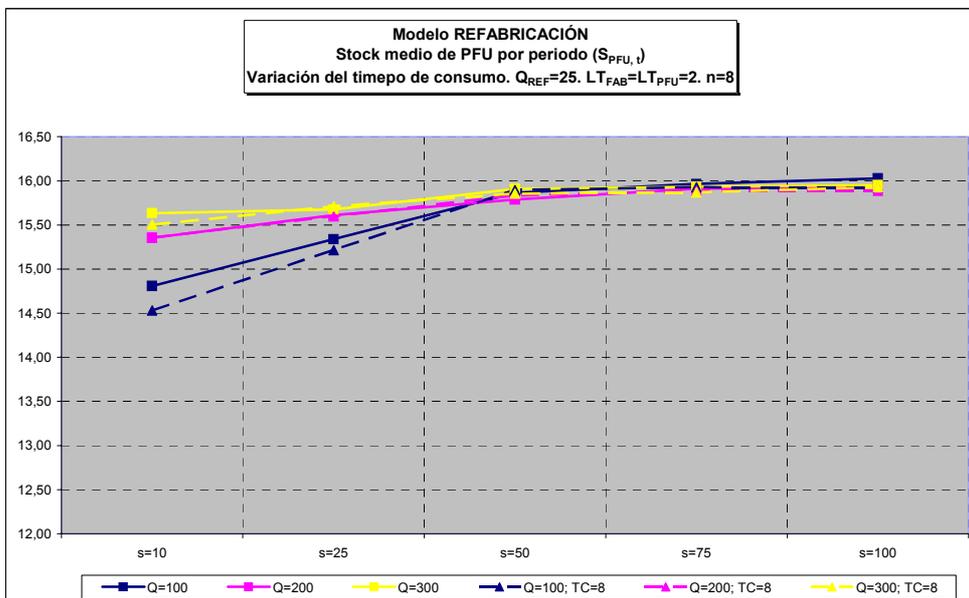


Gráfico 3.4.g: $S_{PFU,t}$. Variación tasa recuperación de PFU ($p=80\%$)

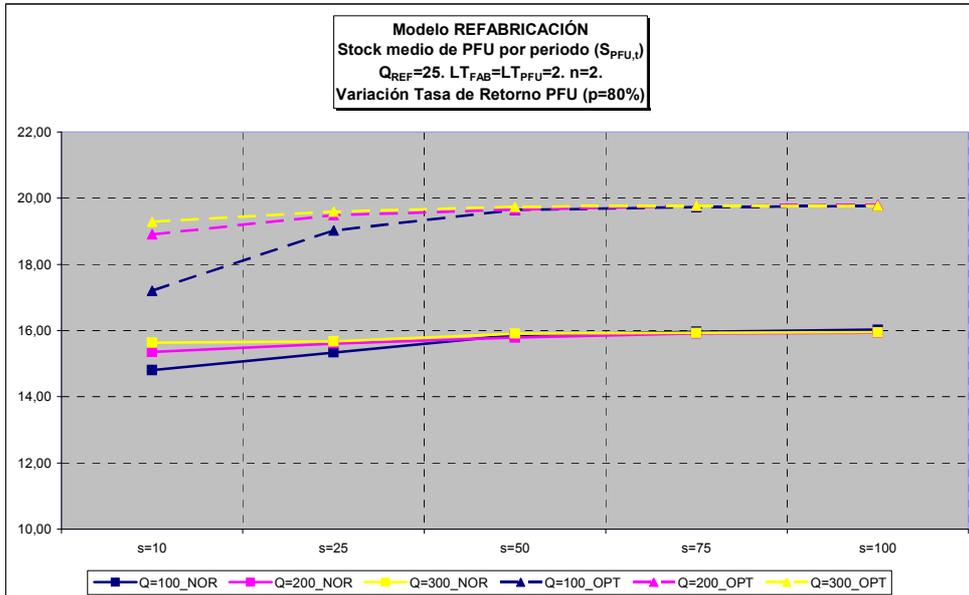


Gráfico 3.4.h: $S_{PFU,t}$. Variación tasa recuperación de PFU ($p=20\%$)

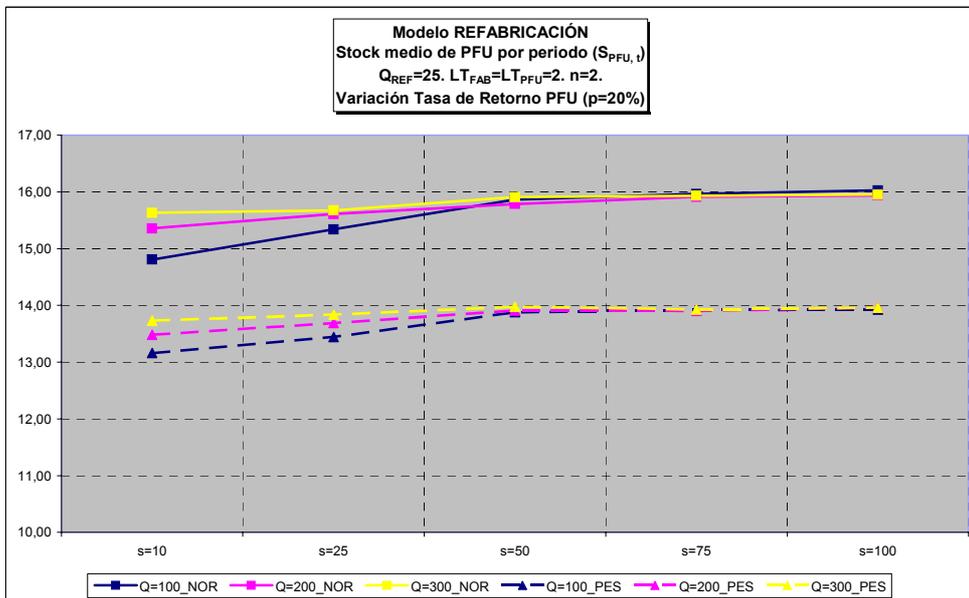


Gráfico 3.5.a: O_t . Variación en LT_{FAB} .

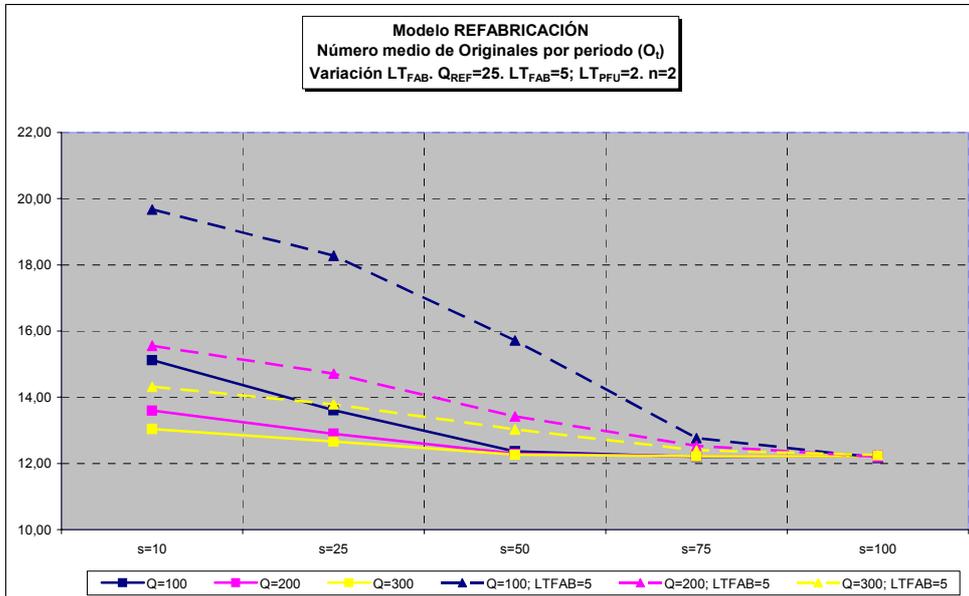


Gráfico 3.5.b: O_t . Variación en LT_{PFU} .

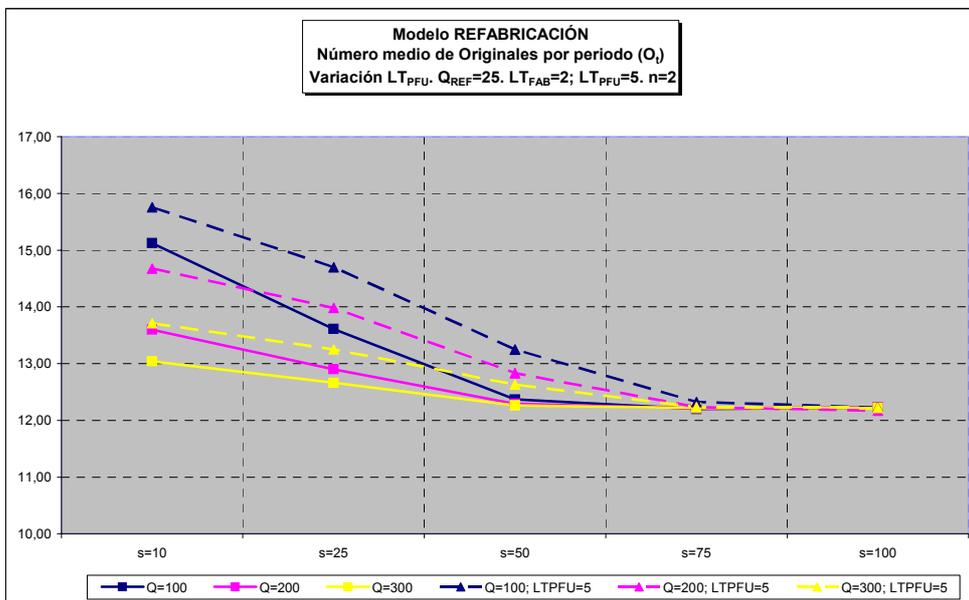


Gráfico 3.5.c: O_t . Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

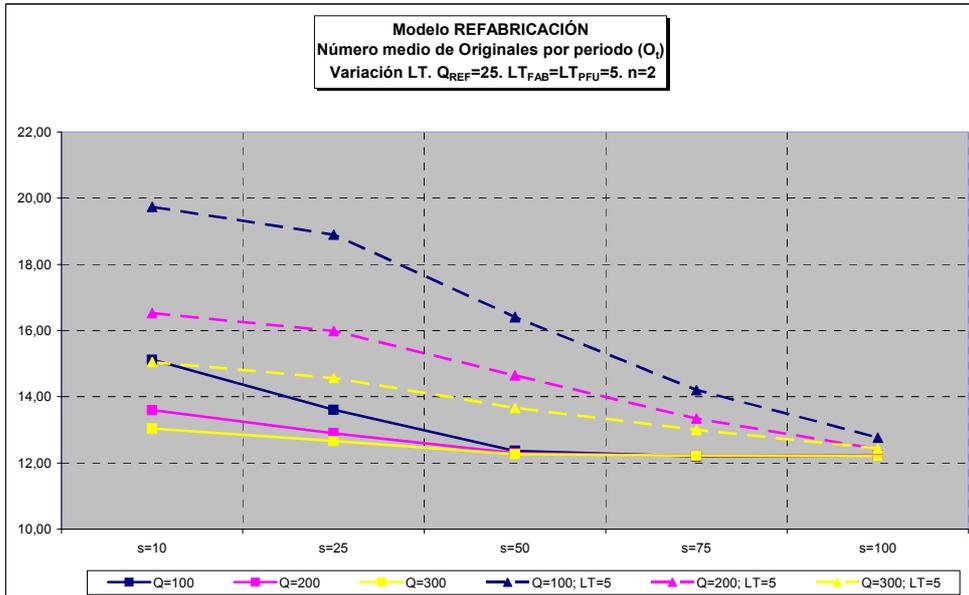


Gráfico 3.5.d: O_t . Variación en Q_{REF} .

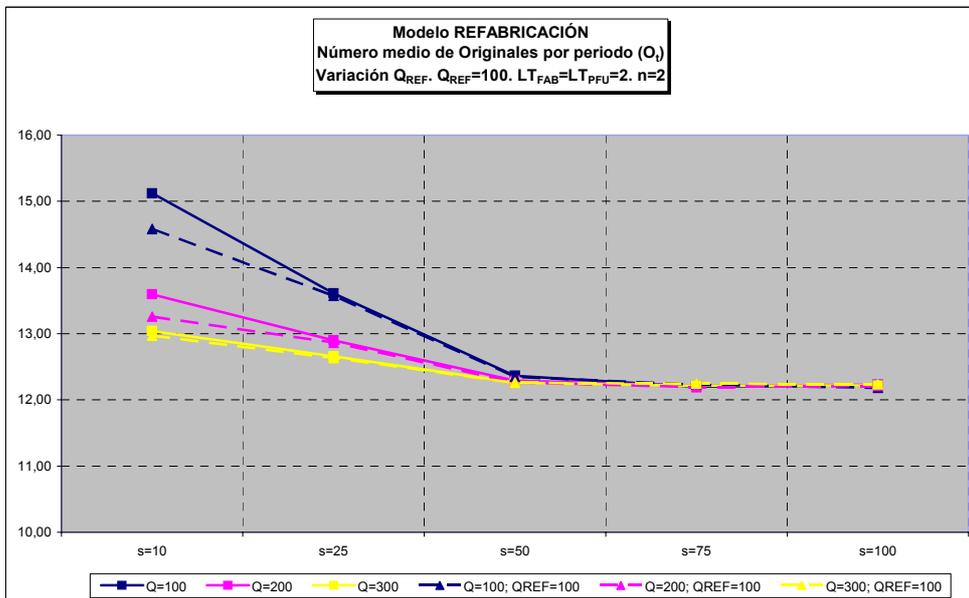


Gráfico 3.5.e: O_t . Variación en tiempo de consumo ($n=4$).

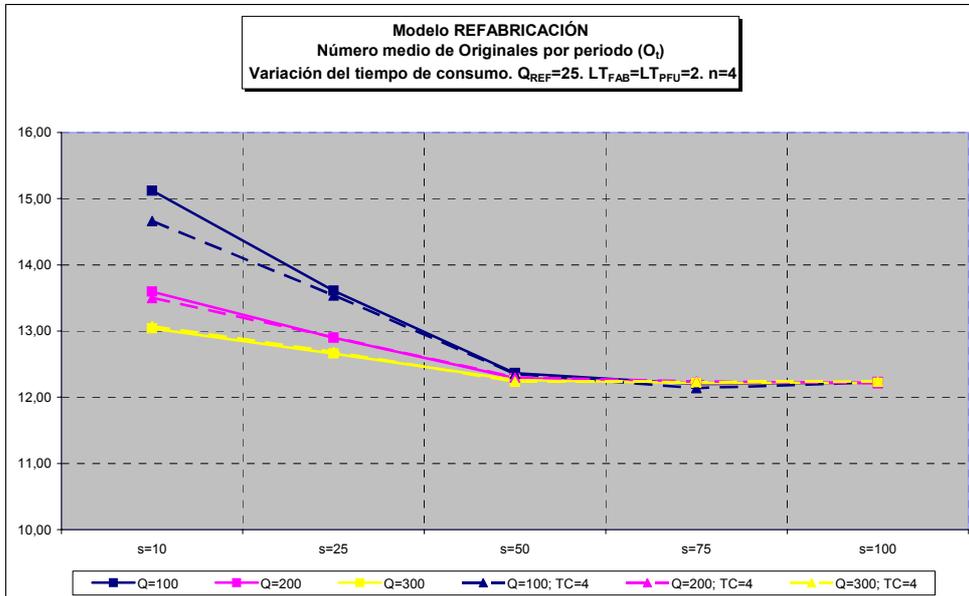


Gráfico 3.5.f: O_t . Variación en tiempo de consumo ($n=8$).

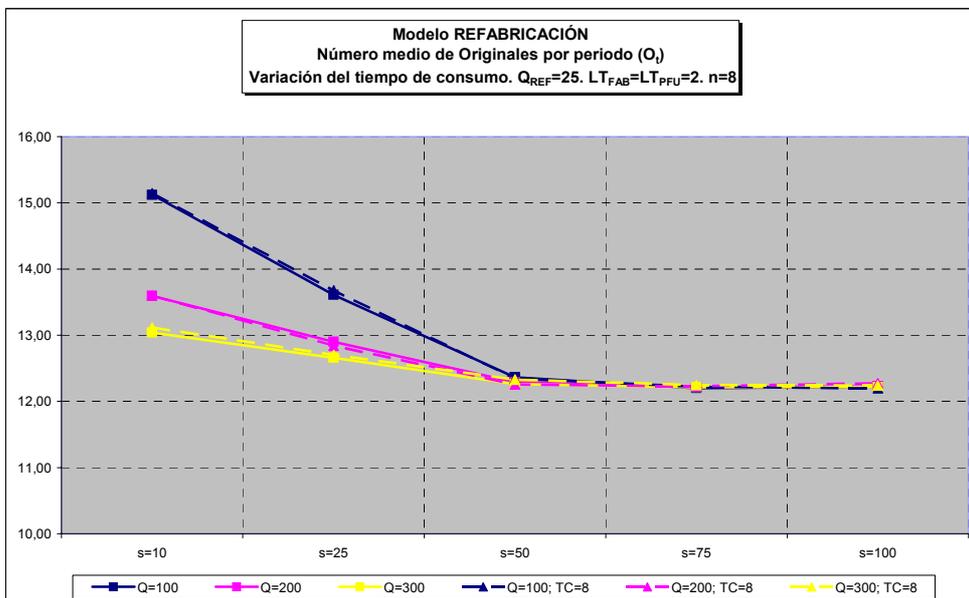


Gráfico 3.5.g: O_t . Variación tasa de retorno PFU ($p=80\%$).

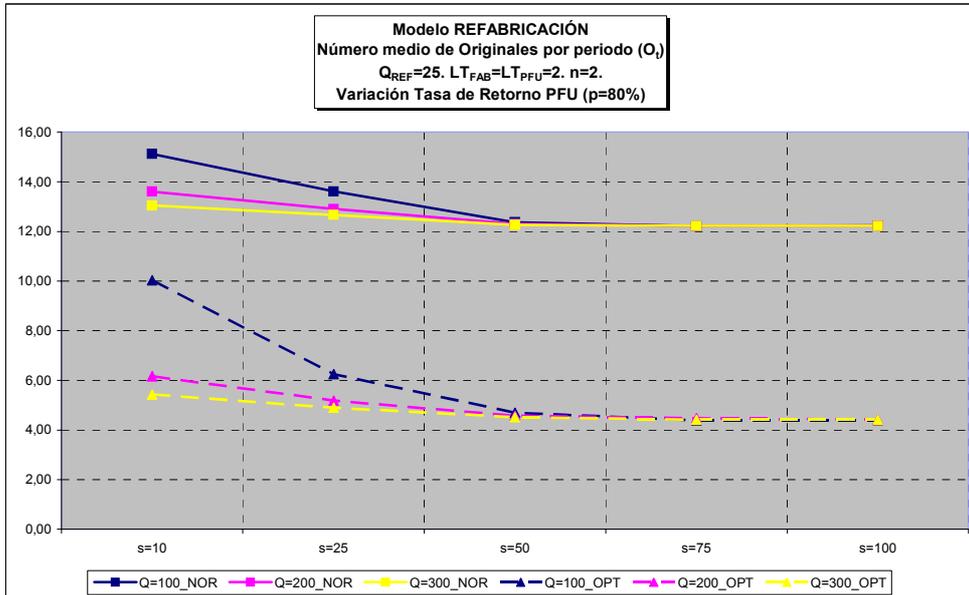


Gráfico 3.5.h: O_t . Variación tasa de retorno PFU ($p=20\%$).

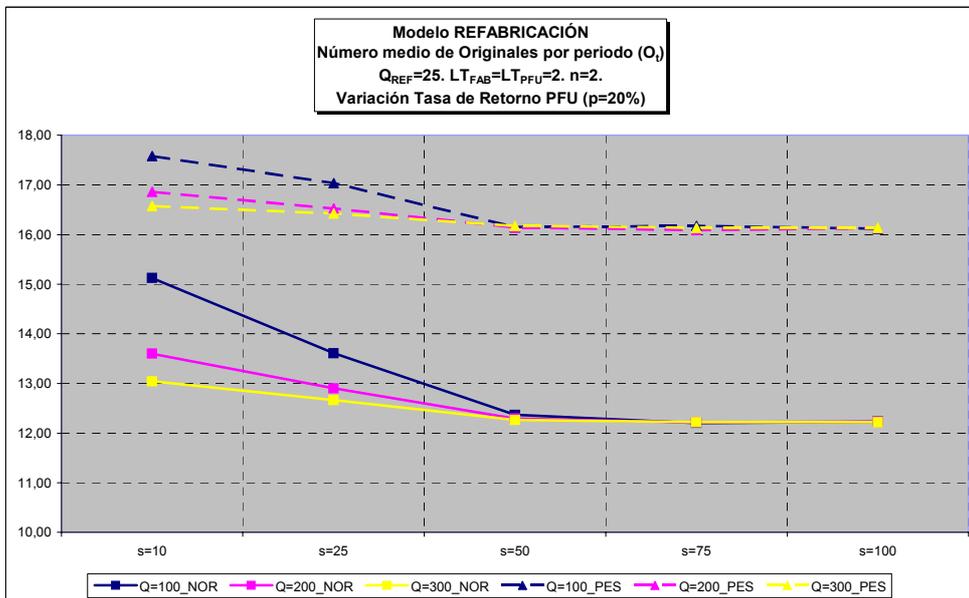


Gráfico 3.6.a: $P_{FAB,t}$. Variación en LT_{FAB} .

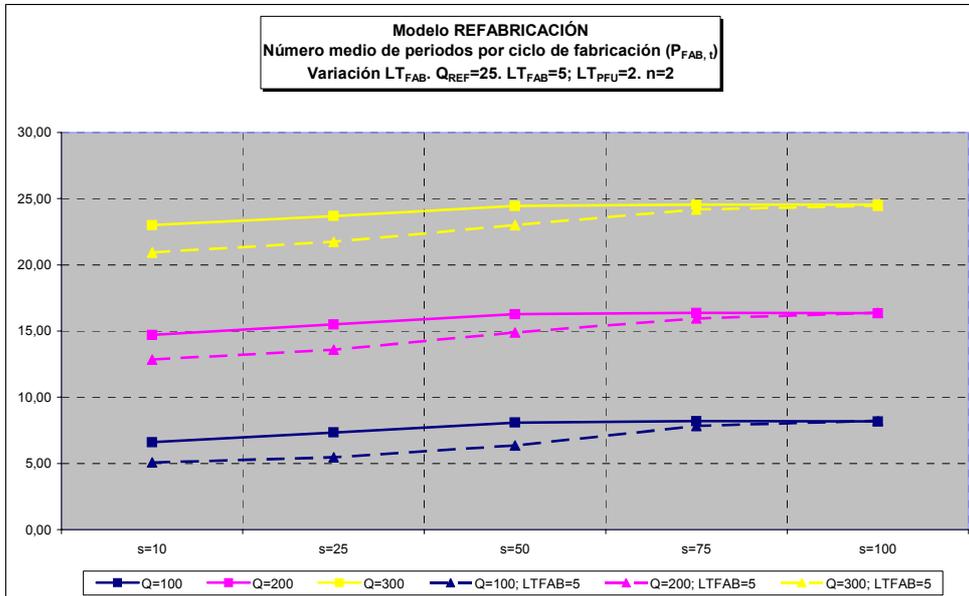


Gráfico 3.6.b: $P_{FAB,t}$. Variación en LT_{PFU} .

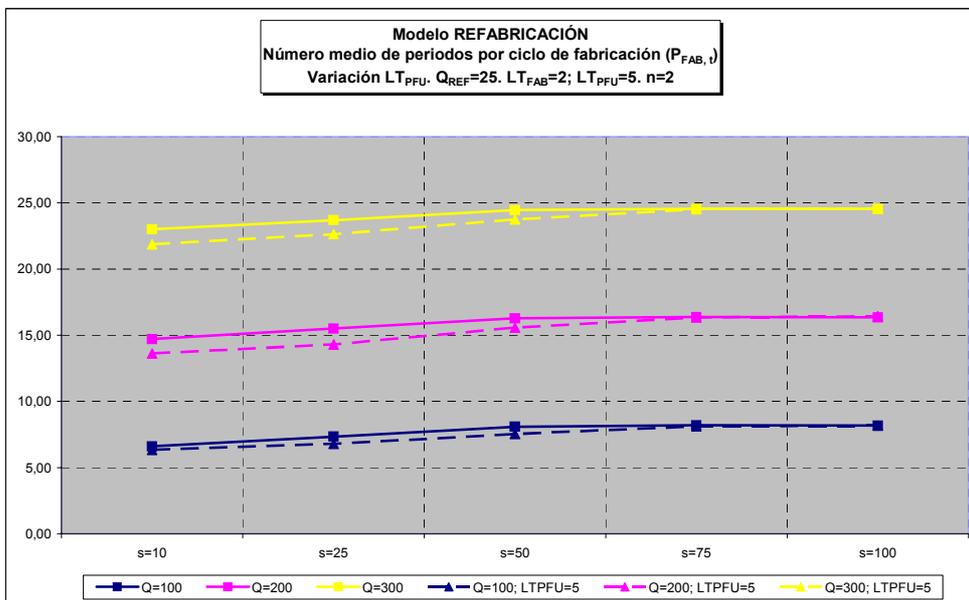


Gráfico 3.6.c: $P_{FAB,t}$. Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

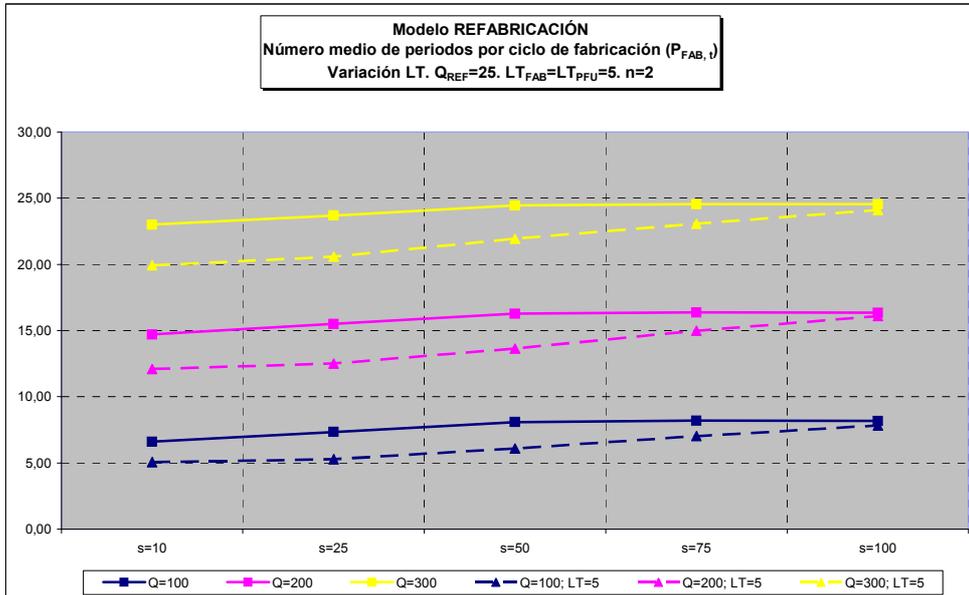


Gráfico 3.6.d: $P_{FAB,t}$. Variación en Q_{REF} .

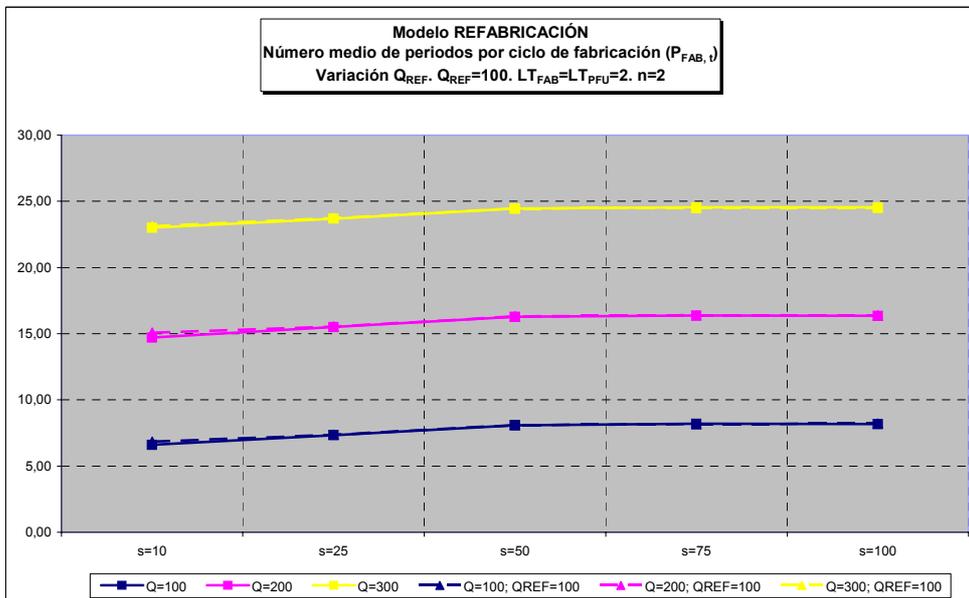


Gráfico 3.6.e: $P_{FAB,t}$. Variación tiempo de consumo (n=4).

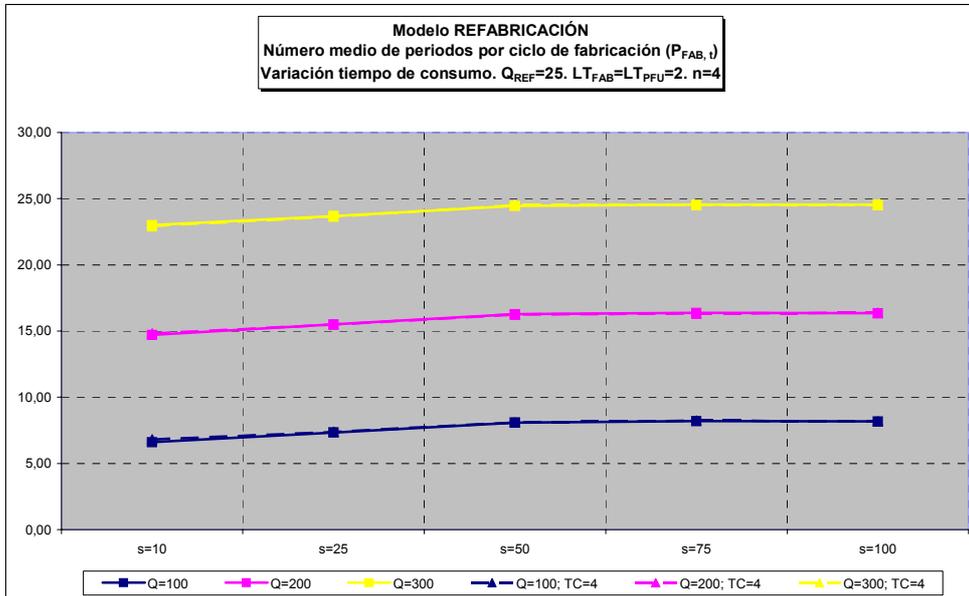


Gráfico 3.6.f: $P_{FAB,t}$. Variación tiempo de consumo (n=8).

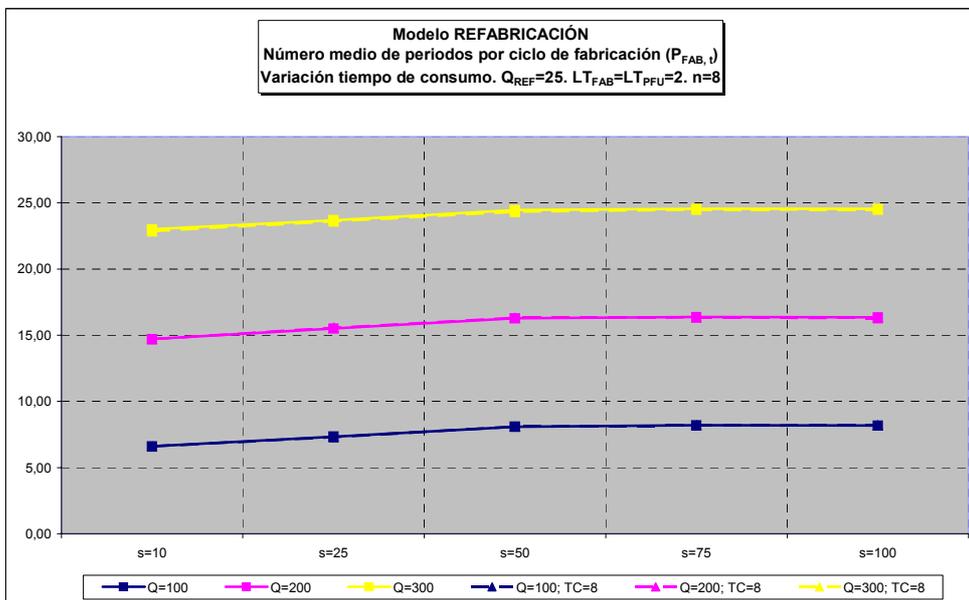


Gráfico 3.6.g: $P_{FAB,t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=80\%$)

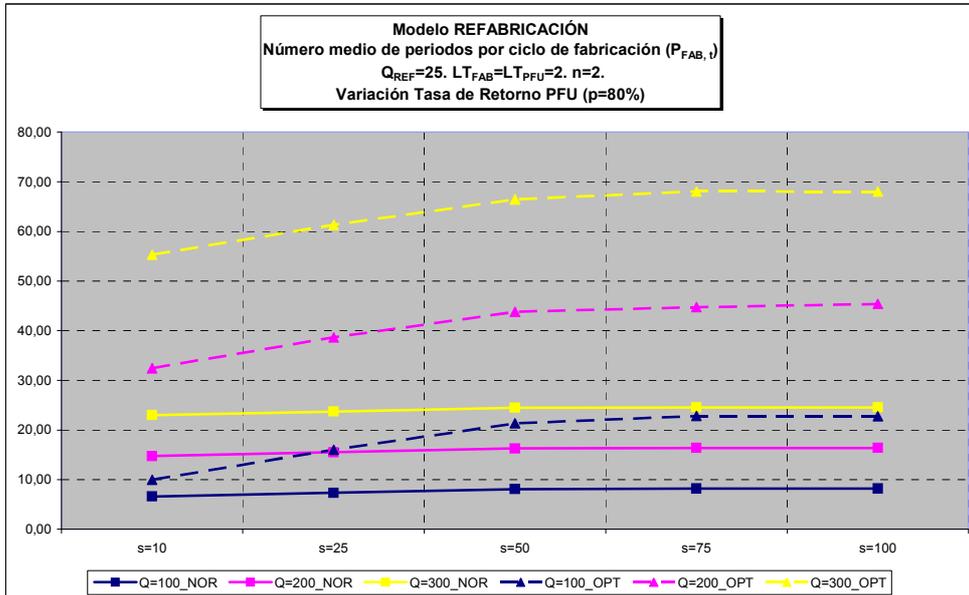


Gráfico 3.6.h: $P_{FAB,t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=20\%$)

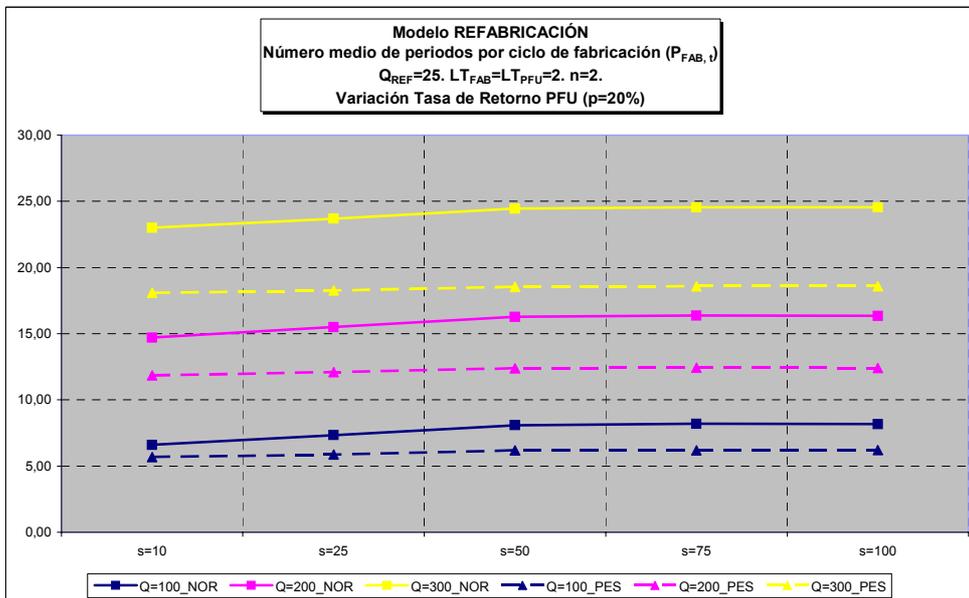


Gráfico 3.7.a: $P_{REF,t}$. Variación en LT_{FAB} .

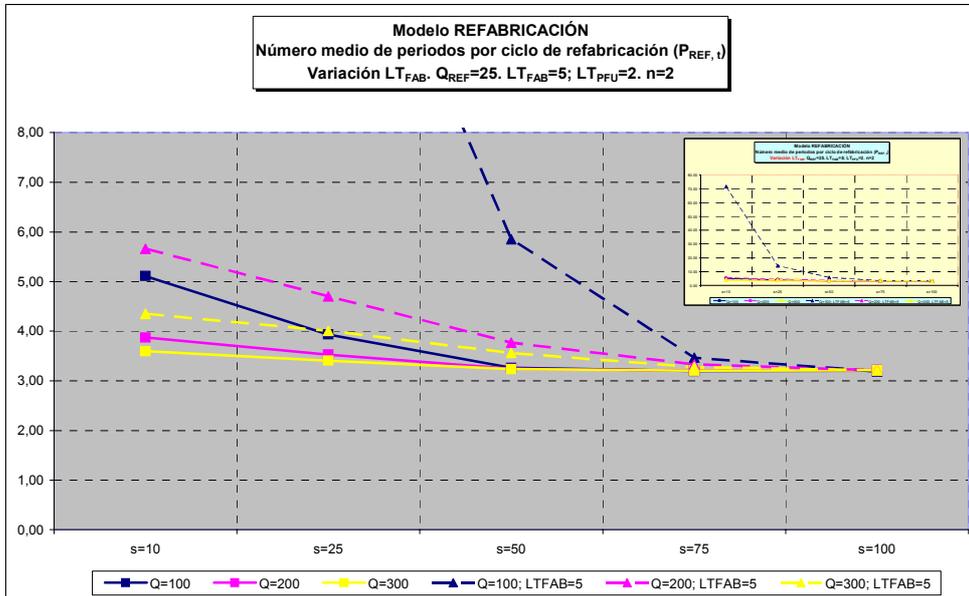


Gráfico 3.7.b: $P_{REF,t}$. Variación en LT_{PFU} .

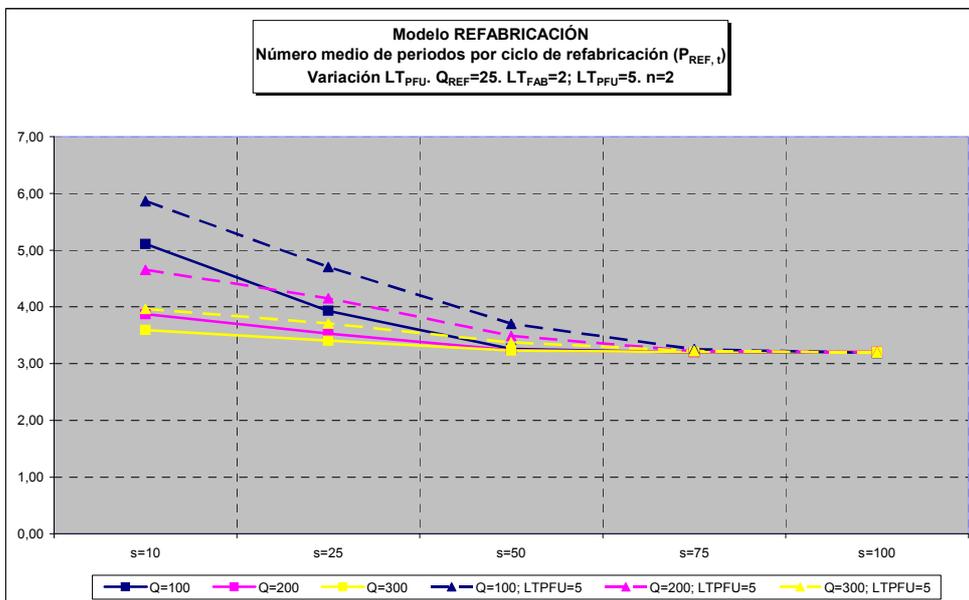


Gráfico 3.7.c: $P_{REF,t}$. Variación simultánea en LT_{FAB} y LT_{PFU} .

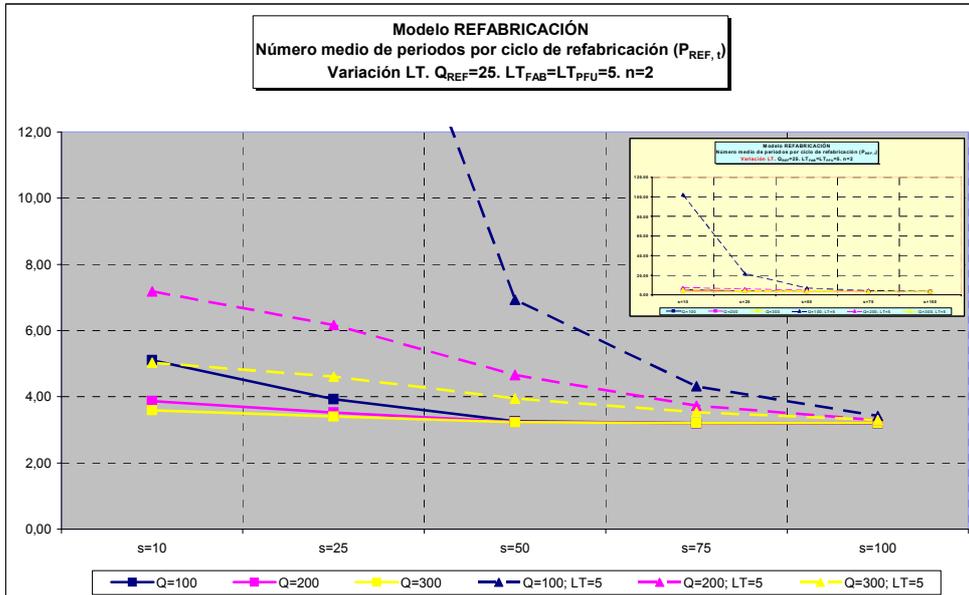


Gráfico 3.7.d: $P_{REF,t}$. Variación en Q_{REF} .

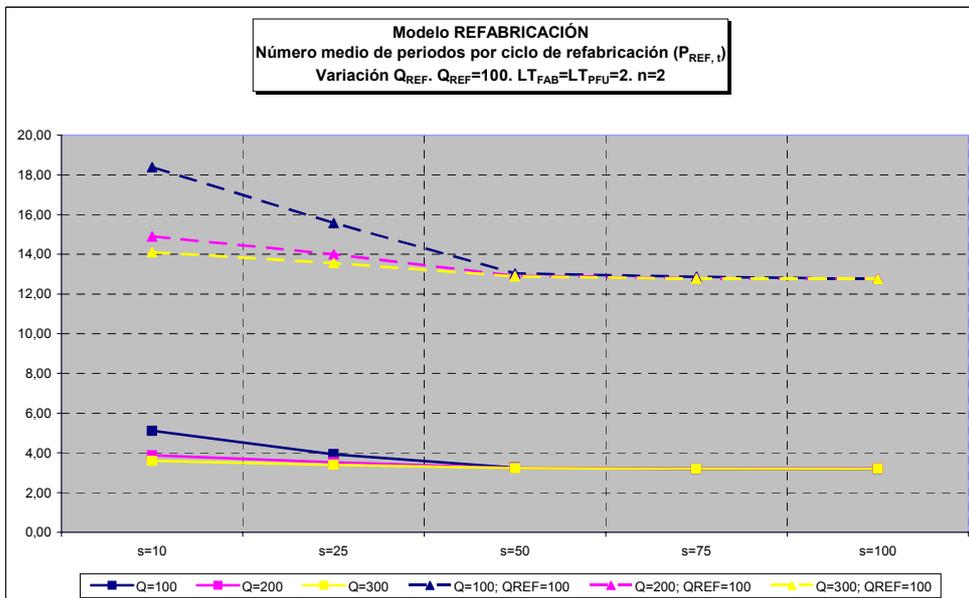


Gráfico 3.7.e: $P_{REF,t}$. Variación del tiempo de consumo (n=4).

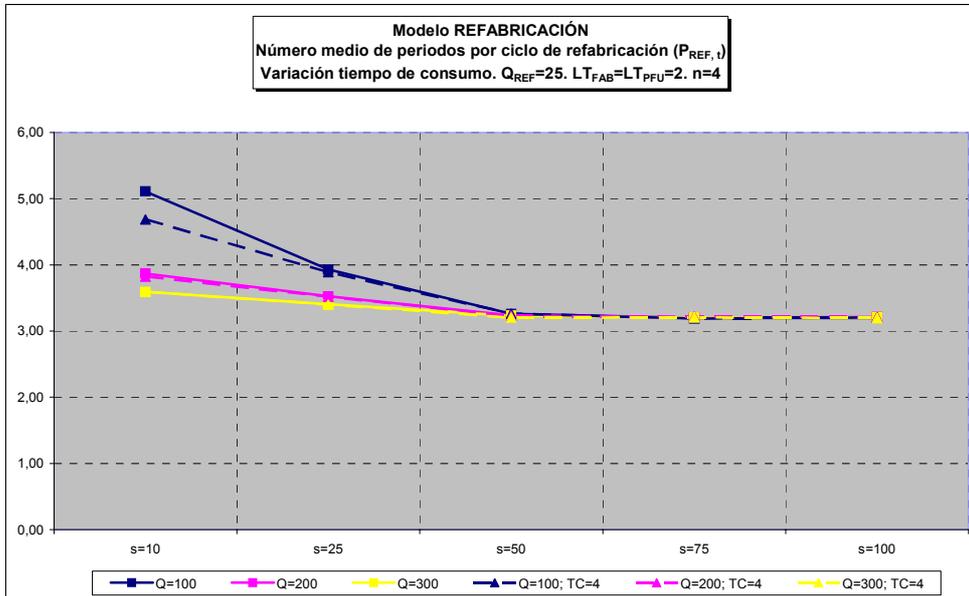


Gráfico 3.7.f: $P_{REF,t}$. Variación del tiempo de consumo (n=8).

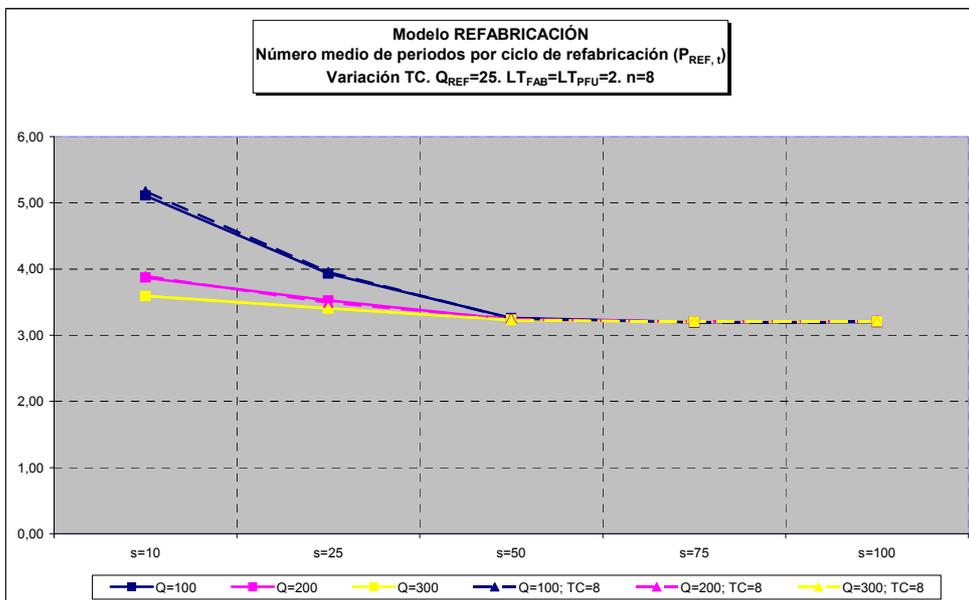


Gráfico 3.7.g: $P_{REF, t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=80\%$).

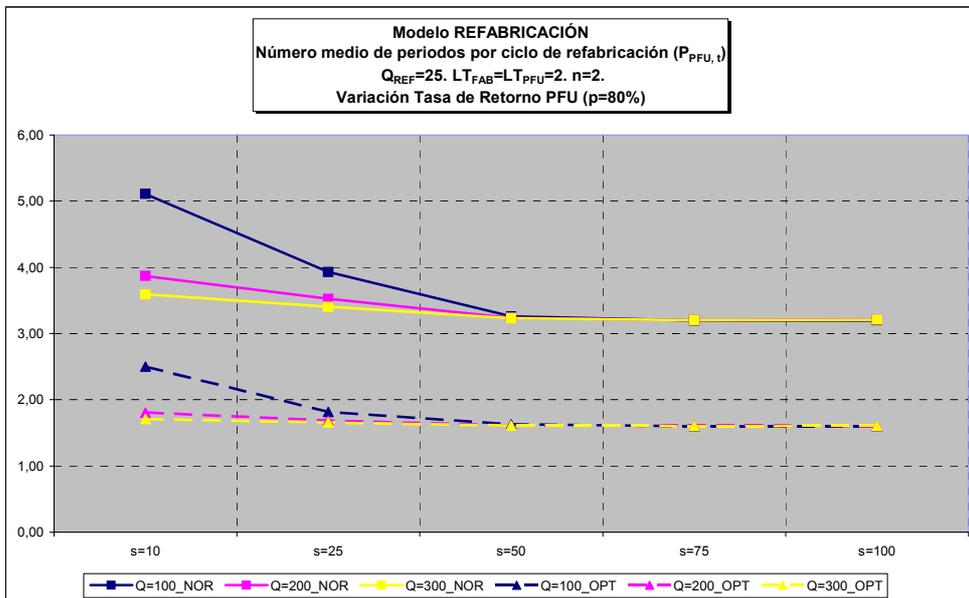
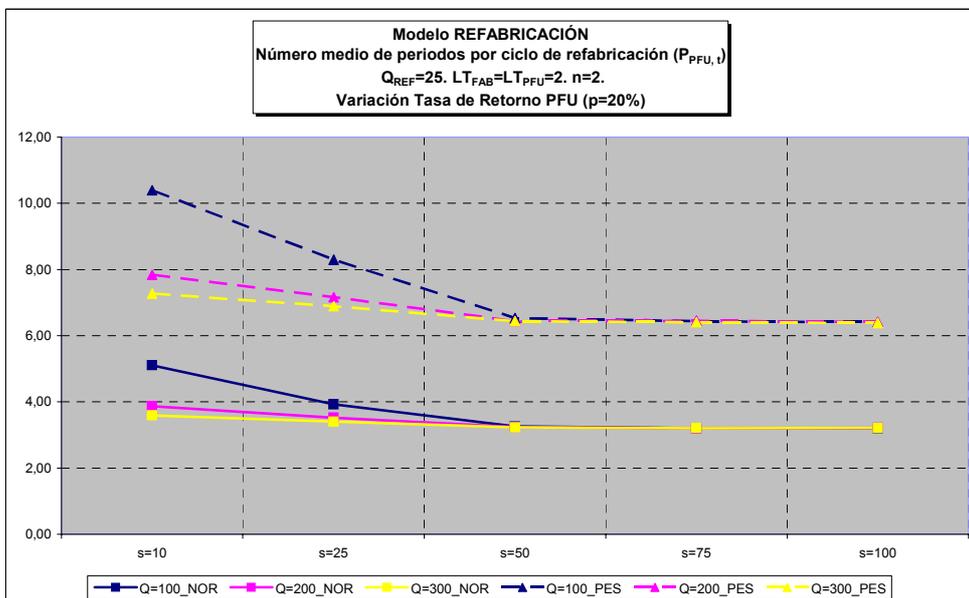


Gráfico 3.7.h: $P_{REF, t}$. Variación tasa de retorno PFU ($p=20\%$).



BIBLIOGRAFÍA

- **Ammons, J. C., Realff, M. J. y Newton, D. (1997).** “Reverse production system design and operation for carpet recycling”. Working Paper. Georgia Institute of Technology. Atlanta. Georgia.
- **Anthony, R. N. (1990).** El control de gestión. Deusto.
- **Aquilano, N. J. y Chase, R. B. (1991).** Fundamentals of operations management. Richard D. Irwin.
- **Bañegil, T. M. y Miranda, F. J. (2001).** La gestión del tiempo: Un factor competitivo en el desarrollo de nuevos productos. Editorial Pirámide.
- **Bañegil, T. M. y Miranda, F. J. (2002).** “Assessing the validity of new product development techniques in Spanish firms”. European Journal of Innovation Management 5 (2), 98-106.
- **Bañegil, T. M. y Rivero, P. (1998).** “¿Cómo de verde es su marketing?”. Esic-Market 99, 97-111.
- **Barney, J. Wright, M y Ketchen Jr., D. J. (2001).** “The resource-based view of the firm: Ten years after 1991”. Journal of Management 27, 625-641.
- **Barros, A. I., Dekker, R. y Scholten, V. (1998).** “A two-level network for recycling sand: a case study”. European Journal of Operational Research 110, 199-214.
- **Beamon, B. M. (1998).** “Supply chain design and analysis: Models and methods”. International Journal of Production Economics 55 (3), 281-294.
- **Beamon, B. M. (1999).** "Designing the green supply chain". Logistics Information Management 12 (4), 332-342.
- **Bloemhof-Ruwaard, J. M, Fleischmann, M. y van Nunen, J. A. E. E. (1999).** “Reviewing distribution issues in reverse logistics”. New Trends in Distribution Logistics. Lectures on Economics and Mathematical Systems, 480. Springer-Verlag. 23-42.

- **Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Beek, P., Hordijk, L. y Van Vassenhove, L. (1995).** “Interactions between operational research and environmental management”. *European Journal of Operational Research* 85, 229-243.
- **Borrel Vidal, M. (1985).** *Teoría del control óptimo*. Hispano Europea, S. A.
- **Bowen, F. E., Cousins, P. D., Lamming, R. C. y Faruk, A. C. (2001).** “The role of supply management capabilities in green supply”. *Production and Operations Management* 10 (2). Summer 2001, 174-189.
- **Bowersox, D. J. (1974).** *Logistical management*. MacMillan Publishing Co. New York.
- **Burgos, J. y Céspedes, J. J. (2001).** “Environmental performance as an operations objective”. *International Journal of Operations and Production Management* 21 (12), 1553, 1572.
- **Carter, C. y Ellram, L. M.. (1998).** "Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation". *Journal of Business Logistics* 19 (1), 85-104.
- **Chase, R. B. y Aquilano, N. J.. (1994).** *Dirección y administración de la producción y de las operaciones*. Addison-Wesley Iberoamericana.
- **Corbett, J. (1986).** “Design for economic manufacture”. *Annals of CIRP* 35 (1), 93.
- **Council of Logistics Management (1985).** Oak Brooks. Illinois.
- **Daganzo, C. F. (1999).** *Logistics systems analysis*. 3ª edición. Springer-Verlag.
- **Daganzo, C. F. y Erera, A. L. (1999).** “On planning and design of logistics systems for uncertain environments”. *New trends in distribution logistics. Lectures on Economics and Mathematical Systems*, 480. Springer-Verlag. 3-23.

- **Daniel, S. E., Diakoulaki, D. C. y Pappis, C. P. (1997).** “Operations research and environmental planning”. *European Journal of Operational Research* 102, 248-263.
- **De la Ballina, F.J. e Iglesias, V. (1998).** "Los modelos de análisis de distribución". *Esic-Market* 101. Septiembre-Diciembre, 9-20.
- **Delgado, J., Insa, J. y Carrasco, J. (1999).** “Logística inversa: Perspectivas del reciclado en automoción”. *Actas III Jornadas de Ingeniería de la Organización*. Barcelona, 16 y 17 de septiembre de 1999. Vol. 2, 571-578.
- **Díez de Castro, E. C. (1997).** *Distribución comercial*. 2ª Edición. McGraw-Hill.
- **Dilworth, J. B. (1993).** *Production and operation management: Manufacturing and services*. McGraw Hill.
- **Domínguez Machuca, J. A., Álvarez, M. J., Domínguez, M. A., García, S. y Ruiz, A. (1994).** *Dirección de operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*. McGraw-Hill.
- **Domínguez Machuca, J. A., Álvarez, M. J., Domínguez, M. A., García, S. y Ruiz, A. (1995).** *Dirección de operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*. McGraw-Hill.
- **Dowlatshahi, S. (1999).** “A modeling approach to logistics in current engineering”. *European Journal of Operational Research* 115, 59-76.
- **Dowlatshahi, S. (2000).** "Developing a reverse logistics theory". *Interfaces* 30 (3), 143-155.
- **Dutton, J. E. y Dukerich, J. M. (1991).** “Keeping an eye on the mirror: Image and identity in organizational adaptation”. *Academy of Management Journal* 34, 517-554.
- **Emiliani, M. L. y Stec, D. J. (2002).** “Realizing savings from online reverse auctions”. *Supply Chain Management: An international journal* 7 (1), 12-23.

- **Fabricky, W. J., Ghare, P. M. y Torgersen, P. E.. (1984).** Applied operations research and management science. Prentice Hall.
- **Fernández Sánchez, E. (1993).** Dirección de la producción. Fundamentos estratégicos. Editorial Civitas.
- **Fernández Sánchez, E. y Vázquez Ordás, C. J. (1994).** Dirección de la producción. Métodos operativos. Editorial Civitas.
- **Ferrer, G. (2000).** "Market segmentation and remanufacturing". Proceedings of First World Conference on Production and Operations Management, POMS. Sevilla 2000.
- **Ferrer, G. y Ayres, R. U. (2000).** "The impact of remanufacturing in the economy". Ecological Economics 32, 413-429.
- **Ferrer, G. y Whybark, D. C. (2000).** "From garbage to goods: Successful remanufacturing systems and skills". Business Horizons. November-December, 55-64.
- **Fleischmann, B., van Nunen, J. A. E. E., Speranza, M. G. y Stähly, P. (1999).** Advances in distribution logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 460. Springer-Verlag.
- **Fleischmann, M. (2001).** Quantitative models for reverse logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 501.
- **Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., y Van Vassenhove, L. N. (2001).** "The impact of product recovery on logistics network". Production and Operations Management, 10 (2). Summer 2001, 156-173.
- **Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., Van Nunen, J. y Van Vassenhove, L. (1997).** "Quantitative models for reverse logistics: a review". European Journal of Operational Research 103, 1-13.
- **Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R. y Flapper S. P. D. (2000).** "A characterisation of logistics networks for product recovery". Omega. 28, 653-666.

- **Fontanet, L. y Poveda, P. (2000).** Gestión de residuos urbanos. ExLibris Ediciones.
- **Foo, G., Clancy, J. P., Kinney, L. E. y Lindemulder, C. R. (1990).** “Design for material logistics”. AT&T Technical Journal 69(3), 61.
- **Forrester, J. W. (1982).** Dinámica industrial. Segunda edición. El Ateneo. Buenos Aires.
- **Giannoccaro, I. y Pontrandolfo, P. (2002).** “Inventory management in supply chains: a reinforcement learning approach”. International Journal of Productions Economics 78, 153-161.
- **Ginter, P. M. y Starling, J. M. (1978).** “Reverse distribution channels for recycling”. California Management Review 20, 73-82.
- **Giuntini, R. y Andel, T. (1995).** "Master the six R's of reverse logistics". Transportation and Distribution 36 (3), 93-98.
- **Goggin K. y Browne, J. (2000).** "Towards a taxonomy of resource recovery from end-of-life products". Computers in Industry 42, 177-191.
- **González Benito, J. y González Benito O. (2001).** “Logística inversa: un análisis conceptual de nuevos flujos físicos en los canales de distribución”. Esic-Market 110, 9-21.
- **Grant, R. M. (1991).** “The resource-based theory of competitive advantage”. California Management Review 24 (2), 60-67.
- **Guide Jr., V. D. R. (2000).** "Production planning and control for remanufacturing: industry practice and reseach needs". Journal of Operations Management 18, 467-483.
- **Guide Jr., V. D. R. y Srivastava, R. (1997).** “Buffering from material recovery uncertainty in a recoverable manufacturing enviroment”. Journal of Operational Research Society 48, 519-529.

- **Guide Jr., V. D. R. y Srivastava, R. (1998).** “Inventory buffers in recoverable manufacturing”. *Journal of Operations Management* 16, 551-568.
- **Guide Jr., V. D. R., Jayaraman, V. y Srivastava, R. (1999).** “The effect of lead time variation on the performance of disassembly release mechanisms”. *Computers & Industrial Engineering* 36, 759-779.
- **Guide Jr., V. D. R., y Van Wassenhove, L. N. (2001).** “Managing product returns for remanufacturing”. *Production and Operations Management* 10 (2). Summer 2001, 142-155.
- **Gultinan, J. P. y Nwokoye, N. G. (1975).** “Developing distribution channels and systems in the emerging recycling industry”. *International Journal of Physical Distribution* 1, 28-38.
- **Gungor, A. y Gupta, S. (1999).** “Issues in environmentally conscious manufacturing and recovery products: a survey”. *Computers & Industrial Engineering* 36, 811-853.
- **Gutiérrez, G. y Prida, B. (1998).** *Logística y distribución física: Evolución, situación actual, análisis comparativo y tendencias*. McGraw-Hill.
- **Hawken, P. (1993).** “The ecology of commerce: A declaration of sustainability”. Harper Business, New York.
- **He, Q. M., Jewkes, E. M. y Buzacott, J. (2002).** “Optimal and near-optimal inventory control policies for a make-to-order inventory-production system”. *European Journal of Operational Research* 141, 113-132.
- **Heeb, H. B. (1989).** “Can old workhorses still pull their weight?”. *Manufacturing Engineering*. April, 74-76.
- **Heene, A. (1997).** “The nature of strategic management”. *Long Range Planning* 30 (6), 933-938.
- **Heizer, J. y Render, B. (1991).** *Production and operations management*. Allyn and Bacon.

- **Hendrickson, C., Conway-Schempf, N., Lave, L. y McMichael, F. (1997).** "Introduction to green design". Manuscript. Green Design Initiative. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA.
- **Heyman, D. P. (1977).** "Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns". Naval Research Logistics Quarterly 24, 385-405.
- **Hill, R. M. (2000).** "Lead time behaviour in inventory modelling". Manuscrito.
- **Inderfurth, K., de Kok, A. G. y Flapper, S. D. P. (2001).** "Product recovery in stochastic remanufacturing system with multiple reuse options". European Journal of Operational Research 133, 130-152.
- **Irasarri L. M., Larrauri, E., Miguel, R. y Arnaiz, S. (1999).** "Specific mobile phone recycling process". Manuscrito.
- **Jayaraman, V., Guide, V. D. R. y Srivastava, R. (1999).** "A closed-loop logistics model for remanufacturing". Journal of Operational Research Society 50, 497-508.
- **Johnson, P. F. (1998).** "Managing value in reverse logistics systems". Logistics and Transport Review 34 (3), 217-227.
- **Keaton, M. (1995).** "Using the gamma distribution to model demand when lead time is random". Journal of Business Logistics. Vol. 16 (1), 107-132.
- **Kiesmüller, G. P. y Miner, S. (2001).** "Simple expressions for finding recovery system inventory control parameters". Manuscrito .
- **Kiesmüller, G. P. y Scheder, C. W. (2003).** "Computational issues in a stochastic finite horizon one product recovery inventory model". European Journal of Operational Research 146, 553-579.
- **Klassen R. D. (1993).** "Integration of environmental issues into manufacturing toward interactive open systems" . Production and Inventory Management Journal 34 (1), 82-88.

- **Klausner, M. y Hendrickson, C. T.. (2000).** "Reverse logistics strategy for product take-back". *Interfaces* 30 (3),156-165.
- **Kleber, R., Minner, S. y Kiesmüller, G. P. (2002).** "A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options". *International Journal of Production Economics* 79, 121-141.
- **Kleineidam, U., Lambert, A. J. D., Blansjaar, J., Kok, J. J. y van Heijningen R.J.J. (2000).** "Optimising product recycling chains by control theory". *International Journal of Production Economics* 66, 185-195.
- **Knemeyer, A. M., Ponzurick, T. G. y Logar, C. M. (2002).** "A qualitative examination of factors affecting reverse logistics systems for en-of-life computers". *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 32 (6), 455-479.
- **Kokkinanki, A. I., Dekker, R., Van Nunen, J. A. E. E. y Pappis, C. (2000).** "An exploratory study on electronic commerce for reverse logistics". *Supply Chain Forum* 1, 10-17.
- **Kotler, P. (1994).** Dirección de marketing. 8ª Edición. Prentice Hall.
- **Krikke, H. R. (1998).** "Recovery strategies and reserve logistic network design". Institute for Business Engineering and Technology Application (BETA).
- **Krikke, H. R., Kooki, E. J. y Schuur, P. C. (1999).** "Network design in reverse logistics: A quantitative model". *New Trends in Distribution Logistics. Lectures in Economics and Mathematical Systems*, 480. Springer-Verlag. 45-61.
- **Kroon, L. y Vrijens, G. (1995).** "Returnable containers: an example of reverse logistics". *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 25 (2), 56-68.
- **Krumwiede, D. W. y Sheu, C. (2002).** "A model for reverse logistics entry by third-party providers". *Omega* 30, 325, 333.

- **Larrañeta, J. C. y Onieva, L. (1988).** Métodos modernos de gestión de la producción. Alianza Universidad Textos.
- **Law, A. M. y Kelton, W. D. (1982).** Simulation: Modelling and analysis. McGraw–Hill.
- **Libro blanco de la gestión medioambiental en la industria española. (1998).** Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente.
- **Lindhqvist T. (2000).** “Extended producer responsibility in cleaner production: Policy principle to promote environmental improvements of product systems”. Ph. Dissertation. International Institute for Industrial Environmental Economics.
- **Listes, O. y Dekker, R. (2001).** “Stochastic approaches for product recovery network design: a case study”. Working Paper. Econometric Institute Report EI 2001-08. Erasmus University Rotterdam.
- **Louwers D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F. y Flapper, S. D. P.. (1999).** "A facility location allocation for reusing carpet materials". Computers & Industrial Engineering 36, 855-869.
- **Lund, R. T. (1996).** “The remanufacturing industry: Hidden giant”. Boston University.
- **Mahadevan, B., Pyke, D. F. y Fleischmann, M. (2002).** “Periodic review, push inventory policies for remanufacturing”. ERIM Report Series Research in Management. Rotterdam School of Management. Erasmus Universiteit Rotterdam.
- **Maloni, M. J. y Benton, W. C. (1997).** “Supply chain partnerships: Opportunities for operations research”. European Journal of Operational Research 101, 419-429.
- **Mather, H. (1992).** “Design for logistics (DFL): The next challenge for designers”. Product and Inventory Management Journal 33 (1), 7-10.
- **Meadows, D. L, Meadows, D. H. y Randers, J. (1972).** “The limits to growth”. Universe Books, New York.

- **Meadows, D. L, Meadows, D. H. y Randers, J. (1992).** “Beyond the limits”. Chelsea Green Publishing Company. Vermont.
- **Miner, S. y Kleber, R. (2001).** “Optimal control of production and remanufacturing in a simple recovery model with linear cost functions”. *OR Spektrum* 23, 3-24.
- **Miranda, F. J. y Bañegil, T. M. (2002).** “The effect of the new product development techniques on new product success of Spanish firms”. *Industrial Marketing Management* 31 (3), 261-271.
- **Mohr, R. D. (2002).** “Technical change, external economies and the Porter Hypothesis”. *Journal of Environmental Economics and Management* 43, 158-168.
- **Morcillo, P. y Fernández-Aguado, J. (coords.). (2002).** Nuevas claves para la dirección estratégica. Ariel Economía. 2002.
- **Muckstadt, J. A. y Isaac, M. H. (1981).** “An analysis of single item inventory system with returns”. *Naval Research Logistics Quarterly* 28, 237-254.
- **Nagel, C. y Meyer, P. (1999).** “Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing”. *Computers & Industrial Engineering* 36, 781-792.
- **Novalés, A. (1994).** *Econometría*. McGraw Hill.
- **Otamendi, J. (2002).** “Simulación: una herramienta eficiente para la toma de decisiones”. *Boletín de la Sociedad de Estadística e Investigación Operativa*, 18 (1), 2-7.
- **Pohlen, T. L. y Farris II, M. T. (1992).** "Reverse logistics in plastics recycling". *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 22 (7), 35-47.
- **Porter, M. E. (1987).** *Ventaja Competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior*. Ed. Continental.

- **Porter, M. E. (1990).** The competitive advantage of nations. Free Press, New York.
- **Porter, M. E. y Van der Linde, C. (1995a).** “Green and Competitive: ending the stalemate”. Harvard Business Review, 73 (5), 120-134.
- **Porter, M. E. y Van der Linde, C. (1995b).** “Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship”. Journal of Economic Perspectives 9 (4), 97-118.
- **Pritsker, A. A. B. (1986).** Introduction to simulation and SLAM II. System Publishing. West Lafayette, IN, 3rd Edition.
- **Realf, M. J., Ammons, J. C. y Newton, D. (1999).** “Carpet recycling: The reverse production system design”. Journal of Polymer-Plastic Technology and Engineering 38 (3), 547-567.
- **Richter K. y Jens, W. (2001).** “The reverse Wagner-Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost”. International Journal of Production Economics 71 (1-3), 447-456.
- **Richter, K. (1996a).** “The extended EOQ repair and waste disposal model”. International Journal of Production Economics 45, 443-447.
- **Richter, K. (1996b).** “The EOQ and waste disposal model with variable setups numbers”. European Journal of Operational Research 95, 313-324.
- **Richter, K. y Sombrutzki, M. (2000).** “Remanufacturing planning for the reverse Wagner-Whitin models”. European Journal of Operational Research 121, 304-315.
- **Ritchie L., Burnes, B., Whittle, P. y Hey, R. (2000).** "The benefits of reverse logistics: the case of the Manchester Royal Infirmary Pharmacy". Supply Chain Management 5, 226-233.
- **Rogers, D. S., Larson, P. y Tibben-Lembke, R. S. (1999).** “E-commerce reverse logistics”. Reverse Logistics Executive Council. www.rlec.org

- **Rogers, D. S. y Tibben-Lembke, R. S. (1999).** Going Backwards: Reverse Logistics: Trends and Practices. Reverse Logistics Executive Council.
- **Romero Morales, M. D. (2000).** Optimization Problems in Supply Chain Management. TRAIL Thesis Series 2000/4, The Netherlands TRAIL Research School.
- **Sánchez, T., Durán, A. y Gutiérrez, G. (2001).** “Servicios logísticos orientados al comercio electrónico B2C: Situación actual y perspectivas”. Universidad Carlos III de Madrid y Asociación de Usuarios de Internet.
- **Schmidheiny, S. (1992).** “Changing Course: A global Business perspective on development and the environment”. MIT Press, Cambridge.
- **Schrady, D. A. (1967).** “A deterministic inventory model for reparable items”. Naval Research Logistics Quarterly 14, 391-398.
- **Shih, L. S. (2001).** “Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan”. Resources Conservation and Recycling 32, 55-72.
- **Shrivastava, P. (1995).** “Environmental technologies and competitive advantage”. Strategic Management Journal 16. Special Issue Summer, 77-91.
- **Silver, E. A., Pyke, D. F., Peterson, R. (1998).** Inventory management and production planning and scheduling. (3rd edition). New York. John Wiley and Sons.
- **Simpson, D. R. y Bradford III, R. L. (1996).** “Taxing variable cost: environmental regulation as industrial policy”. Journal of Environmental Economics and Management, 30, 282-300.
- **Slats P., Bholá, B., Evers, J. y Dijkhuizen, G. (1995).** “Logistic chain modelling”. European Journal of Operational Research 87, 1-20.

- **Spengler, T., Püchert, H., Penkuhm, T. y Rentz, O. (1997).** “Environmental integrated production and recycling management”. *European Journal of Operational Research* 97, 308-326.
- **Speranza, M. G. y Stähly, P. (1999).** *New trends in distribution logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 480. Springer-Verlag.
- **Stock, J. R. (1992).** *Reverse logistics. Council of Logistics Management. Oak Brook, Illinois.*
- **Stock, J. R. (1998).** *Development and implementation of reverse logistics programs. Council of Logistics Management. Oak Brooks. Illinois.*
- **Stock, J. R. (2001).** “Los siete pecados capitales de la logística inversa”. *Manuscrito. Foro Internacional PILOT. Zaragoza 7 y 8 de mayo de 2001.*
- **Teunter, R. H. (2001).** “Economic ordering quantities for recoverable item inventory systems”. *Naval Research Logistics* 48, 484-495.
- **Teunter, R. H. (2002).** “A reverse logistics valuation method for inventory control”. *International Journal of Production Research* 39 (9), 2023-2035.
- **Teunter, R. H. y Vlachos, D. (2002).** “On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured”. *International Journal of Production Economics* 75, 257-266.
- **Teunter, R. H., Van der Laan, E. y Inderfurth, K. (2000).** "How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics?". *Omega* 28, 409-415.
- **Thierry, M. C. (1997).** “An analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies”. *Ph.D. Thesis. Erasmus University Rotterdam. The Netherlands.*
- **Thierry, M. C., Salomon, M., Van Nunen, J. A. E. E. y Van Wassenhove, L. (1995).** “Strategic issues in product recovery management”. *California Management Review* 37 (2), 114-135.

- **Tibben-Lembke, R. S. (1998).** “The impact of reverse logistics on the total cost of ownership”. *Journal of Marketing Theory and Practice* 6 (4), 51-60.
- **Tibben-Lembke, R. S. (2002).** “Life after death: reverse logistics and the product life cycle”. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 32 (3), 223-244.
- **Turner, G., LeMay, S. A. y Mitchell, M. A. (1994).** “Solving the reverse logistics problem: Applying the symbiotic logistics concept”. *Journal of Marketing Theory and Practice* 2 (2), 15-27.
- **Ulph, A. (1996).** “Environmental policy and international trade when governments and producers act strategically”. *Journal of Environmental Economics and Management*, 30, 265-281.
- **Vallhonrat, J. M. y Corominas, A. (1991).** Localización, distribución en planta y manutención. Marcombo.
- **Van der Laan, E. A., Salomon, M. y Dekker, R. (1999).** “An investigation of lead time effects in manufacturing/remanufacturing systems under simple PUSH and PULL control strategies”. *European Journal of Operational Research* 115, 195-214.
- **Van der Laan, E. A. y Salomon, M. (1997).** “Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal”. *European Journal of Operational Research* 102, 264-278.
- **Van der Laan, E. A., Dekker, R., Salomon, M. y Ridder, A. (1996).** “An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal”. *International Journal of Production Economics* 46-47, 339-350.
- **Van Hillegersberg, J., Zuidwijk, R., van Nunen, J. y van Eijk, D. (2001).** “Supporting return flows in the supply chain”. *Communications at the ACM*, 54 (6), 74-79.

- **Van Hook, R. I. (1999).** “From reversed logistics to green supply chain”. Supply Chain Management 4 (3), 129-134.
- **Vidal, C. J. y Goetschalckx, M. (1997).** “Strategic production-distribution models: a critical review with emphasis on global supply chain models”. European Journal of Operational Research 98,1-18
- **Völkner, P. y Werners, B. (2000).** “A decision support system for business process planning”. European Journal of Operational Research 125 (3), 633-647.
- **Wagner, H. W. y Whitin, T. H. (1958).** “Dynamic version of the economic lot size model”. Management Science 5, 88-96.
- **Waller, D. (1999).** Operations Management: A supply chain approach. McGraw Hill.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Opciones de gestión de los PFU	45
Cuadro 2.2: Decisiones estratégicas, tácticas y operativas durante el proceso de recuperación de PFU	52
Cuadro 2.3: La función inversa de la logística en el DFL	58
Cuadro 3.1: SLI según la opción de gestión empleada	65
Cuadro 3.2: SLI según quién desarrolla el sistema	69
Cuadro 3.3: Modelos cuantitativos para la reutilización	72
Cuadro 3.4: Modelos cuantitativos para el reciclaje (I)	75
Cuadro 3.5: Modelos cuantitativos para el reciclaje (y II)	78
Cuadro 3.6: Modelos cuantitativos para la refabricación	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Valores paramétricos	131
Tabla 4.2: Ejemplo simulación	134
Tabla 5.1: Resultados escenario base Modelo Forward	139
Tabla 5.2: Resultados escenario base Modelo Reutilización	144
Tabla 5.3: Resultados escenario base Modelo Refabricación	155
Tabla 6.1: Costes de gestión de inventarios por periodo	174
Tabla 6.2: Escenario base	177
Tabla 6.3: Políticas (s, Q) más favorables.	198

Tabla 6.4: Modelo sin expectativas. Valores paramétricos	202
Tabla 6.5: Análisis de expectativas. Resultados de la simulación	203
Tabla 6.6: Demanda estacional. Valores paramétricos	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Razones para la recuperación de PFU	28
Figura 2.2: Flujos en el sistema logístico de la empresa	35
Figura 2.3: Logística para la Recuperación y Logística de Devoluciones	37
Figura 2.4: Actividades básicas en un SLI	48
Figura 2.5: Componentes del diseño para la logística	55
Figura 3.1: Estructura del Modelo de una Red de Recuperación	83
Figura 3.2: Esquema para el control de inventarios con Logística Inversa	96
Figura 4.1: Modelo Forward	108
Figura 4.2: Modelo Reutilización	108
Figura 4.3: Modelo Refabricación	109
Figura 4.4: Efecto de las expectativas de retorno de PFU ($n > LT_{PFU}$).	124
Figura 4.5: Efecto de las expectativas de retorno de PFU ($n < LT_{PFU}$)	126

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,i}$)	141
Gráfico 5.1.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)	141

Gráfico 5.1.3: Número medio de originales por periodo (O_t)	142
Gráfico 5.1.4: Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)	142
Gráfico 5.2.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)	146
Gráfico 5.2.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)	146
Gráfico 5.2.3: Número medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)	147
Gráfico 5.2.4: Número medio de originales por periodo (O_t)	148
Gráfico 5.2.5: Número medio de periodos por ciclo ($P_{FAB,t}$)	149
Gráfico 5.3.1: Stock medio de comerciables por periodo ($S_{FAB,t}$)	156
Gráfico 5.3.2: Número medio de faltantes por periodo (F_t)	157
Gráfico 5.3.3: Número medio de PFU retornados por periodo (PFU_t)	157
Gráfico 5.3.4: Stock medio de PFU por periodo ($S_{PFU,t}$)	158
Gráfico 5.3.5: Número medio de Originales por periodo (O_t)	159
Gráfico 5.3.6: N° medio de periodos por ciclo de fabricación ($P_{FAB,t}$)	159
Gráfico 5.3.7: N° medio de periodos por ciclo de refabricación ($P_{REF,t}$)	160
Gráfico 5.4: Comparación de Modelos. O_t	168
Gráfico 5.5: Comparación de Modelos. $P_{FAB,t}$	168
Gráfico 5.6: Comparación de Modelos. $S_{FAB,t}$	169
Gráfico 5.7: Comparación de Modelos. F_t	169
Gráfico 5.8: Comparación de Modelos. Nivel de Servicio	170
Gráfico 6.1: Escenario base. Costes de gestión de stocks	177
Gráfico 6.1.1.a: Estructura de costes. $Q=200$	178
Gráfico 6.1.1.b: Estructura de costes. $Q=300$	179
Gráfico 6.1.2.1.a: Variación LT_{FAB} . $Q=100$	180

Gráfico 6.1.2.1.b: Variación LT_{FAB} . $Q=200$	180
Gráfico 6.1.2.1.c: Variación LT_{FAB} . $Q=300$	181
Gráfico 6.1.2.2.a: Variación LT_{PFU} . $Q=100$	182
Gráfico 6.1.2.2.b: Variación LT_{PFU} . $Q=200$	182
Gráfico 6.1.2.2.c: Variación LT_{PFU} . $Q=300$	183
Gráfico 6.1.2.3.a: Variación LT . $Q=100$	184
Gráfico 6.1.2.3.b: Variación LT . $Q=200$	184
Gráfico 6.1.2.3.c: Variación LT . $Q=300$	185
Gráfico 6.1.3.a: Variación $n=4$. $Q=100$	186
Gráfico 6.1.3.b: Variación $n=4$. $Q=200$	186
Gráfico 6.1.3.c: Variación $n=4$. $Q=300$	187
Gráfico 6.1.3.d: Variación $n=8$. $Q=100$	187
Gráfico 6.1.3.e: Variación $n=8$. $Q=200$	188
Gráfico 6.1.3.f: Variación $n=8$. $Q=300$	188
Gráfico 6.1.4.a: Escenario optimista. $Q=100$	189
Gráfico 6.1.4.b: Escenario optimista. $Q=200$	190
Gráfico 6.1.4.c: Escenario optimista. $Q=300$	190
Gráfico 6.1.4.d: Escenario pesimista. $Q=100$	191
Gráfico 6.1.4.e: Escenario pesimista. $Q=200$	191
Gráfico 6.1.4.f: Escenario pesimista. $Q=300$	192
Gráfico 6.1.5.a: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=100$	193
Gráfico 6.1.5.b: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=200$	194
Gráfico 6.1.5.c: Variación coste faltantes. $C_F=8$. $Q=300$	194

Gráfico 6.1.5.d: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=100$	195
Gráfico 6.1.5.e: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=200$	195
Gráfico 6.1.5.f: Variación coste faltantes. $C_F=16$. $Q=300$	196
Gráfico 6.1.5.g: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=100$	196
Gráfico 6.1.5.h: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=200$	197
Gráfico 6.1.5.i: Variación coste faltantes. $C_F=32$. $Q=300$	197
Gráfico 6.2.1.a: Análisis de expectativas. $LT(2, 2)$. $n=2$	204
Gráfico 6.2.1.b: Análisis de expectativas. $LT(2, 2)$. $n=4$	205
Gráfico 6.2.1.c: Análisis de expectativas. $LT(2, 2)$. $n=8$	205
Gráfico 6.2.1.d: Análisis de expectativas. $LT(2, 5)$. $n=2$	206
Gráfico 6.2.1.e: Análisis de expectativas. $LT(2, 5)$. $n=4$	206
Gráfico 6.2.1.f: Análisis de expectativas. $LT(2, 5)$. $n=8$	207
Gráfico 6.2.2.a: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$. $n=2$	210
Gráfico 6.2.2.b: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=5$. $n=2$	211
Gráfico 6.2.2.c: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=2$. $n=8$	211
Gráfico 6.2.2.d: Demanda estacional. $LT_{FAB}=LT_{PFU}=5$. $n=8$	212
Gráfico 6.2.2.e: Demanda estacional. $P_{FAB,t}$. $n=2$	213