

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio del impacto dinámico del incremento repentino de la demanda en una cadena de suministro en bucle cerrado.

Autor: Laura Fernández Peralta

Tutor: Roberto Domínguez Cañizares

**Dpto. Organización Industrial Y Gestión De
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

**Estudio del impacto dinámico del incremento
repentino de la demanda en una cadena de
suministro en bucle cerrado.**

Autor:

Laura Fernández Peralta

Tutor:

Roberto Domínguez Cañizares

Profesor Titular

Dpto. Organización Industrial Y Gestión De Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Estudio del impacto dinámico del incremento repentino de la demanda en una cadena de suministro en bucle cerrado.

Autor: Laura Fernández Peralta

Tutor: Roberto Domínguez Cañizares

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Primero agradecer por supuesto a mi familia, a los esfuerzos que han hecho para que a día de hoy yo haya llegado hasta aquí; a mis hermanas por ser mis modelos y mis protectoras y hacerme ver la vida desde una perspectiva más madura; a mis padres por darme seguridad incluso cuando ni ellos mismos la tenían, por recordarme que sí que puedo, por darme muchísimo amor y por no escatimar en mi educación; a mis amigas por ser un cacho de mí; a Juan, mi compañero durante este camino, por ser una ola de confianza, seguridad y paz; a mis compañeros de piso por alegrarme los peores momentos y dejarme los mejores recuerdos; y, por último, a mi tutor por tener mucha paciencia conmigo, por motivarme a seguir y felicitarme cuando era necesario.

Laura Fernández Peralta

Sevilla, 2023

Resumen

El propósito de este trabajo será el estudio del comportamiento de una cadena de suministro en bucle cerrado ante un incremento inesperado de la demanda. El objetivo de dicho estudio será el aporte de soluciones que permitan no tanto eliminar el efecto del aumento de la demanda como amortiguar al máximo posible su repercusión sobre la cadena. Dichas soluciones comprenderán una variación de las variables que controlan el funcionamiento de la cadena.

Abstract

The purpose of this work will be to study the behaviour of a closed-loop supply chain when faced with a high increase in demand. The aim of this study will be to provide solutions that will not so much eliminate the effect of the increase in demand as dampen its impact on the chain as much as possible. These solutions will include a variation of the variables that control the functioning of the chain.

... -translation by DeepL Translate-

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Notación</i>	IX
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivo y motivación del trabajo	2
1.3 Estructura del trabajo	3
2 Modelo Matemático	5
2.1 Validación del modelo	7
3 Análisis de la cadena en régimen permanente	9
3.1 Diseño del experimento	9
3.2 Experimentación	10
4 Análisis de la cadena ante un incremento alto de la demanda	15
4.1 Diseño del experimento	15
4.2 Experimentación a $T_R = 2$	16
4.3 Experimentación a $T_R = 6$	19
5 Análisis de la cadena ante un incremento bajo de la demanda	23
5.1 Diseño del experimento	23
5.2 Experimentación a $T_R = 2$	24
5.3 Experimentación a $T_R = 6$	26
6 Conclusión	31
Apéndice A Código de MATLAB	35
<i>Índice de Figuras</i>	39
<i>Índice de Tablas</i>	41

Notación

$CLSC$	Cadena en bucle cerrado
OUT	Order-Up-To
$POUT$	Proportional Order-Up-To
EOL	End Of Life
$etal$	y otros
mc	Tasa de productos manufacturados finalizados
rc	Tasa de productos remanufacturados finalizados
is	Nivel de inventarios inicial
d	Demanda del consumidor
μ	Media demanda
σ	Desviación estándar demanda
Cv_r	Coefficiente de variación demanda
r	Retornos
β	Media retornos
ξ	Desviación estándar retornos
Cv_r	Coefficiente de variación retornos
ns	Nivel de inventario neto
w	<i>Work-in-progress</i>
o	Pedidos
\hat{d}	Previsión de la demanda
α	<i>smooth factor</i> de la demanda
ss	Inventario de seguridad
ε	Coefficiente del inventario de seguridad
tw	<i>Work-in-progress</i> objetivo
T_i	Tiempo que controla el inventario disponible
T_W	Tiempo que controla el <i>Work-in-progress</i>
T_m	Tiempo de manufacturación
T_R	Tiempo de remanufacturación
T_C	Tiempo de consumo
OVR	Índice de variabilidad de pedidos
$\Delta\mu$	Incremento de la demanda
$I.C.$	Intervalo de confianza
T_{recup}	Tiempo de recuperación

1 Introducción

1.1 Contexto

Hoy en día, la mayor parte de los productos necesarios para la vida cotidiana de las personas, (móviles, ropa, ordenadores, etc.) son elaborados en cadenas de suministro. Una cadena de suministro es un sistema interconectado de organizaciones, personas, actividades, información y recursos que agrupa todo lo necesario para permitir el flujo del producto requerido para suministrar un bien o servicio a un consumidor final. Este proceso comienza con la transformación de materias primas, recursos naturales y componentes para así llegar al producto final, listo para ser consumido por el cliente. En este sistema se parte de los proveedores, que abastecen de los productos, materias primas o servicios necesarios, implicando también a intermediarios, estos son los que se encuentran entre el fabricante o proveedor y el cliente final, facilitando la venta y distribución de productos y servicios, algunos ejemplos de intermediarios serán los mayoristas, minoristas, agentes o transportistas entre otros.

La cadena de suministro deberá de ser capaz de adaptarse a los cambios del mercado, es decir, deberá de ser flexible, para esto será conveniente, entre otras cosas, diversificar los proveedores, para evitar depender de uno solo, mantener niveles adecuados de inventario, utilizar tecnologías avanzadas y seguir técnicas de fabricación flexible, como la fabricación bajo demanda o la fabricación modular. En la gestión de la cadena de suministros será crucial ejercer un control de los flujos de datos, la producción de bienes, las actividades y funciones de los empleados, las rutinas logísticas, los costos, los canales de distribución y el tiempo de entrega. Una cadena de suministro es una gran red, por ello, a la hora de organizarla será decisiva una planificación, coordinación y colaboración entre los componentes de esta. Es también importante gestionarla de una manera eficiente para así reducir costos, disminuir el tiempo de entrega y satisfacer la demanda, es por ello que se utiliza el flujo de información de las etapas de producción y también de distribución y venta.

El tipo de cadena de suministro en el que se centrará el estudio será la cadena de suministro cerrada. Esta consiste en una cadena en la que el material sigue dos flujos, uno directo, desde el proveedor hasta el cliente y otro de retorno, que devuelve el material al proveedor, es decir, será la combinación de una cadena de suministro tradicional y una inversa (devoluciones). Mientras que la cadena de suministro convencional representa un modelo de economía lineal, la cadena de suministro en bucle cerrado representa el concepto de economía circular, cuyo objetivo será disminuir al máximo posible el derroche de recursos, así como disminuir el impacto ambiental. La principal diferencia entre la cadena de suministro en bucle abierto (o tradicional) y en bucle cerrado será el manejo del flujo de materiales y productos después de su uso. El objetivo de la cadena de suministro en bucle cerrado es reducir el volumen de materias primas necesarias en la línea de producción, a través de la transformación, reutilización o reciclaje. La ventaja de este tipo de cadena es una reducción de los desperdicios y debido a esto una mejora de la reputación de la empresa, pues dota a esta de un compromiso social y medioambiental.

La necesidad de utilizar una cadena en bucle cerrado en vez de bucle abierto residirá, como explica [4] Govindan, K. *et. al* (2015), en la necesidad de dar una segunda oportunidad a los productos EOL (*End of life*), que serán sometidos a procesos de reciclaje, remanufactura o reparación. En el primero de los casos se utilizarán las piezas del producto retornado para fabricar otros, en los dos últimos casos se preparan los productos retornados para su vuelta al mercado, de segunda mano o primario. El caso que se estudiará en este trabajo será el de la adaptación del producto devuelto para su venta como producto de primera mano, es decir, el producto manufacturado y el remanufacturado funcionan como perfectos sustitutos ([2] Cannella, S.*et al.* , 2021).

En la sociedad actual todavía faltan muchos pasos para adaptar las cadenas de suministro actuales a la CLSC, pues las cadenas en bucle abierto siguen siendo más competitivas en cuanto a precios y agilidad. Sin embargo la condición actual medioambiental requiere que se lleven a cabo medidas más severas, medidas como la implementación de una CLSC, hecho que será más fácil en algunas industrias que en otras, por ejemplo, en la industria alimentaria puede ser complejo implementar una CLSC debido a la naturaleza perecedera de los productos. No solo el cambio climático debería de empujar cada vez más a adoptar otros métodos menos hirientes para el medio ambiente, sino también el agotamiento de los recursos naturales, debido al crecimiento de la población y del consumo, es por ello que se debería de reducir el consumo de productos de un solo uso e ir implementando, en todas las industrias que lo permitieran, las cadenas de suministro en bucle cerrado. Obviamente este hecho no supondría la solución a la crisis climática pero teniendo en cuenta que ” La extracción y procesamiento de recursos son responsables del 90% de la pérdida de biodiversidad y el estrés hídrico y del 50% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero” ([8]), la utilización de las cadenas de suministro cerradas sería de gran ayuda. A día de hoy se pueden encontrar marcas que ya están trabajando con *semi closed loop supply chain* como por ejemplo Nike. En 2018 más del 75% de los productos de esta marca contenían algún tipo de textiles reciclados, siendo además Nike la empresa que más poliéster reciclado utiliza en la industria.

Una cadena de suministro, sea circular o lineal, está muy expuesta a los cambios que se pueden dar en la sociedad y por ende en los patrones de consumo. Esta exposición se verá reflejada en el efecto látigo o *Bullwhip effect* que consiste en una amplificación de un desajuste producido en un punto de la cadena, incluso en un entorno de demanda estable, de modo que este desajuste, que se produce en un punto determinado de la cadena, va en aumento a medida que se avanza en las etapas de la cadena, produciendo una excesiva fluctuación de los inventarios y los pedidos. Este efecto se puede traducir en problemas de inventario, roturas de *stock*, contratación o despido de empleados, entre otras consecuencias. El efecto látigo produce una de-sincronización entre la oferta y la demanda.

Aquello que puede llevar a que se dé el efecto látigo en una cadena puede ser entre otras cosas una demanda inestable, que dificultará la previsión de esta, una comunicación entre los eslabones de la cadena no fluida, que llevará a una pobre estimación de la demanda, pedidos de lotes grandes en periodos más largos de tiempo, en vez de pequeños lotes cada menos tiempo, tiempos de entrega largos, etc.

Para minimizar el efecto látigo puede ayudar aumentar la flexibilidad en la cadena de suministro, mejorar la comunicación entre los eslabones de esta, dotar a la cadena de una mayor coordinación, mejorar la planificación del inventario, etc.

1.2 Objetivo y motivación del trabajo

Aunque bien es sabido que la demanda funciona de una manera aleatoria y puede sufrir picos y valles a menudo, los acontecimientos que ocurren en la sociedad pueden promover que la demanda sufra fluctuaciones mucho mayores, que lleven a que se dé el efecto látigo. Un ejemplo de esto pueden ser el aumento de la demanda de armas en Europa debido a la invasión de Ucrania por parte

de Rusia en 2022, o el aumento de la demanda en distintos sectores propiciada por la pandemia COVID-19.

La pandemia produjo un cambio en los patrones de consumo de la población, que resultó en un crecimiento increíble de las compras *online*, que a su vez generó bloqueos en determinados sectores ([6] Bartsch, E., *et al*, 2022). Por otro lado durante la guerra de Ucrania, se vieron involucradas Rusia y Ucrania siendo ambas, dos de las mayores exportadoras de trigo del mundo, por ello, industrias como la de la harina se vieron afectadas por las fluctuaciones del mercado; paralelamente los países de la OTAN dieron armas a Ucrania, por lo que se produjo un aumento de la demanda de armas en estos países.

Estos hechos inesperados y significativos, que interrumpen el flujo normal de bienes a lo largo de la cadena de suministro, son llamados *disrupciones* de la cadena. Estas *disrupciones* podrán tener consecuencias sobre una o varias etapas de la cadena, desde la obtención de la materia prima hasta la entrega del producto terminado al consumidor. La aleatoriedad con la que se caracterizan estas *disrupciones* hace que sea necesario preparar la cadena de suministro para una posible *disrupción*, de modo que los efectos negativos de esta se suavicen, pero sin afectar excesivamente al comportamiento normal de la cadena.

Como se ha comentado ya, una *disrupción* en la cadena puede tener un efecto significativo sobre la demanda, la oferta, la producción, etc. Esto se traduce en un aumento de la incertidumbre y la dificultad para planificar y adaptarse a la situación, es decir, aumenta el desajuste entre la demanda y la oferta, incrementando así el riesgo de que se dé el efecto látigo. Es por ello que este trabajo se centrará en cómo adaptar la cadena a estas *disrupciones* a partir de la combinación de las distintas variables que controlan la evolución de la cadena y concretamente se pretende suavizar el efecto látigo a través del control de los retornos. Es por ello que se tomará como variables de control aquellas que van a estar relacionadas con el cuándo y cuánto producto retorna, de tal manera que será con los valores de estas variables con los que se jugará, estudiando la respuesta de la cadena ante su variación. Para simular esta *disrupción*, en este trabajo se someterá la cadena a un aumento inesperado de la demanda una vez establecido el régimen permanente, propiciando así la aparición del efecto látigo.

1.3 Estructura del trabajo

Con este proyecto se busca estudiar el efecto látigo en distintas configuraciones de la cadena con el objetivo de disminuir su impacto, mejorando así el comportamiento de la cadena. La estructura del trabajo será: una sección dedicada al modelo matemático (2) en el que se mostrarán las ecuaciones matemáticas escogidas para poder representar y estudiar la evolución de la cadena, se justificará el uso de dichas ecuaciones y cuál será el método para estudiar su evolución con el tiempo; a continuación se pasará a una validación del modelo, es decir, comprobar que efectivamente el modelo matemático ya comentado está bien planteado y los parámetros escogidos son correctos; una vez validado el modelo se mostrará el funcionamiento de la cadena en régimen permanente (3), para así ver cuál es el comportamiento "normal" de esta y para apreciar mejor las diferencias y cambios que se dan al tener el incremento de la demanda; después se estudiará la evolución de la cadena para un incremento alto de la demanda (4), que es como se modelará la *disrupción*, propiciando así que se dé el efecto látigo, de modo que el nivel normal de comportamiento se rompa sometiendo la cadena a un cierto estrés; se comprobará todo lo ya estudiado para el valor mayor del incremento de la demanda sobre una cadena con un incremento de la demanda menor (5); por último se mostrarán las conclusiones (6), obtenidas a través de la experimentación llevada a cabo y algunas posibles soluciones.

Para poder estudiar la cadena, su comportamiento y el efecto látigo utilizaremos una métrica llamada OVR (muy común en la literatura) propuesta por [3] Chen et al. (2000) y que será un indicador clave del rendimiento.

2 Modelo Matemático

En este capítulo se mostrará el conjunto de ecuaciones escogidas para representar el problema, se justificará su uso y se explicará su implementación.

El modelo utilizado, cuyas ecuaciones se muestran a continuación, ha sido extraído de un artículo científico de alto nivel, *Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains* ([2] Cannella, S. *et al*, 2021). El modelo representado en este artículo modela también una cadena de suministro cerrada y se adapta muy bien a los objetivos de este trabajo.

En este modelo además se empleará una política *POUT* esta consistirá en un *OUT* (política de control sobre el nivel de *stock*) con un control de retroalimentación proporcional, este controlador proporcional me permitirá limitar el llamado efecto látigo. Con este tipo de política se podrá igualar la variación de los pedidos a los niveles de variación de la demanda. El precio a pagar en este tipo de política será tener un inventario extra con el coste que esto deriva. La ventaja principal que se encontrará para usar la política *POUT* será que ajustará el nivel de inventarios proporcionalmente a la demanda, con esto se ayudará a evitar bien la falta de productos, bien la acumulación excesiva de estos.

Este modelo empleado servirá para simular la cadena de suministro. La simulación ha sido empleada frente a un modelo analítico, pues esta permitirá representar la complejidad de una cadena de suministro cerrada mediante una flexibilidad y precisión que no será posible desde un enfoque analítico; además mediante la simulación será mucho más sencillo cambiar el valor de los parámetros y hacer un análisis más profundo de escenarios complejos. En conclusión, el modelo analítico será demasiado limitado como para representar estos fenómenos dinámicos en cadenas de suministro circulares. El hecho de escoger la simulación queda también apoyado en la literatura: "La herramienta propuesta es la simulación, ya que esta permite trabajar con sistemas complejos y gran cantidad de variables, donde muchas de ellas son de carácter aleatorio" ([7] Villanueva, A. *et al*, 2011).

Manufacturing completion rate:

$$mc(t) = o(t - T_m - 1); \quad (2.1)$$

Esta ecuación permite establecer una relación entre los pedidos realizados $T_m - 1$ periodos atrás con la tasa de productos que han sido terminados. Donde T_m representa el número de periodos empleados para obtener el producto de cero.

Remanufacturing completion rate:

$$rc(t) = r(t - T_R - 1); \quad (2.2)$$

Establece una relación entre los retornos efectuados $T_R - 1$ periodos atrás con la tasa de productos devueltos que ya están listos para la venta. La remanufactura permite acondicionar el producto

otra vez para su venta. T_R representará el número de periodos empleados en preparar el producto retornado para su venta.

Initial stock:

$$is(t) = ns(t-1) + mc(t) + rc(t); \quad (2.3)$$

Aquí se indica el nivel de inventarios con el que se inicia cada periodo. Este inventario estará conformado por los productos, nuevos y devueltos, terminados en ese periodo y también el nivel de inventarios al final del periodo anterior.

Customer demand:

$$d(t) = \max\{x(t), 0\}, x(t) \rightarrow N(\mu, \sigma^2); \quad (2.4)$$

Será necesario establecer un modelo para la determinación de la demanda. Para la representación de la demanda se ha escogido una distribución normal de media μ y desviación estándar σ . Esta última se calculará a partir del parámetro Cvd de la siguiente manera $\sigma = Cvd \cdot \mu$.

Customer returns:

$$r(t) = y(t)d(t - T_C), y(t) = \min\{\max\{z(t), 0\} 1\}, z(t) \rightarrow N(\beta, \xi^2); \quad (2.5)$$

Se expresan los retornos como un porcentaje de la demanda dada T_C periodos atrás. Siendo T_C el tiempo de consumo de los productos retornados. El parámetro con el que se escalará la demanda, y_t , será un valor perteneciente al intervalo $[0,1]$, calculado a partir de una distribución normal de media β y desviación estándar ξ (siempre que el valor aleatorio proporcionado por esta distribución esté comprendido en el intervalo mencionado). ξ se calculará a partir del parámetro Cvr de la siguiente manera $\xi = Cvr \cdot \beta$.

Net stocks:

$$ns(t) = is(t) - d(t); \quad (2.6)$$

Define el nivel de inventarios al final del periodo, que será el nivel de inventarios con el que se iniciará el siguiente periodo.

Work-in-progress:

$$w(t) = w(t-1) + (o_{(t-1)} - mc(t)) + (r(t-1) - rc(t)); \quad (2.7)$$

Determina el número de productos, nuevos y retornados, sobre los que se está trabajando para prepararlos para su venta.

Production order:

$$o(t) = \max\left\{\left(d(\hat{t}) - rc(t)\right) + \frac{1}{T_i}(ss(t) - ns(t)) + \frac{1}{T_w}(tw(t) - w(t)), 0\right\}; \quad (2.8)$$

Pedidos necesarios para suplir la demanda. T_i y T_w son constantes de tiempo usadas para controlar el inventario y el *work-in-progress* respectivamente.

Demand forecast:

$$d(\hat{t}) = \alpha d(t) + (1 - \alpha)d(\hat{t} - 1); \quad (2.9)$$

Una vez calculada la demanda en 2.4 el modelo de predicción de la demanda será este, pues para poder hacer una planificación de la producción, primero habrá que conocer la planificación de la demanda. Para adaptar la demanda a la planificación de la demanda se utilizará un factor de suavizado α que ajusta los datos históricos y predice la demanda futura.

Safety stock:

$$ss(t) = \varepsilon d(\hat{t}); \quad (2.10)$$

Para modelar el *Safety stock* se utilizará un *Safety stock factor* ε .

Target work-in-progress:

$$tw(t) = T_p d(\hat{t}); \tag{2.11}$$

Esta ecuación hará referencia al nivel deseado de *work-in-progress* que se establece como referencia. T_p será el tiempo de espera en el flujo de producción.

2.1 Validación del modelo

Para poder tomar como correcto el modelo matemático previamente mostrado se procederá a hacer una validación de este comparándolo con resultados contrastados. Para ello se comparará la gráfica que representa la evolución de la métrica J con la variación de T_i recogida en el artículo *Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains* ([2] Cannella, S. et al, 2021) con la obtenida a partir del modelo matemático representado en esta sección. J representa el ratio entre la métrica OVR e IVR, donde OVR representa la *Order Variability Ratio*, es decir, la varianza de los pedidos, e IVR representa la varianza del inventario, *Inventory Variability Ratio*. Para esta comprobación se ha utilizado el mismo código empleado para el resto de la experimentación (A), solo que en vez de mantener el parámetro T_i constante, como se explicará más adelante que se hará en el resto de la simulación, se tomará una serie de valores ([1,2,4,8,16,32,64,128]), a partir de los cuales se obtendrá J. El valor del resto de parámetros que aparecen en las ecuaciones de A serán los mismos que los representados en la tabla 3.2 salvo k_o y K_i que serán 0.5 pues son los dos valores escogidos para esta gráfica en el artículo, los dos parámetros que faltan por representar en la tabla tendrán el siguiente valor $T_C = 16$ y $T_R = 2$, todo esto ha sido obtenido, como ya se ha mencionado, basándose en los valores representados en el artículo *Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains* ([2] Cannella, S. et al, 2021).

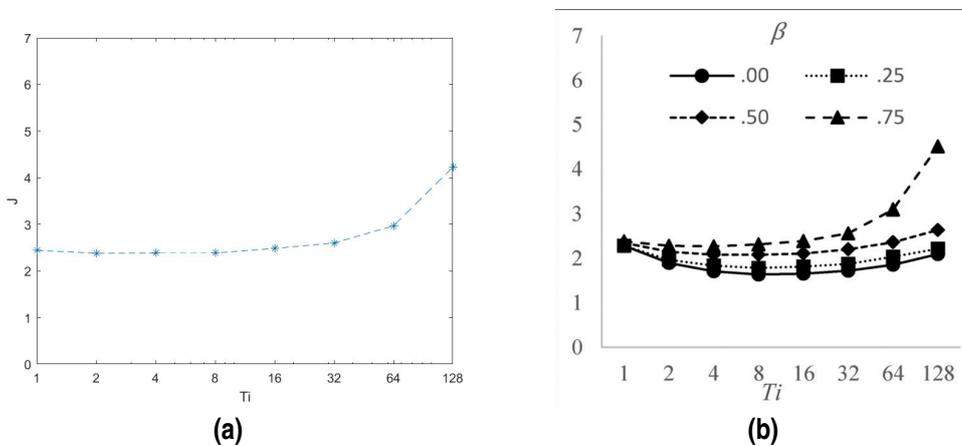


Figura 2.1 Comparación de ambas gráficas.

A la izquierda se puede ver la gráfica obtenida a partir del modelo matemático expresado en el comienzo de este capítulo, a la derecha la gráfica obtenida del artículo comentado. Se tendrá en cuenta la curva marcada con triángulos en la gráfica del artículo, pues $\beta = 0.75$ ha sido el valor escogido para la validación. Como se puede apreciar la evolución de ambas curvas es bastante parecida sirviendo esto para validar las ecuaciones matemáticas escogidas para representar la cadena de suministro.

3 Análisis de la cadena en régimen permanente

En este capítulo se observará cómo se desarrolla el comportamiento de la cadena, particularmente de los inventarios y los pedidos, cuando solo se contempla la variabilidad de la demanda sin añadir un incremento de esta. Este estudio preliminar permitirá apreciar con mayor detalle y exactitud qué comportamientos inusuales adopta la cadena al incrementar la demanda de manera repentina. A parte de las gráficas en las que se representará la evolución de los pedidos y del inventario con el tiempo, también se recogerá en una tabla el valor de la métrica OVR (que representará la variabilidad de las órdenes a partir del periodo 500 hasta el 550, siendo este intervalo el que interesa estudiar en capítulos posteriores) con su respectivo intervalo de confianza, para cada combinación de variables.

3.1 Diseño del experimento

En este experimento las variables escogidas serán T_C , β y T_R , los dos valores adoptados por cada variable en esta experimentación quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Valores variables en régimen.

T_C	β	T_R
[5,30]	[0.1,0.8]	[2,6]

Por otro lado en la siguiente tabla se representan los parámetros utilizados en la experimentación:

Tabla 3.2 Parámetros en régimen.

μ	Cvd	Cvr	T_m	T_i	T_w	ϵ	α	k_o	k_i	$\Delta\mu$
100	0.3	0.2	4	4	4	1	0.3	0.25	0.75	0

Para fijar los valores de los parámetros se ha tomado como referencia el artículo *Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains* ([2] Cannella, S. et al, 2021), por ser los objetivos de este artículo parecidos a los de este trabajo. En cuanto a las variables, β toma dos valores comprendidos en el intervalo de variación en el que se recomienda, en dicho artículo, que esté comprendida esta variable; en el artículo se toma como valor óptimo de $T_C = 16$ por ello para este trabajo se tomará un valor por abajo, 5, y otro por encima, 30; por último en cuanto a lo que respecta a T_R se tomará 2 que es el valor escogido por el artículo y se aumentará un poco el valor de este para obtener el segundo valor.

La experimentación se realizará implementando con MATLAB el código recogido en el apéndice (A) con los parámetros y variables establecidos en esta sección. Para ello se utilizará un intervalo de 2100 periodos en la simulación y se realizarán 30 repeticiones, pese a que para el siguiente capítulo (4) se utilizarán 10 repeticiones, este número de repeticiones no era suficiente para el caso sin incremento de la demanda pues los intervalos de confianza eran demasiado amplios y no permitía apreciar con claridad la tendencia de la cadena. Se centrará la atención en el intervalo comprendido entre el periodo 450 y el 550, pues será en el periodo 500 donde se dé el incremento de la demanda en los siguientes capítulos, y esto me permitirá tener un comportamiento referencia de la cadena sin incrementos repentinos de la demanda.

3.2 Experimentación

A continuación se muestran todas las gráficas previamente comentadas con todas las combinaciones de las variables de control escogidas. Posteriormente a las imágenes se encontrarán dos tablas (3.3 y 3.4) que recogerán los valores de OVR para cada combinación de las variables.

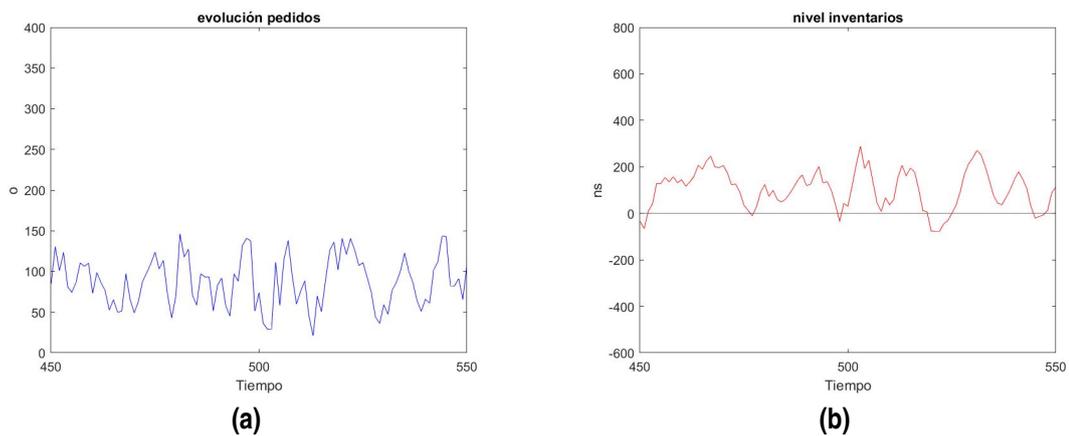


Figura 3.1 $T_C = 30$, $\beta = 0.1$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0$.

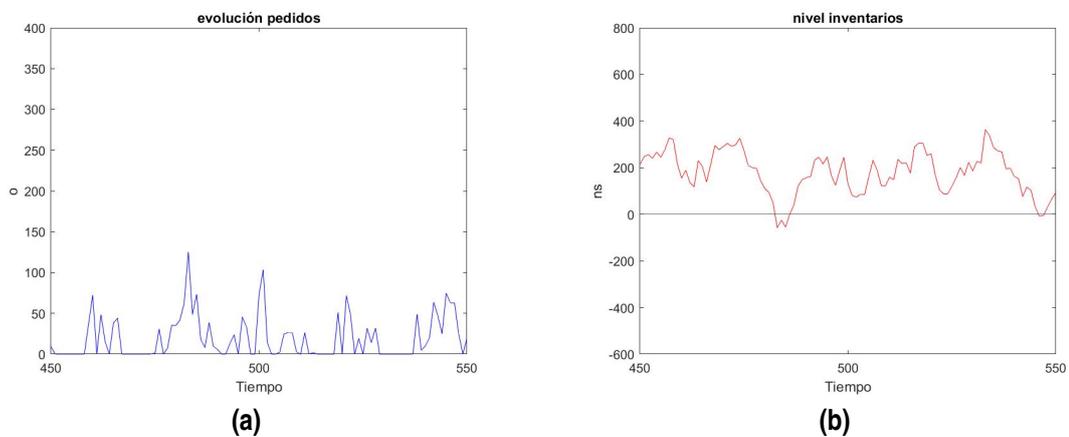


Figura 3.2 $T_C = 30$, $\beta = 0.8$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0$.

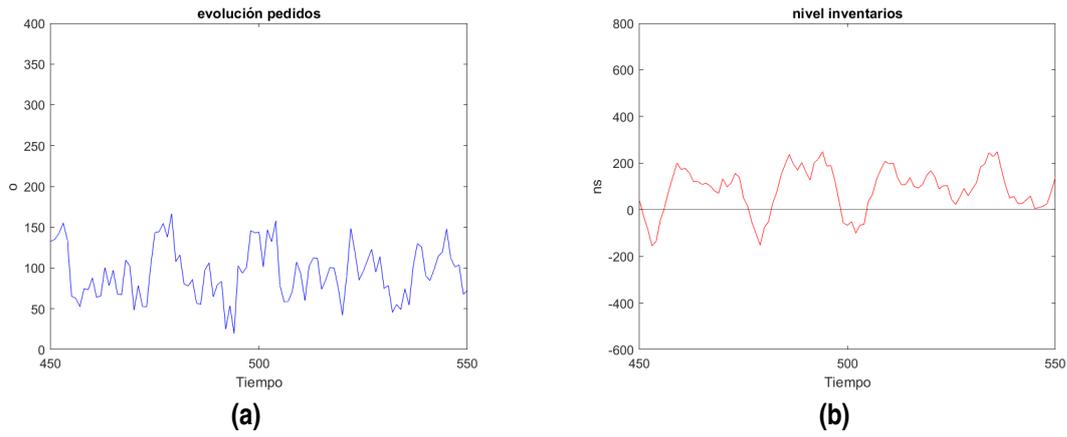


Figura 3.3 $T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0$.

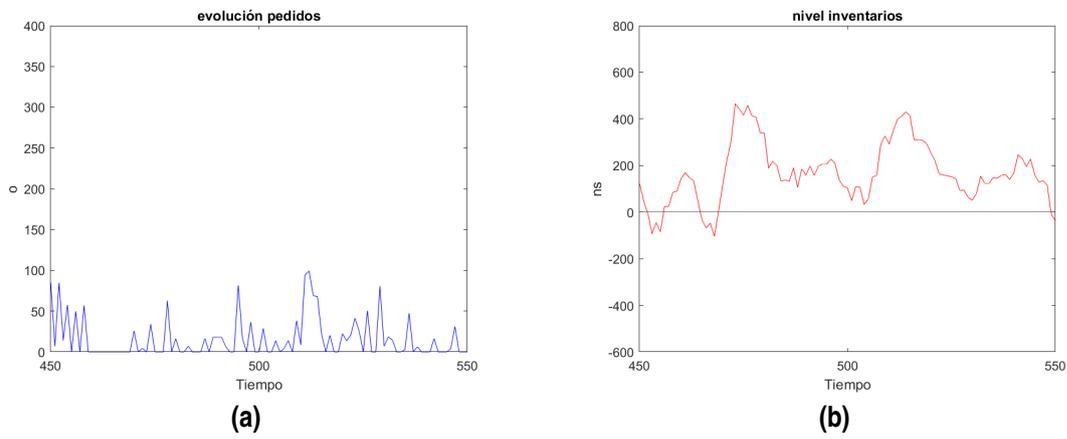


Figura 3.4 $T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0$.

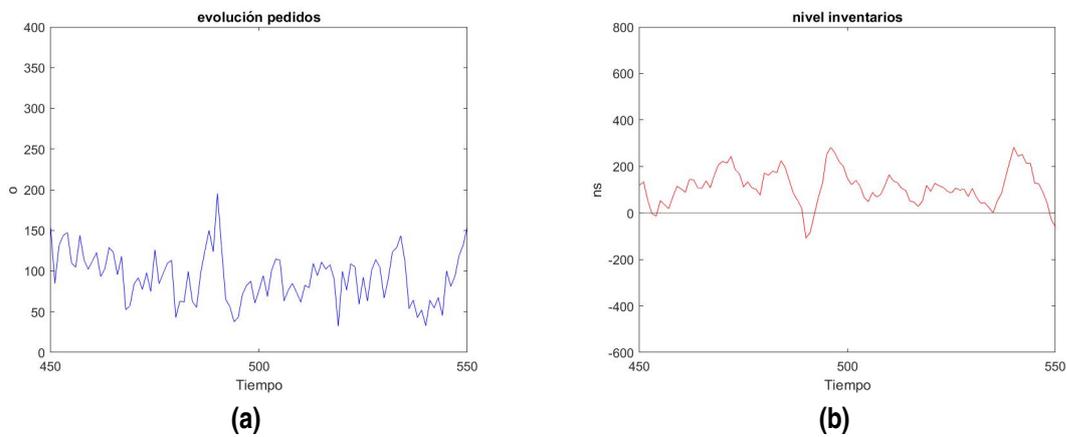


Figura 3.5 $T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0$.

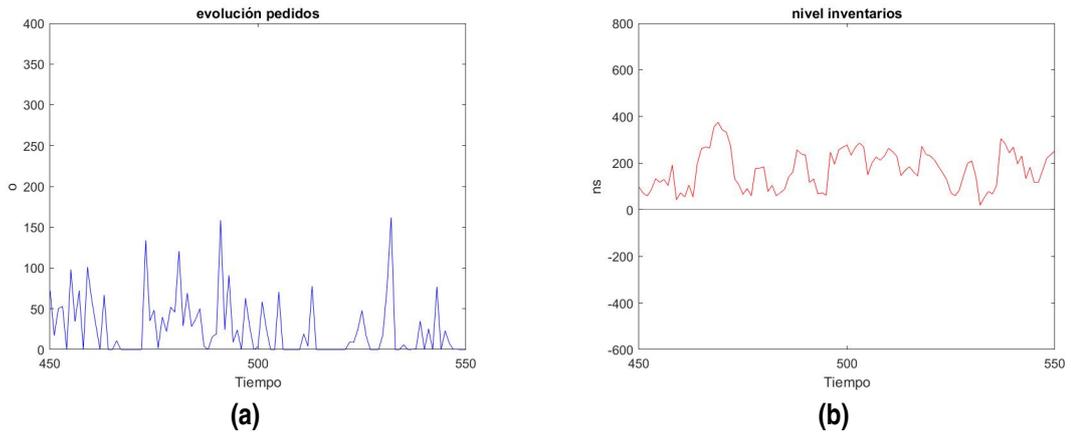


Figura 3.6 $T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0$.

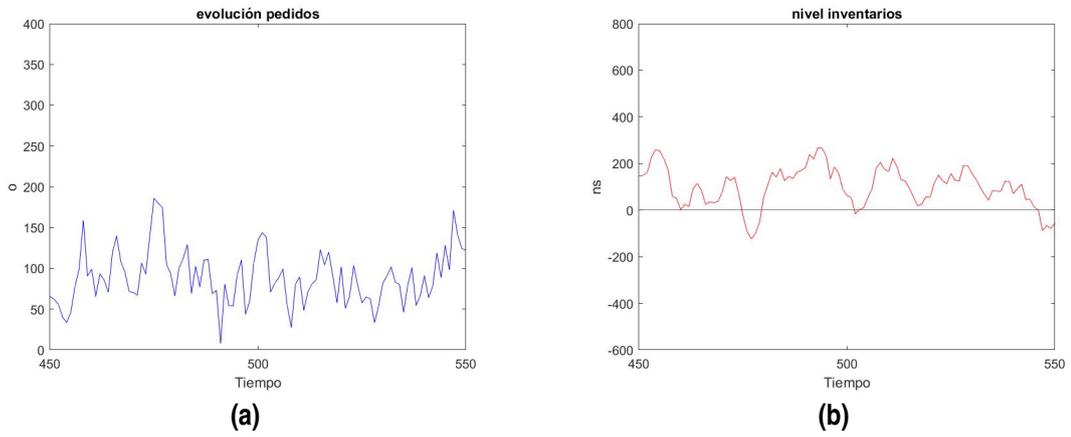


Figura 3.7 $T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0$.

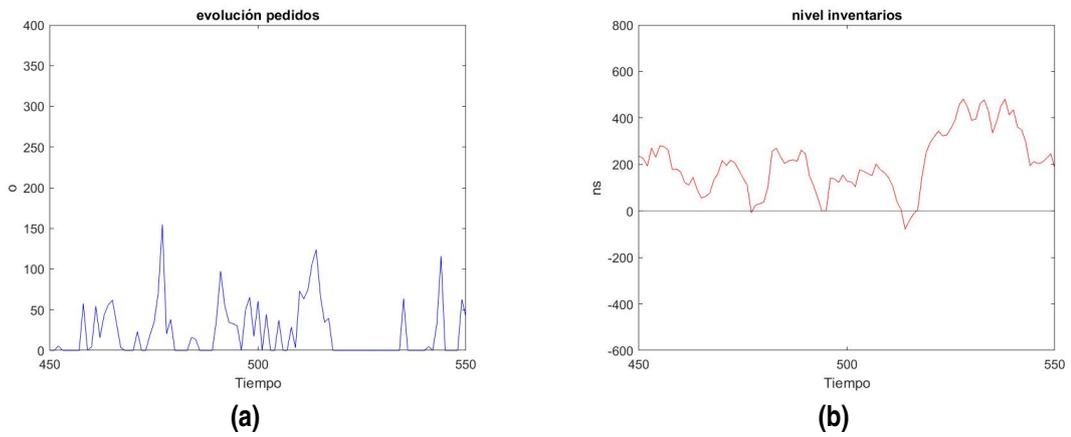


Figura 3.8 $T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0$.

De esta serie de gráficas se puede ver que para un valor constante de T_C , sea 30 o 5, e independientemente del valor de T_R , se tendrá la misma evolución de las gráficas o y ns al aumentar el valor de β . Al aumentar β la gráfica de o se trasladará hacia el eje de abscisas, esto es debido a que al recibir un mayor número de retornos, la cantidad a producir para suplir la demanda desciende. Este hecho se podrá ver también en la evolución de ns que al contrario de la otra gráfica, al aumentar β se alejará del eje de abscisas debido a que los retornos aumentan pero la media de la demanda sigue siendo la misma, por lo que habrá que almacenar estos productos retornados haciendo que aumente el nivel de inventario. Es decir, lo que más claramente se podrá apreciar en las gráficas será la variación de β .

A continuación se recogen los valores de OVR para combinación de las variables de control, se divide en dos tablas siendo para la primera tabla (3.3) $T_R = 2$ constante y para la segunda (3.4) $T_R = 6$ constante.

Tabla 3.3 OVR en régimen, $T_R = 2$.

	$T_C = 30, \beta=0.1, T_R = 2$	$T_C = 30, \beta=0.8, T_R = 2$	$T_C = 5, \beta=0.1, T_R = 2$	$T_C = 5, \beta=0.8, T_R = 2$
OVR	1.124	0.843	1.207	0.837
I.C.	[1.030, 1.219]	[0.758, 0.928]	[1.084, 1.329]	[0.770, 0.905]

Tabla 3.4 OVR en régimen, $T_R = 6$.

	$T_C = 30, \beta=0.1, T_R = 6$	$T_C = 30, \beta=0.8, T_R = 6$	$T_C = 5, \beta=0.1, T_R = 6$	$T_C = 5, \beta=0.8, T_R = 6$
OVR	1.239	0.968	1.212	0.998
I.C.	[1.130, 1.348]	[0.861, 1.075]	[1.096, 1.330]	[0.876, 1.120]

Como se puede apreciar tanto en la tabla para $T_R = 2$ como en la de $T_R = 6$, manteniendo el tiempo de consumo constante (tanto para $T_C = 5$ como para $T_C = 30$), si se aumenta la media de los retornos disminuirá el valor de OVR, lo cual quiere decir que el aumento de la cantidad de material retornado favorece a la cadena, algo previsible. El impacto de la variación del tiempo de consumo apenas será visible en el parámetro OVR, es decir, si el tiempo que tarda en llegar el material retornado aumenta la cadena no se verá perjudicada. Lo mismo pasa al aumentar T_R , aunque esto ya es sabido de estudios anteriores ([1] Dominguez, R. *et al*, 2020), se ha querido mostrar gráficamente y a través del parámetro OVR para compararlo con el impacto que tendrá sobre la cadena en los capítulos posteriores.

4 Análisis de la cadena ante un incremento alto de la demanda

A continuación se mostrará el desarrollo de la cadena, concretamente de los inventarios y los pedidos, al igual que en el capítulo anterior, ahora para un incremento repentino de la demanda considerable (75%). Con este incremento de la demanda lo que se buscará, como ya se había explicado en la introducción, será propiciar la aparición del efecto látigo para estudiar la combinación de las variables de control óptima que ayudará a amortiguar su efecto, manteniendo un comportamiento de la cadena lo más estable posible. A continuación de las gráficas se representará una tabla con el valor de OVR (que representará la variabilidad de los órdenes a partir del periodo 500 hasta el 550) y con el del tiempo de recuperación de la cadena (número de periodos para que, tras el impacto de la demanda, el nivel de inventarios se vuelva a hacer positivo), además de los respectivos intervalos de confianza para cada combinación de las variables de control. Primero se realizará un análisis con un valor de $T_R = 2$ y en la sección siguiente (4.3) se verán los efectos de aumentar esta variable, pues el estudio con un incremento en la demanda será más extenso al ser las consecuencias de esta variación de T_R mucho más significativas.

El incremento repentino de la demanda se dará en el periodo 500 pues es cuando ya se ha dado el *warm-up* de la cadena y se puede ver su funcionamiento en régimen permanente.

4.1 Diseño del experimento

En este experimento las variables escogidas serán T_C , β y T_R , los dos valores adoptados por cada variable en esta experimentación quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Valores variables en transitorio alto.

T_C	β	T_R
[5,30]	[0.1,0.8]	[2,6]

Por otro lado en la siguiente tabla se representa el valor de los parámetros utilizados en la experimentación:

Tabla 4.2 Parámetros en transitorio alto.

μ	Cvd	Cvr	T_m	T_i	T_w	ε	α	k_o	k_i	$\Delta\mu$
100	0.3	0.2	4	4	4	1	0.3	0.25	0.75	0.75

Como se puede ver el único valor que ha cambiado del capítulo 3 a este ha sido $\Delta\mu$ pues ahora si que habrá un incremento en la demanda.

La experimentación se realizará implementando con MATLAB el código recogido en el apéndice (A) con los parámetros y variables establecidos en esta sección. Para ello se utilizará un intervalo de 2100 periodos en la simulación y se realizarán 10 repeticiones. Se centrará la atención en el intervalo comprendido entre el periodo 450 y el 550, pues será en el periodo 500 donde se dé el incremento de la demanda.

4.2 Experimentación a $T_R = 2$

A continuación se muestran las gráficas obtenidas al variar T_C y β para un valor del incremento de la demanda del 75% y un $T_R = 2$, además de un tabla en la cual se recogerán los valores de OVR y del tiempo de recuperación de la cadena, también se incluirán los intervalos de confianza de ambas.

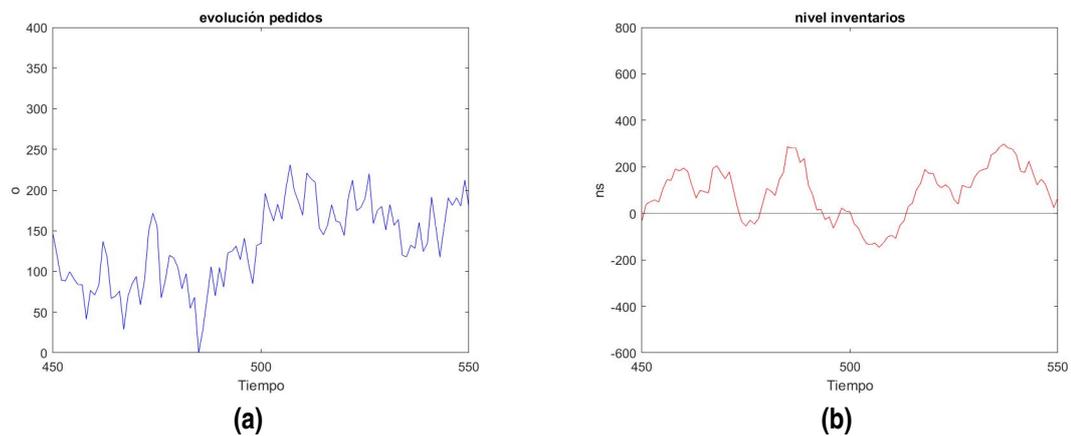


Figura 4.1 $T_C = 30$, $\beta = 0.1$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.75$.

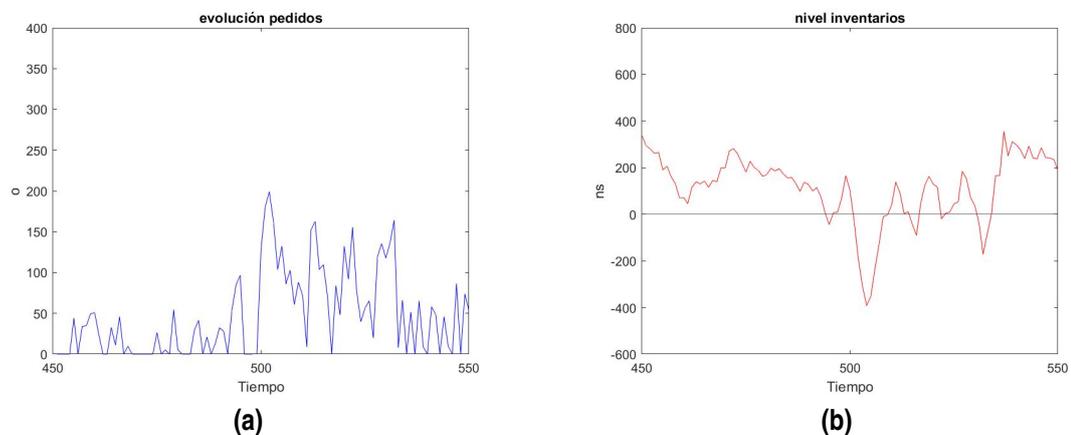


Figura 4.2 $T_C = 30$, $\beta = 0.8$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.75$.

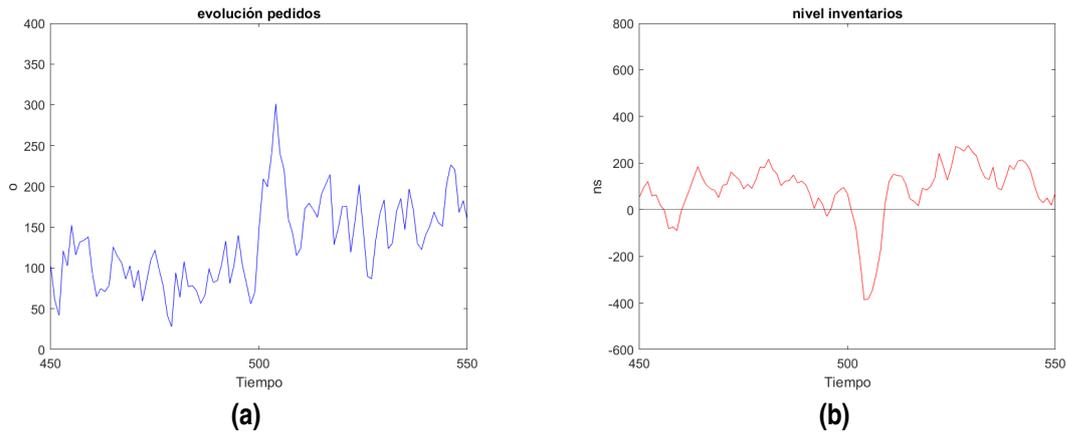


Figura 4.3 $T_C = 5$, $\beta = 0.1$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.75$.

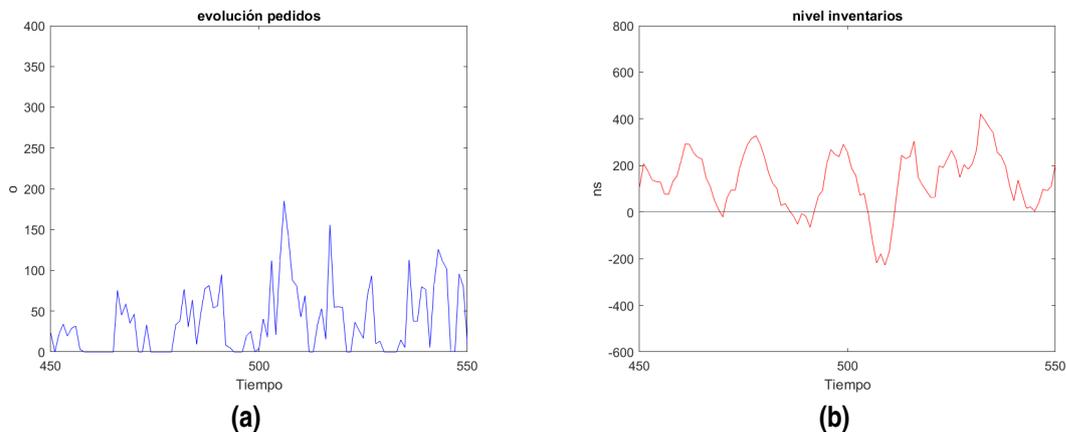


Figura 4.4 $T_C = 5$, $\beta = 0.8$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.75$.

Se comenzará por comentar las gráficas que representan la evolución de los pedidos.

Para un valor de β pequeño se puede apreciar como para el intervalo comprendido entre 450-500, la media de las órdenes es aproximadamente 100 mientras que a partir de 500, cuando se da el aumento de μ , la media de las órdenes aumentará pudiendo apreciarse un "escalón", entre [450-500] y [500-550], que refleja la evolución de la demanda. Siendo el caso de $T_C = 30$ en el cual se podrá apreciar mejor dicho comportamiento, por ser la evolución de las órdenes, en este caso, un reflejo más fiel de la demanda al tener una media pequeña de los retornos y un tiempo de consumo alto, lo que implica que la presencia de los retornos significará una pequeña variación en la cadena.

Sin embargo al aumentar β se observa que a la cadena le cuesta adaptarse al nuevo valor de la demanda debido a los retornos de una mayor cantidad de productos. Llegando así al caso en el que $\beta = 0.8$ y $T_C = 5$, en el que apenas se apreciará la evolución a forma de escalón anteriormente comentada, esto es debido a que la llegada de un mayor número de los retornos cada pocos periodos comporta un aumento de la variabilidad de la cadena que aleja la evolución de los pedidos de la evolución real de la demanda.

En cuanto a las gráficas de la evolución del nivel de inventarios se podrá ver como al aumentar β los picos que alcanza el inventario se harán más pronunciados debido a la llegada de una mayor cantidad de productos al aumentar este parámetro.

En las gráficas de los inventarios se puede apreciar cómo, a diferencia de las gráficas representadas en el capítulo 3, el incremento de la demanda supone, no solo no tener inventarios para suplir la demanda, sino tener un nivel de inventarios negativo. Es decir, independientemente de la combinación de las variables de control β y T_C , el incremento de la demanda supondrá unos periodos con un inventario negativo.

A continuación para estudiar más en profundidad lo que se ha comentado previamente se analizará la siguiente tabla en la que se representan el parámetro OVR, con su correspondiente intervalo de confianza, y el número de periodos que tarda el nivel de inventarios en volver a hacerse positivo, con su intervalo de confianza.

Tabla 4.3 $\Delta\mu = 0.75$ variación de T_C y β .

	$T_C=30, \beta=0.1$	$T_C=30, \beta=0.8$	$T_C=5, \beta=0.1$	$T_C=5, \beta=0.8$
OVR	1.601	3.368	1.487	2.411
I.C.	[1.324,1.878]	[2.944,3.793]	[1.261,1.712]	[2.059,2.764]
T_{recup}	12.80	13.10	12.70	9.60
I.C.	[11.60, 14.00]	[11.78,14.42]	[10.85,14.55]	[9.077,10.123]

Se estudiará primero la evolución de OVR. Aquí se aprecia una evolución curiosa y poco intuitiva respecto al régimen permanente. Frente a un aumento de la media de los retornos no se dará una disminución de OVR, como se observaba en el régimen permanente, sino un aumento. Este hecho se dará debido a que el aumento de los retornos dará lugar a una perturbación que le llevará un tiempo a la cadena para adaptarse. Es decir la perturbación introducida en la demanda en el periodo 500 supondrá también una perturbación T_C periodos después, por los retornos de parte de los pedidos realizados en el periodo 500, lastrando la cadena.

Este hecho se ha podido apreciar en la evolución gráfica de los pedidos, como ya se ha comentado. Manteniendo un valor de β bajo obtendremos el valor más bajo de OVR, tanto para un $T_C = 30$ como para un $T_C = 5$. Es decir, mientras que la media de los productos retornados sea baja, la cadena tendrá un mejor comportamiento, respecto al resto de casos de la tabla, incluso si la llegada de los retornos es cada poco número de periodos. Por ello se extrae de esto último que la cadena será más sensible al valor de β que al de T_C . De hecho, se puede apreciar cómo para un β bajo los intervalos de confianza coinciden parcialmente para ambos valores de T_C , mientras que para un valor alto de β se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que ambos valores de OVR son distintos, siendo el más alto para $T_C = 30$, es decir, la cadena reacciona mejor con la llegada de productos cada poco tiempo que cada un tiempo mayor. O dicho de otro modo, la evolución de OVR al aumentar o disminuir T_C será la esperada o normal, vista en régimen permanente, es decir para un T_C alto los productos tardarán más en retornar, esto será un hecho negativo que se traducirá en un aumento de OVR.

De este análisis se extrae que dado que en una CLSC se produce sin saber cuánto ni cuándo retornará, a la cadena le convendrá, principalmente, que la cantidad de retornos (β) sea baja para poder mantener un buen funcionamiento de cara a una preparación de la cadena a variaciones inesperadas en la demanda.

En cuanto al tiempo de recuperación de la cadena (T_{recup}), se puede observar que hay un caso claro para el que el tiempo de recuperación será menor que el resto, el correspondiente a $T_C = 5$ y $\beta = 0.8$. Además cabe destacar que para este último caso el intervalo será más estrecho, es decir, la variación de este parámetro (T_{recup}) en un número limitado de simulaciones será menor. Tomando como base esto se podrá decir que el último caso, por tener un intervalo de variación tan pequeño y bajo en comparación con el resto, será el mejor, es decir, que en cuanto se habla de inventarios estos si que seguirán una evolución intuitiva a pesar de las variaciones introducidas en la cadena. Por

intuitiva se quiere hacer referencia a que, un T_C alto y un β bajo, percibido como algo negativo por recibir menos y cada más tiempo, tendrá una repercusión negativa sobre la cadena también.

Por último, para terminar con la simulación sobre este valor del incremento de la demanda, sería interesante estudiar la evolución de la cadena, para los cuatro casos ya mencionados, al variar el tiempo de remanufacturación.

4.3 Experimentación a $T_R = 6$

En esta sección, en la que solo se variará el valor de la variable T_R , respecto de la anterior (4.2), se volverá a estudiar la evolución de los pedidos e inventarios. Se representará nuevamente en una tabla los valores de OVR y del tiempo de recuperación con sus respectivos intervalos de confianza y por último, a modo de tablas, se hará una comparación de la evolución de OVR al aumentar/disminuir el valor de las variables de control correspondientes a todas las combinaciones ya vistas en este capítulo 4.

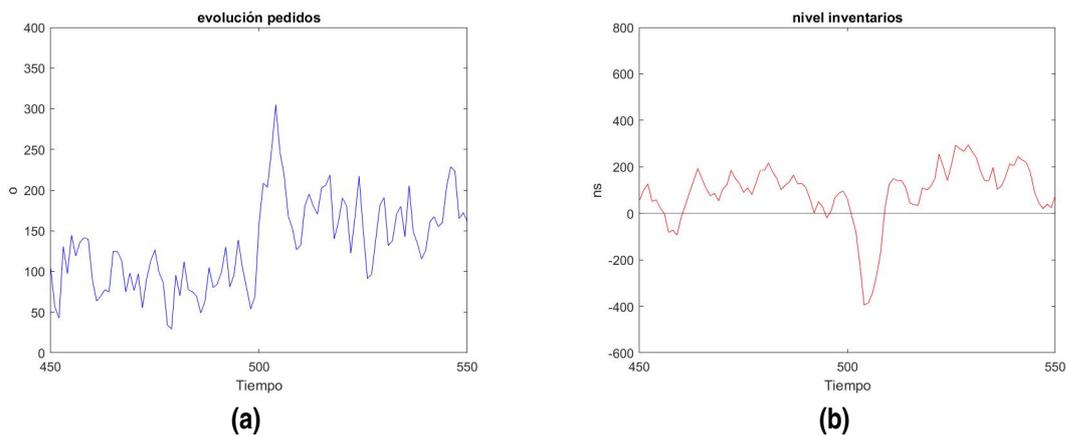


Figura 4.5 $T_C = 30$, $\beta = 0.1$, $T_R = 6$, $\Delta\mu = 0.75$.

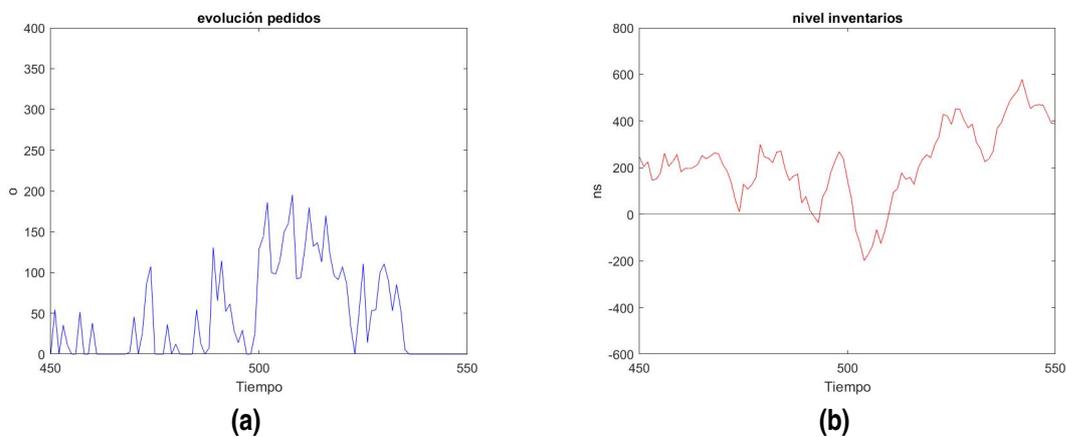


Figura 4.6 $T_C = 30$, $\beta = 0.8$, $T_R = 6$, $\Delta\mu = 0.75$.

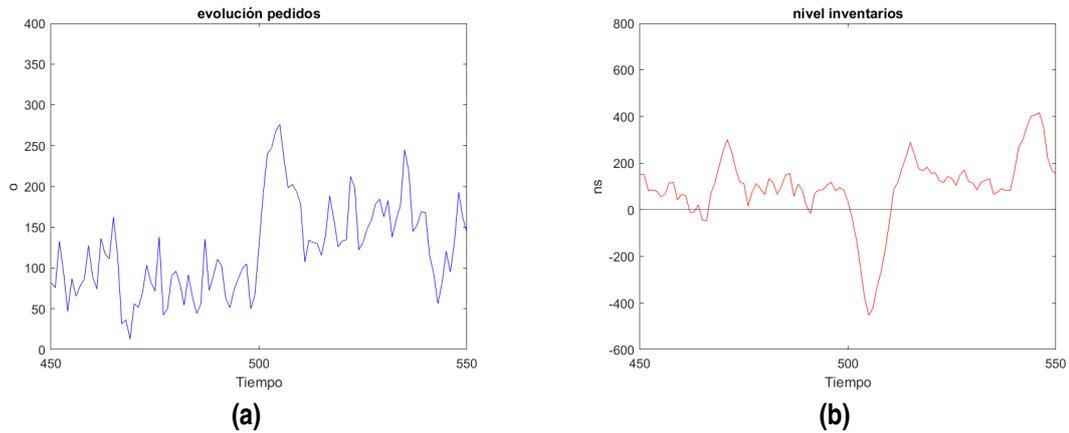


Figura 4.7 $T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$.

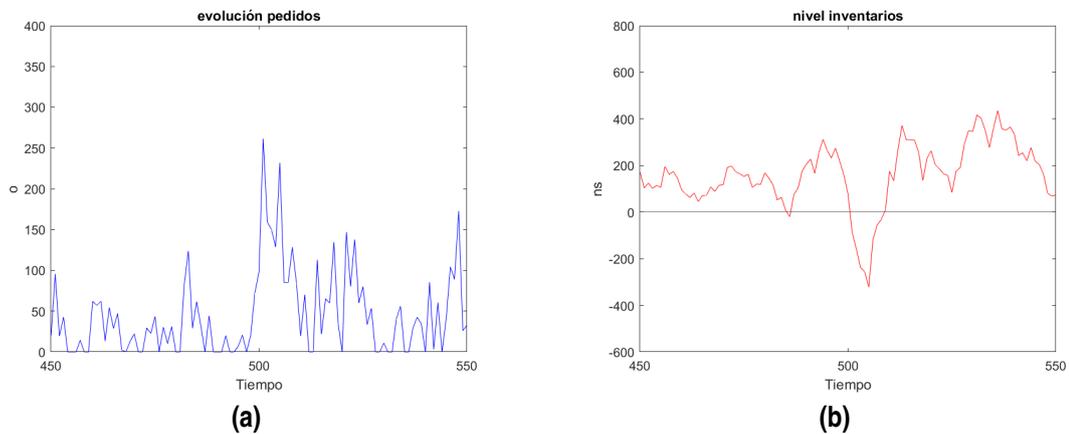


Figura 4.8 $T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$.

De las gráficas se puede ver como todo lo ya comentado para el valor de $T_R = 2$ se verifica para este T_R con la diferencia de unos picos más acentuados, en las gráficas de los pedidos, en correspondencia del periodo en el que se produce el incremento de la demanda.

Cabe destacar un hecho, que se comentará más en profundidad con el valor de OVR, las gráficas 4.3a y 4.7a guardan un parecido considerable por lo que, para un T_C bajo y un β bajo, T_R perderá su influencia sobre la cadena. Como se ha comentado, con la ayuda de las tablas utilizadas a continuación se explicará mejor este fenómeno. Es además interesante ver que al aumentar el valor de T_R la variación de T_C no comporta una gran variación en las gráficas. Asimismo se observa como es necesaria una variación de T_R mucho más pequeña que la necesaria para T_C para apreciar sus efectos sobre las gráficas, pues T_R varía de [2-6] y T_C de [5-30].

Se continuará con el análisis de la tabla de valores para poder entender más a profundidad qué cambia y por qué.

Tabla 4.4 $\Delta\mu = 0.75$ variación de T_C , T_R y β .

	$T_C = 30, \beta = 0.1$	$T_C = 30, \beta = 0.8$	$T_C = 5, \beta = 0.1$	$T_C = 5, \beta = 0.8$
OVR	1.689	4.229	1.701	3.519
I.C.	[1.505,1.872]	[3.790,4.669]	[1.419,1.983]	[3.052,3.985]
T_{recup}	11.80	10.00	12.40	9.60
I.C.	[10.84,12.76]	[8.63,11.37]	[10.547,14.253]	[8.82,10.38]

A primera vista ya se puede ver cómo, por ejemplo, para $T_C = 30$ y $\beta = 0.8$, se ha dado un aumento considerable de OVR respecto al mismo caso de la tabla 4.3, al igual que para $T_C = 5$ y $\beta = 0.8$. Respecto al tiempo de recuperación se notará una pequeña mejora (respecto a la tabla 4.3), sobretodo en los casos [$T_C = 30, \beta = 0.1$] y [$T_C = 30, \beta = 0.8$], manteniéndose prácticamente iguales para los dos casos restantes.

Tras este comentario sobre la tabla 4.4 se centrará la atención en el parámetro OVR, de modo que se establecerán comparaciones de este parámetro en distintos escenarios. Para la comparación se ha decidido establecer dos parámetros y una variable, escogidos de entre T_R , T_C y β . En cada casilla se representará un subcaso para el que se fijará una combinación de valores de los dos parámetros y se estudiará la evolución de la métrica OVR al variar la variable escogida.

En el primer caso se mantendrá constante en cada casilla T_C y T_R y se aumentará el valor de β .

Tabla 4.5 $\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: T_C y T_R , variable de control: β .

	$T_R \uparrow$	$T_R \downarrow$
$T_C \uparrow$	OVR $\uparrow\uparrow\uparrow$	OVR $\uparrow\uparrow$
$T_C \downarrow$	OVR $\uparrow\uparrow$	OVR \uparrow

El peor escenario como se puede apreciar será aquel en el que tanto el tiempo de consumo como el tiempo de remanufacturación son altos, de manera que hacen que un hecho que sería positivo (llegada de un mayor número de productos), lastre la cadena. El deterioro de la cadena al aumentar β (OVR me muestra el deterioro) con un T_C alto y un T_R bajo será equivalente a la desmejora de la cadena al aumentar β con un T_C bajo y un T_R alto. A pesar de esto último comentado no quiere decir que los efectos de aumentar uno y aumentar otro sean equivalentes pues el aumento de T_C que se está considerando es mucho mayor que el de T_R . El escenario más beneficioso en cuanto al mínimo deterioro de la cadena será aquel en el que tanto el tiempo de consumo como el de remanufacturación sean bajos.

Siguiente caso, se considera en cada casilla un T_C y un β constantes y se aumentará T_R .

Tabla 4.6 $\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: T_C y β , variable de control: T_R .

	$\beta \uparrow$	$\beta \downarrow$
$T_C \uparrow$	OVR \uparrow	OVR $\sim cte$
$T_C \downarrow$	OVR \uparrow	OVR $\sim cte$

De esta tabla se obtiene que si se consigue mantener un nivel de retornos bajo, el aumento de T_R no comportará variación en el parámetro OVR ni para un valor de T_C alto ni para uno bajo. Se encuentra un comportamiento nuevo en esta tabla si se compara frente a la otra (4.5), y es que mantener fijo el valor de β va a ejercer un control mucho más firme sobre la variabilidad de la cadena. La variación de T_R empeora la cadena, para valores altos de retornos, pero no tanto como lo hace el aumento de β . Al aumentar β se aumenta la media de los productos que el consumidor devuelve, al variar T_R , aumentándolo, aumenta el *work-in-progress*, aumentando la variabilidad,

siendo lo principal para este aumento del *work-in-progress* el aumento de β . En resumen, respecto a este caso, si el nivel de retornos es alto, independientemente del tiempo de consumo, se deberá de mantener un tiempo de remanufacturación bajo para impedir que la fluidez de la cadena empeore. Sin embargo si se consigue mantener un nivel de retornos bajo, la variabilidad de la cadena no se alterará al aumentar el tiempo de remanufacturación.

En este último caso se analizará la reacción de la cadena a un β y T_R constantes en cada casilla y un aumento de T_C .

Tabla 4.7 $\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: β y T_R , variable de control: T_C .

	$T_R \uparrow$	$T_R \downarrow$
$\beta \uparrow$	OVR \uparrow	OVR \uparrow
$\beta \downarrow$	OVR $\sim cte$	OVR $\sim cte$

En este caso se puede apreciar lo comentado para la tabla anterior (4.6) pero en esta ocasión en vez de variar T_R variaremos T_C . Aquí se puede comentar lo mismo que previamente, para un valor de β bajo se podrá hacer que la cadena tolere la incertidumbre (con la variación que ello conlleva) del momento en el que se producirá el retorno de un producto j , independientemente del valor del tiempo de remanufacturación. El aumento de T_C , al igual que el de T_R comentado en la tabla anterior, no tendrá tanto efecto como la variación de β .

A lo largo de estos tres casos se ha podido ver la influencia del parámetro T_R sobre el funcionamiento de la cadena. Se ha comentado ya que el impacto de T_R será mayor que el de T_C , esto se debe a que se aumenta la variabilidad de los pedidos, ya que como podemos ver en (2.8) estos dependerán entre otras cosas de los inventarios. A mayor T_R mayor será el *work-in-progress*, este será un parámetro que afectará directamente al nivel de inventarios pues los productos en proceso de remanufacturación (o fabricación) se consideran parte del inventario.

A modo de conclusión, la cadena será muy sensible a la variación de β , especialmente cuando T_R y T_C son altos. El aumento de estas variables comporta un peso grande sobre la cadena que se añade al aumento de la demanda repentino. De modo que si se quiere limitar la variación de la cadena se deberá, principalmente, impedir que el parámetro β pueda variar a lo largo de los periodos y aumentar; si se consigue mantener un valor bajo de este, la cadena se comportará mejor. Si por el contrario no se puede ejercer un control sobre los productos que retorna el cliente, lo que se deberá asegurar, para no tener un detrimento grande de la cadena, será un T_C y T_R bajos.

5 Análisis de la cadena ante un incremento bajo de la demanda

Tras el estudio para un incremento alto de la demanda, se comprobará todo lo ya verificado para el capítulo anterior [4], con un $\Delta\mu = 0.25$. Se verificará si las soluciones propuestas para el apartado anterior serían útiles también para este caso. Para este capítulo se espera que las gráficas tengan una evolución más moderada respecto al capítulo anterior, al igual que los valores de OVR, que se esperan más bajos. Se comprobará si la cadena evoluciona, también para este nivel del incremento de la demanda, con ese comportamiento inusual que se había comentado ya en el capítulo anterior. Es decir, este capítulo será una réplica del capítulo anterior salvando el valor del incremento de la demanda, ahora más reducido.

5.1 Diseño del experimento

En este experimento las variables escogidas serán de nuevo T_C , β y T_R , los dos valores adoptados por cada variable en esta experimentación quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Valores variables en transitorio bajo.

T_C	β	T_R
[5,30]	[0.1,0.8]	[2,6]

Por otro lado en la siguiente tabla se representan los parámetros utilizados en la experimentación:

Tabla 5.2 Parámetros en transitorio bajo.

μ	Cvd	Cvr	T_m	T_i	T_w	ϵ	α	k_o	k_i	$\Delta\mu$
100	0.3	0.2	4	4	4	1	0.3	0.25	0.75	0.25

Como se puede ver el único valor que se ha cambiado respecto del capítulo 4 ha sido $\Delta\mu$ pues ahora el incremento en la demanda será menor.

La experimentación se realizará implementando con MATLAB el código recogido en el apéndice (A) con los parámetros y variables establecidos en esta sección. Para ello se utilizará un intervalo de 2100 periodos en la simulación y se realizarán 30 repeticiones, pues nuevamente 10 repeticiones no son suficientes para poder establecer una relación entre los distintos casos a través de OVR. Se centrará la atención en el intervalo comprendido entre el periodo 450 y el 550, pues será en el periodo 500 donde se dé el incremento de la demanda.

5.2 Experimentación a $T_R = 2$

En esta sección se mostrará la evolución de las gráficas que representan los pedidos e inventarios desde el periodo 450 al 550. Después del comentario de las gráficas se encontrará la gráfica 5.3 con los valores de OVR y el tiempo de recuperación y sus respectivos intervalos de confianza. Todo lo representado y comentado en esta sección será correspondiente a un valor de $T_R = 2$.

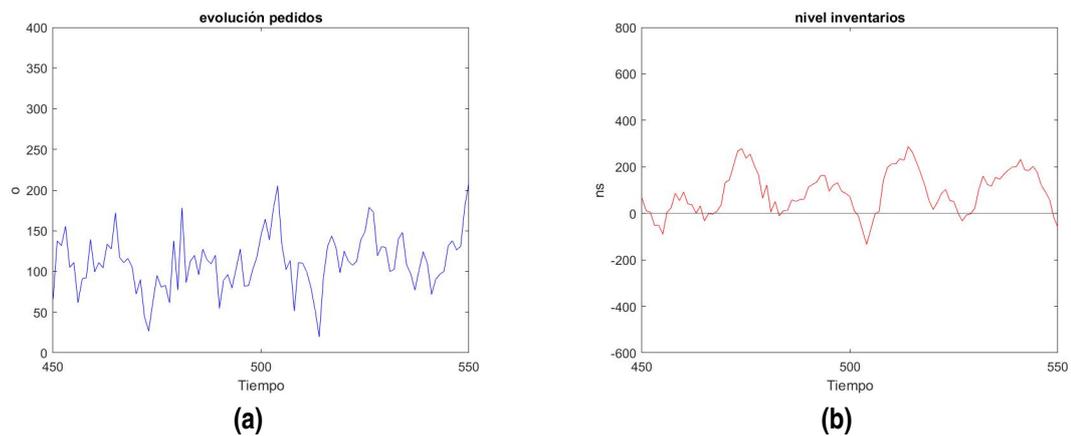


Figura 5.1 $T_C = 30$, $\beta = 0.1$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.25$.

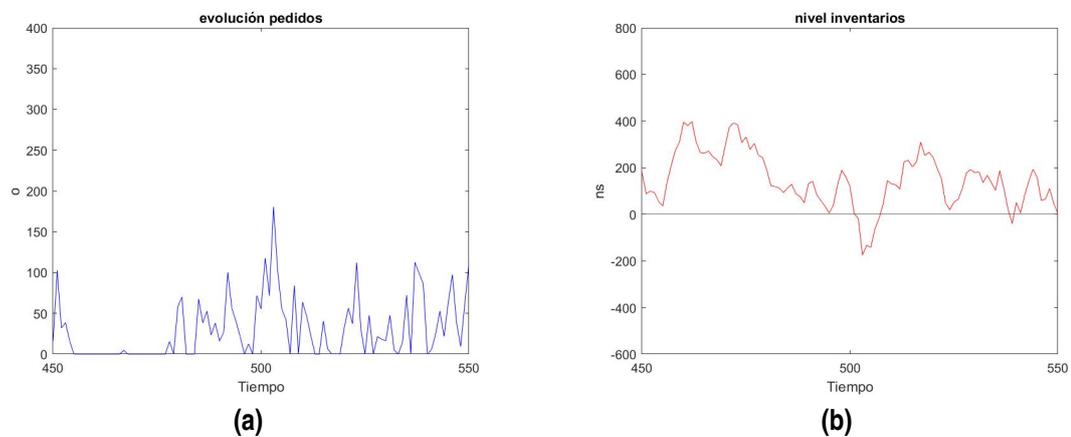


Figura 5.2 $T_C = 30$, $\beta = 0.8$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.25$.

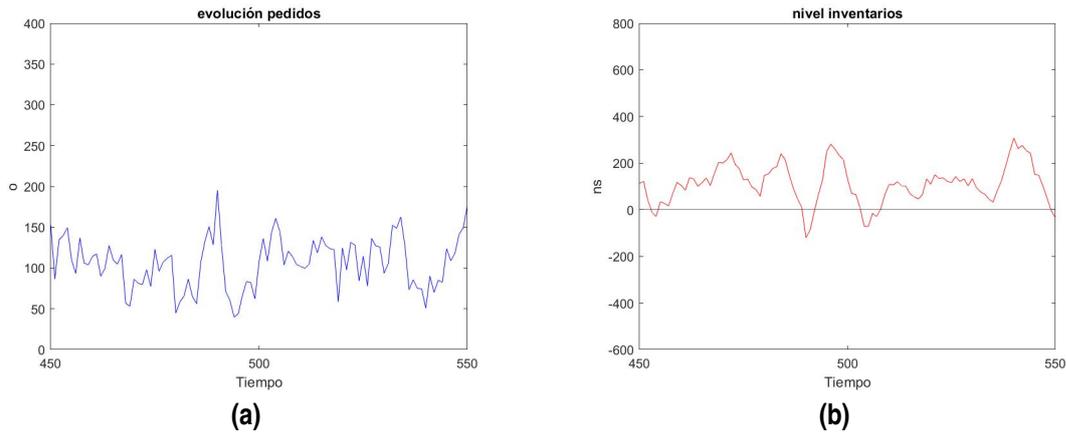


Figura 5.3 $T_C = 5$, $\beta = 0.1$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.25$.

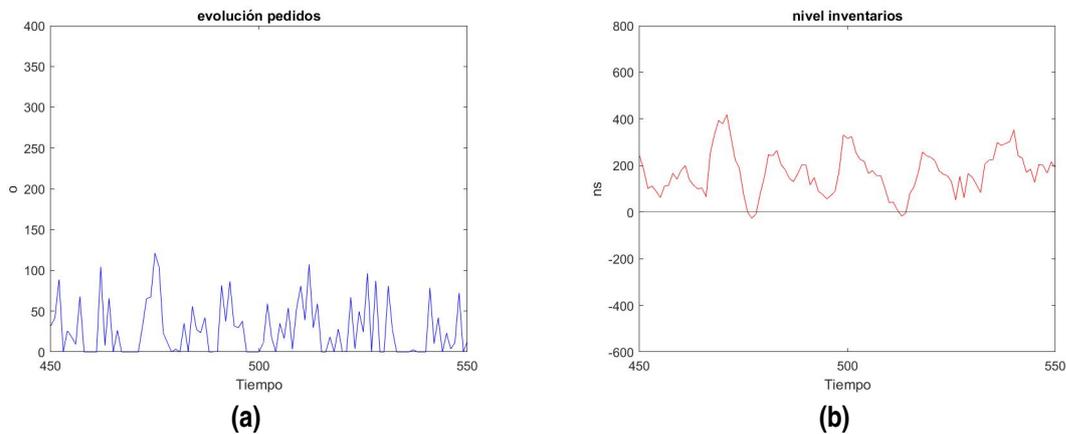


Figura 5.4 $T_C = 5$, $\beta = 0.8$, $T_R = 2$, $\Delta\mu = 0.25$.

Se aprecia ahora como, por ejemplo, para el caso de $T_C = 30$ y $\beta = 0.1$ ya no habrá una evolución en dos "escalones" como si lo había para el incremento de la demanda del 75%; al ser ahora más discreto el aumento de la media, se apreciará una evolución más parecida a una rampa. Esto comporta una adaptación más paulatina al nuevo valor de la demanda, representada por una rampa, y no un escalón, más brusco, como en el capítulo anterior (4).

Al igual que se observaba para $\Delta\mu = 0.75$, al aumentar el valor de β la gráfica de los pedidos se desplazará hacia el eje de abscisas, pues la llegada de un mayor número de productos retornados supone una reducción en el número de órdenes necesarias para suplir la demanda.

Cabe destacar que para este valor del incremento de la demanda, en algunas simulaciones, el nivel de inventarios no llegará a hacerse negativo tras el incremento de la demanda en el periodo 500, debido a que el incremento es pequeño y se tendrá capacidad suficiente, sobretodo en los casos de un mayor nivel de β , para suplir dicha demanda. Es más, se puede apreciar en estas gráficas del inventario, que el pico descendente que se produce justo después del incremento de la demanda disminuye notablemente respecto a $\Delta\mu = 0.75$. Esto, como se podrá ver a continuación en la tabla 5.3, se traducirá como una mejora en el comportamiento de la cadena.

Tabla 5.3 $\Delta\mu = 0.25$. Variación de T_C y β .

	$T_C = 30, \beta=0.1$	$T_C = 30, \beta=0.8$	$T_C = 5, \beta=0.1$	$T_C = 5, \beta=0.8$
OVR	1.186	1.639	1.207	1.160
I.C.	[0.996, 1.376]	[1.507, 1.771]	[1.025, 1.388]	[1.006, 1.316]
T_{recup}	8.64	7.44	9.27	8.47
I.C.	[6.87, 10.42]	[5.83, 9.05]	[8.10, 10.44]	[7.00, 9.96]

Procediendo al análisis de la tabla se aprecia que ya el parámetro OVR no arroja tanta información como lo hacía en el estudio de $\Delta\mu = 0.75$, esto es debido a que, al ser el valor del incremento pequeño, no se introduce una perturbación considerable en la cadena y el valor de OVR aumenta respecto al caso en régimen pero no tanto como para el incremento del 75%. No se podrá asegurar con una probabilidad de 95% que los valores de OVR considerados para los distintos casos no coincidan, por ser los intervalos de confianza prácticamente iguales. Debido a esto último comentado, no podremos saber si la cadena ha recuperado un funcionamiento normal como en el régimen permanente, en el que al aumentar β disminuye OVR; o por el contrario sigue saturada como en el caso de $\Delta\mu = 0.75$.

Respecto al tiempo de recuperación se puede ver que disminuye respecto al capítulo anterior, debido a que el nivel de inventarios no se hace tan negativo como en dicho capítulo y le cuesta menos recuperarse, como ya se ha comentado en el estudio de las gráficas.

Como se ha comentado ya, no se podrá confiar al 100% en los valores representados en la tabla de OVR, pero, si se centra el estudio en los intervalos de confianza de OVR, se podrá ver que los casos más favorables, por tener un intervalo de confianza que se mueve en valores más bajos, serán [$T_C = 5, \beta = 0.1$] y [$T_C = 30, \beta = 0.1$].

En conclusión se dirá que para ambos valores del incremento de la demanda el caso más desfavorable será $T_C = 30, \beta = 0.8$. A la hora de analizar el caso más favorable se verá que tanto para el valor mayor del incremento de la demanda como para el menor, la mejora se dará para los casos en los que β es bajo, obteniendo para un $\Delta\mu$ mayor un comportamiento ligeramente mejor para un T_C pequeño. Con lo que se puede afirmar que, independientemente del nivel del incremento de la demanda, la disminución de T_C no hará que la cadena se sature, es más, será positivo para esta, aunque el grado de influencia dependerá de la magnitud de β . Para valores de β mayores será más evidente la influencia positiva de T_C sobre OVR. Al disminuir el valor del incremento de la demanda los efectos de T_C se ven bastante amortiguados. Nuevamente lo principal será ser capaz de controlar β .

Como se ha hecho para un valor de $\Delta\mu$ alto, también se hará ahora un estudio a un mayor valor del tiempo de remanufacturación T_R .

5.3 Experimentación a $T_R = 6$

De nuevo se estudia la evolución de la cadena al aumentar el valor de T_R , por medio de gráficos y una tabla (5.4), comparándola con la sección anterior (5.2) mediante tres tablas que mostrarán el nivel de variación de OVR al jugar con el valor de las variables de control.

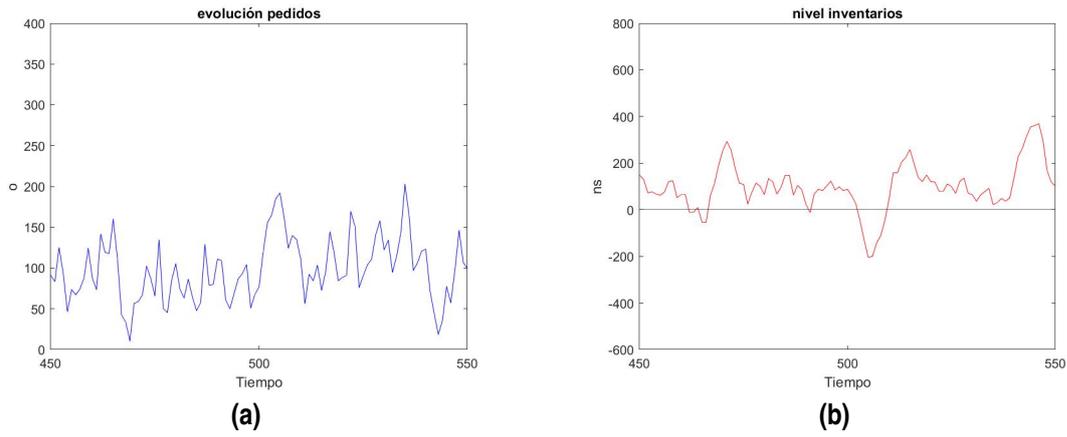


Figura 5.5 $T_C = 30$, $\beta = 0.1$, $T_R = 6$, $\Delta\mu = 0.25$.

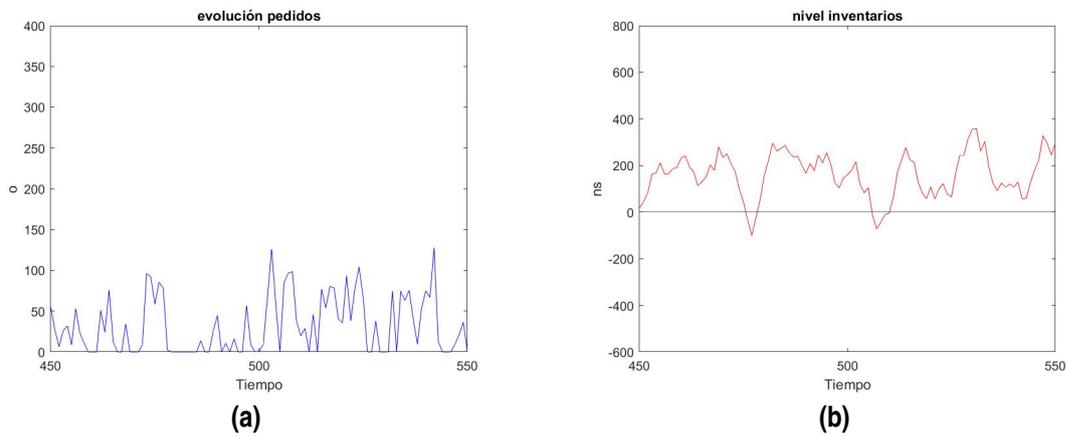


Figura 5.6 $T_C = 30$, $\beta = 0.8$, $T_R = 6$, $\Delta\mu = 0.25$.

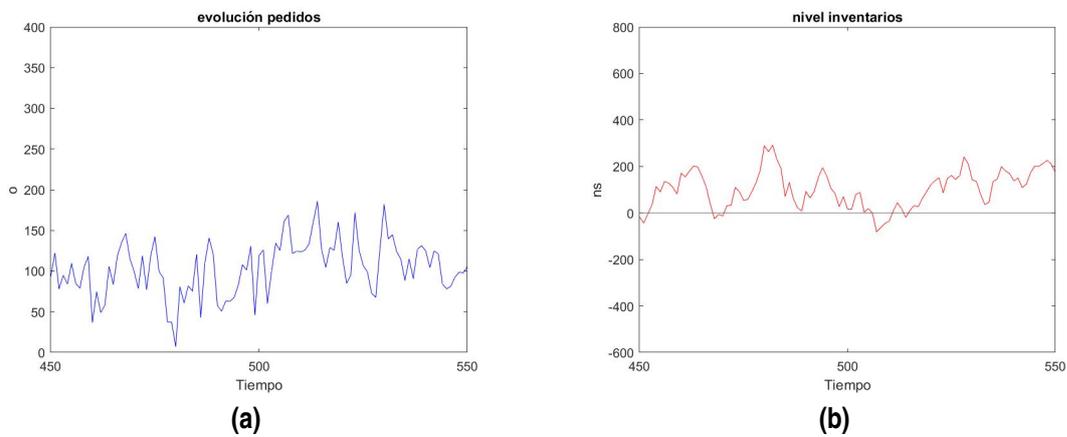


Figura 5.7 $T_C = 5$, $\beta = 0.1$, $T_R = 6$, $\Delta\mu = 0.25$.

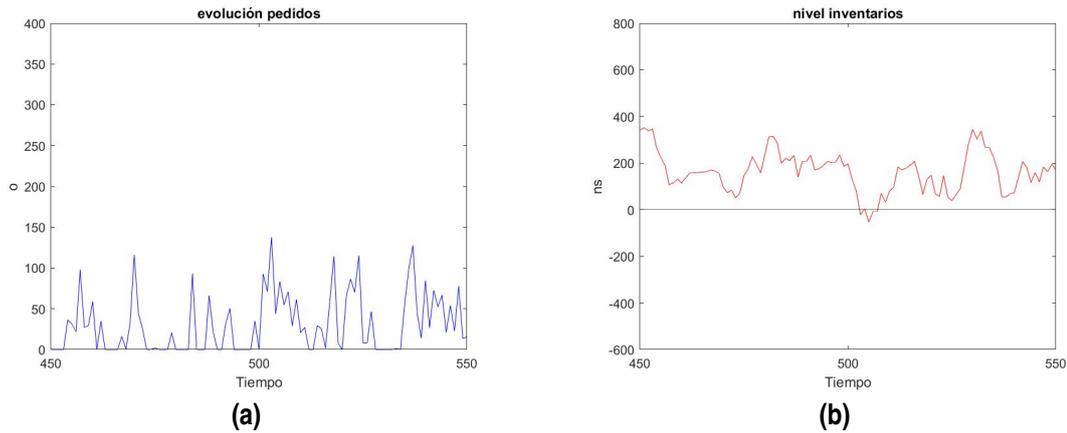


Figura 5.8 $T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.25$.

Del análisis de las gráficas y su comparación con las obtenidas para $T_R = 2$ se hará un breve comentario, porque se puede ver que estas arrojan poca información al contrastar ambos valores de T_R . Se aprecia que la evolución de las gráficas, tanto de los pedidos como de los inventarios, para un tiempo de remanufacturación bajo, serán bastante parecidas a las obtenidas para un tiempo de remanufacturación alto. Esto deja entrever ya cómo la influencia que T_R tenía sobre la variabilidad de la cadena para un incremento en la demanda del 75% disminuirá notablemente al disminuir el valor del incremento y acercarnos al comportamiento en régimen de la cadena.

Tabla 5.4 $\Delta\mu = 0.25$. Variación de T_C, T_R y β .

	$T_c=30, \beta=0.1$	$T_c=30, \beta=0.8$	$T_c=5, \beta=0.1$	$T_c=5, \beta=0.8$
OVR	1.232	1.849	1.395	1.618
I.C.	[1.141,1.323]	[1.683,2.016]	[1.209,1.580]	[1.481,1.754]
T_{recup}	8.33	7.81	9.72	7.09
I.C.	[7.26, 9.41]	[6.49,9.12]	[8.36,11.08]	[6.26,7.91]

Se confirma lo ya comentado en el análisis de las gráficas, la variabilidad introducida será mucho menor que a altos niveles del impacto de la demanda, hecho que ya se había comprobado en la sección anterior (5.2). Al observar los valores que alcanza OVR se puede ver que no habrá muchas diferencias respecto a (5.3). Respecto al tiempo de recuperación, se comprueba cómo los valores de este siguen siendo pequeños, de modo que el aumento de T_R no tendrá una gran influencia sobre el nivel de recuperación del inventario tras un bajo incremento de la demanda.

A continuación se muestran las tablas en las que se compararan los casos. Para la comparación se ha decidido establecer dos parámetros y una variable, escogidos de entre T_R, T_C y β . En cada casilla se representará un subcaso para el que se fijará una combinación de valores de los dos parámetros y se estudiará la evolución de la métrica OVR al aumentar la variable escogida.

En el primer caso se mantendrá constante en cada casilla T_C y T_R y se aumentará el valor de β .

Tabla 5.5 $\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_C y T_R , variable de control: β .

	$T_R \uparrow$	$T_R \downarrow$
$T_C \uparrow$	OVR $\uparrow\uparrow$	OVR $\uparrow\uparrow$
$T_C \downarrow$	OVR \uparrow	OVR $\sim cte$

Primero se ejemplificará a qué valor del aumento del intervalo de confianza de OVR corresponde $OVR \uparrow$: $[1.209, 1.580] \rightarrow [1.481, 1.754]$. Se sigue compartiendo el mismo comportamiento que se daba para un valor mayor del incremento de la demanda, por ejemplo para el caso T_R y T_C altos en el que se dará el mayor aumento de OVR de la tabla, al igual que sucedía en 4.5. Sin embargo ahora el aumento que se producirá de OVR será mucho menor ($[1.141-1.323] \rightarrow [1.683, 2.016]$ frente a $[1.505, 1.872] \rightarrow [3.790, 4.669]$ obtenido para $\Delta\mu = 0.75$), comportamiento normal al disminuir el impulso de la demanda y por ende disminuir la variabilidad de la cadena. Lo ya comentado en el análisis de las gráficas se vuelve a recuperar: la pérdida de influencia de T_R se observa al situarse en el subcaso que adopta un valor de T_R menor respecto al subcaso anteriormente comentado (T_C y T_R altos). Al utilizar un valor de T_C bajo (manteniendo T_R alto) se produce un aumento de OVR menor, lo que no quiere decir que T_C sea ahora más importante que T_R , sino que los periodos de aumento de T_C (de 5-30) son mucho más grandes que los de T_R (de 2-6). Es curioso observar el subcaso en el cual T_R y T_C son bajos, para estos valores de ambos parámetros se conseguirá mantener una variación aproximadamente nula de OVR al aumentar la media de los retornos. Es decir que la cadena está más cerca del comportamiento "normal" que seguía en régimen permanente, dicho comportamiento consiste en que la cadena muestra mejoras al aumentar el número de retornos y disminuir el tiempo de consumo de los productos que retornan. En resumen se puede apreciar que esta tabla muestra un comportamiento muy parecido a la misma tabla para el valor mayor del incremento de la demanda (4.5) pero con unas variaciones de OVR mucho más bajas debido a la pérdida de reactividad de la cadena al disminuir $\Delta\mu$.

En el siguiente caso se mantendrá constante en cada casilla T_C y β y se aumentará el valor de T_R .

Tabla 5.6 $\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_C y β , variable de control: T_R .

	$\beta \uparrow$	$\beta \downarrow$
$T_C \uparrow$	OVR $\sim \uparrow$	OVR $\sim cte$
$T_C \downarrow$	OVR \uparrow	OVR $\sim \uparrow$

Se aprecia ya a simple vista como al dejar β constante las variaciones del parámetro OVR no son tan grandes. El mayor rango de variación de OVR que se da en esta tabla será $[1.006, 1.316] \rightarrow [1.481, 1.754]$ que si se compara con el mayor valor de variación dado para un incremento de la demanda mayor (4), para la misma tabla (4.6), $[2.059, 2.764] \rightarrow [3.052, 3.985]$; se aprecia que tanto la amplitud del intervalo de confianza de OVR será menor, para el valor menor del incremento, como los valores que OVR alcanza en dicho intervalo, debido nuevamente a la disminución de la variabilidad introducida en la cadena.

Se comentarán por último dos cosas más de esta tabla, la primera será que para un valor alto de β apenas se apreciará cambio entre un T_C alto y uno bajo, β será la que lidere el empeoramiento de la cadena a bajos incrementos de la demanda; a propósito de esto último, si se centra la atención ahora en la segunda columna de la tabla se podrá ver como disminuye la variación de OVR. La otra cuestión a comentar será cómo nuevamente se demuestra que T_R pierde el efecto que tenía sobre la cadena y ahora su aumento produce unos aumentos de OVR mucho más discretos.

En este último caso se mantendrá constante en cada casilla T_R y β y se aumentará el valor de T_C .

Tabla 5.7 $\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_R y β , variable de control: T_C .

	$T_R \uparrow$	$T_R \downarrow$
$\beta \uparrow$	OVR $\sim \uparrow$	OVR $\uparrow \uparrow$
$\beta \downarrow$	OVR $\sim cte$	OVR $\sim cte$

A pesar de parecer tener un caso con un gran aumento de OVR (caso a T_R bajo y β alto) el

incremento del intervalo será $[1.006, 1.316] \rightarrow [1.507, 1.771]$, no es un incremento tan grande pero si se confronta con los otros incrementos de la misma tabla si lo será. En esta tabla se pueden ver aspectos compartidos con la tabla anterior: el mayor nivel de aumento de OVR cuando β es grande, siendo prácticamente constante cuando β es pequeña. Se observa también como el aumento de T_C , al ser de un mayor número de periodos, afecta más a la cadena que T_R pues como podemos ver la variación más grande de OVR en esta tabla será ligeramente mayor que la máxima producida en la tabla anterior.

A modo de resumen, de los resultados obtenidos se reafirma lo ya abordado en estudios anteriores ([1] Dominguez, R. *et al*, 2020), que en régimen permanente o, lo que es muy parecido, para valores pequeños del incremento de la demanda, el *lead time* de remanufacturas apenas tiene impacto sobre OVR. Es decir lo que causa que T_R tenga un impacto sobre OVR será un golpe considerable en la demanda.

Lo más importante para controlar la variabilidad de la cadena y limitarla sería poder mantener valores de β bajos. Aunque su aumento sea un hecho positivo, si se observa en cuanto a su efecto sobre la cadena se ve que si no se limita a una baja media comporta un aumento de la variabilidad de la cadena y por ende su peor funcionamiento.

6 Conclusión

Una cadena de suministros debe de tener una capacidad de poder adaptarse a la demanda y suplirla, es más, debe de ser capaz, hasta cierto grado, de manejar un aumento de la demanda. En este estudio para capacitar a la cadena de un mayor grado de adaptación a aumentos de la demanda se la dota de un ciclo cerrado, gracias al cual habrá dos flujos de producto para poder suplir la demanda: nuevo y devuelto, esto ayudará a reducir la presión sobre la cadena. Es decir habrá que adaptar el resto de variables de control que se han utilizado para, sea cual sea el incremento de la demanda, su efecto se vea suavizado.

Si se consiguiera ejercer un control sobre el incremento de la demanda el empeoramiento de esta no sería tan significativo; si bien es posible tomar medidas para suavizar los efectos del aumento de la demanda sobre la cadena, por lo general, no será posible controlar la demanda como tal. Por ello el parámetro $\Delta\mu$ será una incógnita.

El objetivo principal (desde el punto de vista de la demanda, no desde el punto de vista económico ni ambiental) del uso del bucle cerrado para el aprovisionamiento, será el poder suplir la demanda por dos vías. La característica de estos retornos será que no se puede estimar ni cuánto ni cuándo volverán. Sin embargo, a la vista de cómo puede afectar negativamente a la cadena un aumento de las devoluciones, se tomará un primer camino en el que se ofrece como solución un control de las devoluciones. Esto se haría permitiendo un cupo máximo de devoluciones, pequeño, como por ejemplo el representado por el valor $\beta = 0.1$. En el caso de poder poner un límite a las devoluciones no habría que limitar el tiempo de consumo de los clientes y no sería necesario mantener un tiempo bajo de remanufactura ($T_R = 2$), pudiendo elevarlo hasta 6 periodos por ejemplo sin que comporte un empeoramiento considerable del funcionamiento de la cadena.

En caso de no poder ejercer un control sobre el material retornado por el cliente, un camino alternativo sería intentar amortiguar, en la medida de lo posible, los efectos que produce una variación de los retornos. Esto se podrá conseguir con un tiempo de remanufactura y un tiempo de consumo bajos. Podríamos establecer una relación entre estos dos parámetros. Disminuir el tiempo de consumo permite mantener una mayor calidad de los productos, dado que conforme más periodos de uso tenga un producto más desgastado estará. Si el producto que retorna está en unas condiciones buenas será necesario ejercer poco trabajo de remanufactura sobre él, por lo que el tiempo de remanufactura disminuirá. Hay que tener en cuenta que con la disminución del tiempo de consumo lo que se está haciendo realmente será imponer un tiempo máximo de uso de los productos antes de su devolución.

Dado que la primera solución propuesta (limitar la demanda) no era algo realizable, quedan dos soluciones o limitar la cantidad de productos devueltos o limitar el tiempo de consumo y de remanufactura. El caso que mejor resultados tendrá respecto al parámetro OVR, será el primero por la grande influencia de β sobre OVR. Hay que considerar también que de cara al trato con el cliente, a este le ofrece una mayor seguridad saber que tiene x periodos para devolver el producto, frente a la incertidumbre de no saber si podrá devolverlo en función del número de cliente que sea

en la cola de devolución. En caso de limitar el tiempo de consumo de cara a una devolución del producto, el tiempo máximo de devolución del producto se podrá incluso subir a 10 periodos hecho que aumentará la satisfacción del cliente y no penalizará mucho a la cadena pues hay que recordar que el valor superior escogido para T_C era de 30 periodos. En el análisis en régimen permanente y ante un incremento del 25 % de la demanda se pudo ver que no se apreciaba diferencia en los intervalos de confianza de OVR entre $T_C = 5$ y $T_C = 30$ por lo que a priori no se producirá un empeoramiento destacable de la cadena para $T_C = 10$ frente a $T_C = 5$.

Por lo que en resumen la solución más óptima que plantea este trabajo será imponer un tiempo máximo para la devolución del producto, teniendo en cuenta el bienestar del cliente, que será fundamental para la prosperidad de la empresa pues está relacionado con la imagen de esta y se verá reflejado en la demanda.

Bibliografía

- [1] DOMINGUEZ, R., CANNELLA, S., PONTE, B., FRAMINAN, J.M., *On the dynamics of closed-loop supply chains under remanufacturing lead time variability.*, Omega, 97, 102106. 2020.
- [2] CANNELLA, S., PONTE, B., DOMINGUEZ, R., FRAMINAN, J.M., *Proportional order up to policies for closed loop supply chains the dynamic effects of inventory controllers.* International Journal of Production Research, Taylor & Francis Journals, vol. **59(11)**, págs. 3323-3337, June, 2021.
- [3] CHEN, Y.F., ET AL. *Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead times, and information.* Management Science, 46 (3), 436–443, 2000.
- [4] GOVINDAN, K., H. SOLEIMANI, AND D. KANNAN., *Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review to Explore the Future.*, European Journal of Operational Research, vol. **240(3)**, págs. 603–626, February, 2015.
- [5] CANNELLA, S., BRUCCOLERI, M., FRAMINAN, J.M. , *Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance?*, International Journal of Production Economics, vol. **175**, págs. 35-49, May, 2016.
- [6] BARTSCH, E., BOIVIN, J., BRAZIER, A. , *A world shaped by supply*, BlackRock Investment Institute, January, 2022
- [7] VILLANUEVA, A., RAMOS, P., JIMÉNEZ, M., *SIMULACIÓN: HERRAMIENTA PARA GESTIONAR CADENAS DE SUMINISTROS*, November, 2011.
- [8] REVOLUTIONIZED TEAM, *What Is a Closed-Loop Supply Chain and How Can it Help?*, <https://revolutionized.com/closed-loop-supply-chain/>

Apéndice A

Código de MATLAB

```
1
2 %Declaro las vectores que voy a utilizar%
3 o=[]; %Production order%
4 mc=[]; %Manufacturing completion rate%
5 rc=[]; %Remanufacturing completion rate%
6 is=[]; %Initial stock%
7 d=[]; %Customer demand%
8 r=[]; %Customer returns%
9 ns=[]; %Net stock%
10 w=[]; %Work-in-progress%
11 d_=[]; %Demand forecast%
12 ss=[]; %Safety stock%
13 tw=[]; %Target work-in-progress%
14
15 %Variables de control%
16 Tc=5; delta_m=0; Betha=0.8;
17
18 %parámetros de control%
19 mu=100; Cvd= 0.3; sigma=mu*Cvd;
20 Cvr=0.2; chi=Betha*Cvr;
21 Tm=4;
22 Tr=6; eps=1;
23 Tp=(1-Betha)*Tm+Betha*Tr;
24 alpha=0.3;
25 Ti=4;
26 Tw=Ti; ko=0.25; ki=0.75;
27
28 %Bucle%
29 sumatorio=0; l=1; inter_conf=[];
30 for rep=1:30
31     %valores iniciales de los vectores%
32     o(1)=0; mc(1)=0; rc(1)=0; is(1)=0; d(1)=0; r(1)=0; ns(1)=0; w(1)=0;
33     d_(1)=0; ss(1)=0; tw(1)=0; mu=100; cont=1;
34     for t=2:2100
35         if t==500 %Incremento de la demanda en el periodo 500%
```

```

35         mu=mu*(1+delta_m);
36     end
37     d(t)=max(normrnd(mu,sigma),0);
38     zt=normrnd(Betha,chi);
39     yt=min(max(zt,0),1);
40     if t>Tc
41         r(t)=yt*d(t-Tc);
42     else
43         r(t)=0;
44     end
45     cte_1=t-Tm-1;
46     if cte_1<=0
47         mc(t)=0;
48     else
49         mc(t)=o(t-Tm-1);
50     end
51     cte_2=t-Tr-1;
52     if cte_2<=0
53         rc(t)=0;
54     else
55         rc(t)=r(t-Tr-1);
56     end
57     d_(t)=alpha*d(t)+(1-alpha)*d_(t-1);
58     is(t)=ns(t-1)+mc(t)+rc(t);
59     ns(t)=is(t)-d(t);
60     w(t)=w(t-1)+(o(t-1)-mc(t))+(r(t-1)-rc(t));
61     tw(t)=Tp*d_(t);
62     ss(t)=eps*d_(t);
63     o(t)=max( (d_(t)-rc(t))+1/Ti*(ss(t)-ns(t))+1/Tw*(tw(t)-w(t))
64         ,0 );
65     if t>500 && ns(t)>ns(t-1) %cálculo del tiempo de recuperación%
66
67         if ns(t)*ns(t-1)<=0 && cont~=0
68             tiempo(rep)=t;
69             if t<520
70                 sumatorio(l)=t-500;
71                 l=l+1;
72             end
73             cont=0;
74         end
75     end
76
77     end
78     ovr(rep)=var(o(500:550))/sigma^2;
79
80     %Gráficas%
81     if rep==1
82         t=[1:2100];
83         figure(1)

```

```
84     x=t(450:550); y=o(450:550);
85     plot(x,y,'b')
86     xlim([450 550])
87     ylim([0 400])
88     title('evolución pedidos')
89     xlabel('Tiempo')
90     ylabel('o')
91     figure(2)
92     x=t(450:550); y=ns(450:550);
93     plot(x,y,'r')
94     xlim([450 550])
95     ylim([-600 800])
96     hold on
97     yline(0)
98     hold off
99     title('nivel inventarios')
100    xlabel('Tiempo')
101    ylabel('ns')
102    end
103 end
104 sigma=sqrt(var(ovr));
105 ovr=sum(ovr)/rep;
106 E=1.96*sigma/sqrt(rep);
107 inter_conf=[ovr-E,ovr+E];
108 sigma=sqrt(var(sumatorio));
109 T_rec=sum(sumatorio)/(l-1);
110 E=1.96*sigma/sqrt(l-1);
111 interv_conf_t=[T_rec-E,T_rec+E];
```


Índice de Figuras

2.1	Comparación de ambas gráficas	7
3.1	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0$	10
3.2	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0$	10
3.3	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0$	11
3.4	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0$	11
3.5	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0$	11
3.6	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0$	12
3.7	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0$	12
3.8	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0$	12
4.1	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0.75$	16
4.2	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0.75$	16
4.3	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0.75$	17
4.4	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0.75$	17
4.5	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$	19
4.6	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$	19
4.7	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$	20
4.8	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.75$	20
5.1	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0.25$	24
5.2	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0.25$	24
5.3	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 2, \Delta\mu = 0.25$	25
5.4	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 2, \Delta\mu = 0.25$	25
5.5	$T_C = 30, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0.25$	27
5.6	$T_C = 30, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.25$	27
5.7	$T_C = 5, \beta = 0.1, T_R = 6, \Delta\mu = 0.25$	27
5.8	$T_C = 5, \beta = 0.8, T_R = 6, \Delta\mu = 0.25$	28

Índice de Tablas

3.1	Valores variables en régimen	9
3.2	Parámetros en régimen	9
3.3	OVR en régimen, $T_R = 2$	13
3.4	OVR en régimen, $T_R = 6$	13
4.1	Valores variables en transitorio alto	15
4.2	Parámetros en transitorio alto	15
4.3	$\Delta\mu = 0.75$ variación de T_C y β	18
4.4	$\Delta\mu = 0.75$ variación de T_C , T_R y β	21
4.5	$\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: T_C y T_R , variable de control: β	21
4.6	$\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: T_C y β , variable de control: T_R	21
4.7	$\Delta\mu = 0.75$. Parámetros de control: β y T_R , variable de control: T_C	22
5.1	Valores variables en transitorio bajo	23
5.2	Parámetros en transitorio bajo	23
5.3	$\Delta\mu = 0.25$. Variación de T_C y β	26
5.4	$\Delta\mu = 0.25$. Variación de T_C , T_R y β	28
5.5	$\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_C y T_R , variable de control: β	28
5.6	$\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_C y β , variable de control: T_R	29
5.7	$\Delta\mu = 0.25$. Parámetros de control: T_R y β , variable de control: T_C	29