

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Estudio del efecto bullwhip en una cadena de suministro cerrada con política pull en el proceso de remanufactura

Autor: Joaquín Herrera Foronda

Tutor: Roberto Domínguez Cañizares

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

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Estudio del efecto bullwhip en una cadena de suministro cerrada con política pull en el proceso de remanufactura

Autor:

Joaquín Herrera Foronda

Tutor:

Roberto Domínguez Cañizares

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Estudio del efecto bullwhip en una cadena de suministro cerrada con política pull en el proceso de remanufactura

Autor: Joaquín Herrera Foronda

Tutor: Roberto Domínguez Cañizares

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Existe una amplia literatura que estudia diferentes parámetros para mejorar la dinámica de una cadena de suministro cerrada, pero dentro de esta literatura no encontramos ningún artículo que estudie la forma en la que retornan los artículos a la cadena de suministro, ya que se da por hecho que todos regresan de forma arbitraria y libre.

En el siguiente trabajo de fin de grado se estudiarán dos políticas de retorno de los artículos una cadena de suministro cerrada, en primer lugar, la política de retorno tipo push, la más comúnmente conocida, en la todos los productos retornarán a la cadena y en segundo lugar la política de retorno tipo pull, en la que se tendrá en cuenta la demanda para gestionar el retorno de los artículos.

Para realizar esta investigación se desarrollarán las ecuaciones que compondrán cada una de las dos políticas y posteriormente estas serán simuladas en Matlab. A continuación, serán establecidos diferentes escenarios con varios valores de los parámetros que afectan a la cadena de suministro cerrada, para posteriormente realizar los experimentos de estos escenarios.

Por último, se analizarán los resultados obtenidos de los diferentes experimentos con el software estadístico SPSS. Para el análisis de estos se llevará a cabo un ANOVA de varios factores. Para finalizar el trabajo de investigación, serán redactados los hallazgos encontrados durante la realización de este para concluir que política de retorno mejora la dinámica de la cadena de suministro cerrada y en qué condiciones.

Índice

Resumen	IX
Índice	XI
Índice de tablas	XV
Índice de figuras	XVII
1 Introducción y objetivos del trabajo	1
1.1 <i>Introducción al trabajo</i>	1
1.2 <i>¿Qué es una cadena de suministro?</i>	1
1.3 <i>Cadena de suministro cerrada</i>	2
1.3.1 Principales características	2
1.3.2 Principales beneficios	2
1.3.3 Artículos científicos relacionados	2
1.4 <i>Objetivos</i>	3
1.5 <i>Hipótesis</i>	3
2 Modelado de la cadena de suministro cerrada con política de retorno push y pull	5
2.1 <i>Introducción al modelado</i>	5
2.2 <i>Elementos de una cadena de suministro cerrada</i>	6
2.3 <i>Modelado de la política de retorno tipo push</i>	7
2.3.1 Etapa de recepción	7
2.3.2 Etapa de servicio	8
2.3.3 Etapa de suministro	9
2.4 <i>Modelado de la política de retorno tipo pull</i>	9
2.4.1 Etapa de servicio	9
2.4.2 Etapa de suministro	10
2.5 <i>Indicadores clave de rendimiento</i>	11
3 Diseño experimental	15
3.1 <i>Alcance de los experimentos</i>	15
3.2 <i>Escenario de la cadena de suministro y configuración de la simulación</i>	16
4 Análisis de los resultados	10
4.1 <i>Análisis del indicador: Manufacturing Order Variance Ratio</i>	10
4.2 <i>Análisis del indicador: Remanufacturing Order Variance Ratio</i>	14
4.3 <i>Análisis del indicador: Inventory Variance Ratio</i>	17
4.4 <i>Análisis del indicador: Stock medio</i>	20
4.5 <i>Análisis del indicador: Backlog</i>	23
5 Conclusiones claves	28
Referencias	1
Anexo	5
5.1 <i>Código: Política de retorno tipo push</i>	5
5.2 <i>Código: Política de retorno tipo pull</i>	7

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Formulación matemática de la política de retorno tipo push y pull..</i>	11
<i>Tabla 2. Indicadores clave de rendimiento</i>	12
<i>Tabla 3. Diseño de experimentos</i>	18
<i>Tabla 4. Resultados ANOVA: MOVR</i>	11
<i>Tabla 5. Resultados ANOVA: ROVR</i>	15
<i>Tabla 6. Resultados ANOVA: IVR</i>	18
<i>Tabla 7. Resultados ANOVA: Stock</i>	21
<i>Tabla 8. Resultados ANOVA: Backlog</i>	24

Índice de figuras

<i>Ilustración 1. Cadena de suministro cerrada y política de devolución tipo push. Fuente: Adaptación (B. Ponte, 2021a)</i>	6
<i>Ilustración 2. Cadena de suministro cerrada y política de devolución tipo pull. Fuente: Adaptación (B. Ponte, 2021a)</i>	7
<i>Ilustración 3. Análisis del MOVR y la tasa de retorno</i>	12
<i>Ilustración 4. Análisis del MOVR y del lead time</i>	13
<i>Ilustración 5. Análisis del MOVR y del controlador de inventario.</i>	14
<i>Ilustración 6. Análisis del ROVR y de la tasa de retorno.</i>	15
<i>Ilustración 7. Análisis del ROVR y del Lead Time</i>	16
<i>Ilustración 8. Análisis del ROVR y del controlador de inventario</i>	17
<i>Ilustración 9. Análisis del IVR y de la tasa de retorno</i>	18
<i>Ilustración 10. Análisis del IVR y del Lead Time</i>	19
<i>Ilustración 11. Análisis del IVR y del controlador de inventario</i>	20
<i>Ilustración 12. Análisis del Stock y de la tasa de retorno</i>	21
<i>Ilustración 13. Análisis de Stock y de la tasa de retorno</i>	22
<i>Ilustración 14. Análisis del Stock y del controlador de inventario</i>	23
<i>Ilustración 15. Análisis del Backlog y de la tasa de retorno</i>	24
<i>Ilustración 16. Análisis del Backlog y del controlador de inventario</i>	25

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

1.1 Introducción al trabajo

Este trabajo, titulado “Estudio de la política de devolución de una cadena de suministro cerrada”, tiene como objetivo poner en práctica los conocimientos adquiridos durante estos cuatro años de estudios universitarios y dar por finalizado mi currículum académico en el Grado de Ingeniería de Organización Industrial.

En el presente proyecto, se realiza un trabajo de investigación para dar solución a una problemática muy extendida, pero poco estudiada en la cadena de suministro cerrada, como es la política de retorno de los elementos consumidos a la cadena de suministro. Para intentar resolver este problema, realizaremos la simulación de la dinámica de una cadena de suministro cerrada utilizando dos políticas de retorno diferentes. En la primera política, regresarán todos los productos a la cadena sin tener en cuenta la de demanda; sin embargo, en la segunda política, se controlará la cantidad de bienes que serán reintegrados en la cadena, de esta forma solo serán admitidos los artículos necesarios siguiendo la demanda.

1.2 ¿Qué es una cadena de suministro?

En un primer lugar, vamos a contextualizar la cadena de suministro en el mundo en el que vivimos. El ser humano es un animal que, como otros animales, busca cubrir sus necesidades vitales, las cuales podrían ser comer o dormir. La ciencia que se encarga del estudio de los recursos, la creación de riqueza y la producción, distribución y consumo de bienes y servicios, para satisfacer estas necesidades humanas, se denomina economía. Los sectores en los que se divide la economía según la actividad laboral son tres: sector primario (obtención de materias primas), sector secundario (procesamiento de estas materias primas para dar lugar a bienes) y por último el sector terciario (encargado de comercializar estos bienes y de prestar servicios). El sector secundario es el más vinculado a la industria en general, que es donde vamos a encontrar y dar uso al que es el tema principal de este proyecto, la cadena de suministro.

Una cadena de suministro es un conjunto de una o varias empresas que se encargan de transportar y transformar la materia prima a través de diferentes procesos, hasta darle la forma requerida por el consumidor final y así satisfacer sus necesidades.

Según el Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) por “cadena de suministro” entendemos «los diferentes eslabones que se suceden en una compañía, que van desde las materias primas no procesadas hasta los productos terminados que llegan al consumidor final». (Estaún, 2021)

Otra definición podría ser: la cadena de suministro es el conjunto de actividades, instalaciones y medios de distribución necesarios para llevar a cabo el proceso de venta de un producto en su totalidad. Esto es, desde la búsqueda de materias primas, su posterior transformación y hasta la fabricación, transporte y entrega al consumidor final. En otras palabras, la cadena de suministro es una función estratégica y logística que involucra todas las operaciones que son indispensables para que una mercancía logre llegar al cliente final en óptimas condiciones. (Roldán, s.f.)

Como definición final de una cadena de suministro podríamos decir que es un conjunto de una o varias empresas que se encargan de transportar y transformar la materia prima a través de diferentes procesos, hasta darle la forma requerida por el consumidor final y así satisfacer sus necesidades.

1.3 Cadena de suministro cerrada

En este apartado vamos a definir que es una cadena de suministro cerrada, sus principales características y los principales beneficios que esta aporta a la empresa, la sociedad y el medio ambiente.

1.3.1 Principales características

Una cadena de suministro cerrada se diferencia de una cadena de suministro tradicional o abierta, en que en esta última los productos siguen un ciclo cerrado, es decir, una vez que estos son consumidos por los clientes, parte de estos regresan a la cadena para ser remanufacturados. Este tipo de cadena de suministro está en auge ya que proporciona efectos positivos tanto como para el medio ambiente, como en los costes de fabricación.

Las principales características de una cadena de suministro cerrada han sido descritas por diferentes autores en varios artículos científicos (Fleischmann et al., 2001) (Guide V.D.R. Jr. et al., 2003a) (Guide V.D.R. Jr. et al. V. J., 2003b) (Blackburn J.D. et al., 2004), estas son las siguientes:

- Adquisición de productos para recuperar artículos usados (producto, pieza, material) de los usuarios finales.
- Logística inversa para transportar artículos usados desde el usuario final hasta la cadena de suministro.
- Inspección y disposición de artículos usados para identificar su condición de modo que se pueda determinar la opción de reutilización que maximiza el valor residual.
- Implementar la mejor opción de reutilización a través de la reutilización directa, reparación, remanufactura, reciclaje o eliminación.
- Por último, explotación de los productos remanufacturados a través de la venta de estos como productos reacondicionados o nuevos. Esto depende de si la cadena de suministro los trabaja como materia prima o productos reacondicionados.

1.3.2 Principales beneficios

En la situación actual en la que se encuentra el mundo frente al cambio climático, es de extrema importancia que todos colaboremos para intentar conservar el medio ambiente. La cadena de suministro cerrada crea una economía circular, reduciendo en gran medida los desechos que esta produce y reusándolos para remanufacturar nuevos productos. La cadena de suministro cerrada presenta muchos beneficios en este ámbito, comparado con la cadena de suministro abierta. Algunos de estos beneficios son:

- Reducción de los desechos: Parte de los productos una vez consumidos regresan a la cadena de suministro, en vez de ser desechados.
- Percepción de la empresa: La población en general, cada día está más concienciada con el medio ambiente y la necesidad de cuidar de este, por lo que muchos clientes prefieren consumir productos con certificados medioambientales o que han sido producidos mediante procesos ayudan a la conservación del medio ambiente.
- Ahorro de costes: Debido a la recuperación de parte de los productos previamente manufacturados, solo serán necesarias parte de las materias primas para procesar de nuevos estos artículos. Esto también influye en un ahorro de costes de manufactura, al estar los productos previamente manufacturados.

1.3.3 Artículos científicos relacionados

Se pueden encontrar diversos artículos científicos que estudian diferentes aspectos de las cadenas de suministro cerradas, como pueden ser (Ponte et al., 2021a) (Ponte et al., 2021b). En el primer artículo mencionado se detalla

cómo afecta la lotificación de artículos en cadenas de suministro cerradas, al efecto látigo¹ y al nivel de servicio². Dentro de esta investigación se explica como el volumen de la tasa de retorno influye directamente al efecto látigo y dependiendo de la lotificación utilizada es más o menos efectiva mitigando este efecto, pero no se estudia cómo puede afectar la forma en la que retornan los artículos a la cadena de suministro cerrada. En el segundo artículo mencionado se describe como la política de pedidos proporcional para una cadena de suministro cerrada mitiga el efecto látigo, pero ocasionalmente puede producir el agotamiento del stock. Este tampoco tiene en cuenta como la política de retorno afecta a la cadena de suministro cerrada y como podría mejorar la dinámica de esta.

Dado la importancia que tiene la forma y la cantidad de artículos que regresan a la cadena de suministro y el ahorro que esto puede producir en diversos costes, es un aspecto a tener bastante en cuenta para ser estudiado en una cadena de suministro cerrada. En este trabajo de investigación vamos a intentar dar solución a esta problemática modelando dos políticas de retorno diferentes y analizando como afectan estas a diferentes indicadores de la cadena de suministro cerrada.

1.4 Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Simular una política de retorno tipo push en la que el total de los artículos vendidos, una vez agotado su ciclo de vida, son remanufacturados y vuelven a la cadena de suministro.
- Simular una política de retorno tipo pull, en la que el proceso de remanufactura procesa únicamente los artículos que necesita la cadena de suministro en cada momento para satisfacer la demanda.
- Analizar los resultados obtenidos de los diferentes indicadores elegidos para una cadena de suministro, mediante un ANOVA (Análisis de la varianza).
- Demostrar cuál de estas dos políticas mejora la dinámica de la cadena de suministro cerrada, basándose en los resultados obtenidos.

1.5 Hipótesis

La hipótesis principal de este proyecto es que la política de retorno tipo pull posiblemente mejorará la dinámica de la cadena de suministro cerrada ya que solo regresarán a la cadena de suministro el número de artículos necesarios en cada período, incurriendo en menores costes de almacenamiento, debido a la menor variabilidad del stock. Pero por otro lado el nivel de servicio puede verse afectado porque al limitar el retorno de estos productos, la posibilidad de que se produzca una rotura de stock es mayor. Estas proposiciones se verán contrastadas con los resultados de este proyecto para determinar cuáles son los beneficios y las desventajas que aportan ambas políticas a la cadena de suministro cerrada.

¹ El efecto látigo o *bullwhip effect* es, en su definición logística, un fenómeno de imprecisión en la estimación de la demanda por parte de cada miembro de la cadena de suministro cuando hay fluctuaciones en los volúmenes de los pedidos (Desconocido, Mecalux Esmena, 2019).

² El nivel de servicio, denominado también ciclo del nivel de servicio es un indicador que señala la probabilidad de disponer de stock suficiente para abastecer la demanda (Desconocido, Mecalux Esmena, 2021).

2 MODELADO DE LA CADENA DE SUMINISTRO CERRADA CON POLÍTICA DE RETORNO PUSH Y PULL

2.1 Introducción al modelado

En este capítulo del trabajo de investigación describiremos como modelar una cadena de suministro cerrada y los diferentes elementos que intervienen en esta. También estudiaremos las principales diferencias de las dos políticas de retorno.

Para el modelado de la cadena de suministro cerrada he utilizado como base dos artículos científicos que estudian aspectos fundamentales de esta, como son la lotificación, el efecto látigo, el nivel de servicio al cliente y el efecto de los controladores de inventario; estos han servido como introducción para posteriormente modelarla orientada al estudio de la política de retorno de los artículos (Ponte et al., 2021b) (Ponte et al., 2021a). En estos trabajos podemos identificar que hay algunos aspectos que aún faltan por investigar para poder diseñar una cadena de suministro cerrada más eficiente, como comentamos anteriormente, uno de ellos es la política de retorno de los artículos consumidos. La política de retorno, es decir, la forma en la que regresan los artículos consumidos por los clientes hasta la industria donde estos serán remanufacturados, se asume que puede llevarse a cabo de dos formas: controlada (retorno tipo pull) o libre (retorno tipo push).

Una política de retorno tipo pull se lleva a cabo cuando el fabricante adquiere solo aquel número de artículos consumidos necesarios para satisfacer la demanda de los clientes para un período en concreto.

Una política de retorno tipo push se identifica porque el fabricante recibe todos los artículos procesados sin importar si es mayor o menor a la demanda de los clientes.

Este proyecto investiga una cadena de suministro cerrada basada en un sistema híbrido de manufactura-remanufactura, es decir, los productos remanufacturados son exactamente iguales y tienen las mismas características técnicas que los productos manufacturados. De esta forma, se puede asumir que cualquier producto remanufacturado a partir de otro, consumido anteriormente, son perfectamente sustituibles por cualquier producto que se haya fabricado a partir de materias prima. En los dos tipos de cadena de suministro cerrada que serán modeladas asumimos que, el 100% de los productos que retornan a la cadena están en condiciones de ser remanufacturados, es decir, que se encuentran en un estado en el que es posible producir un producto totalmente a partir de este.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la cadena de suministro cerrada que vamos a simular está basada en un sistema híbrido de manufactura-remanufactura, en la que se asume que se llevará a cabo una política de revisión del inventario por periodos. Siguiendo este tipo de política los inventarios se revisan cada cierto tiempo, pueden ser días, semanas o meses. Esta política es más fácil de implementar y menos costosa que una política de revisión continua del inventario (Axsäter, 2005).

La demanda que será simulada en este proyecto es estacionaria y normal. Es estacionaria porque es estable a largo del tiempo, es decir, la media y la varianza son constantes en el tiempo. Este tipo de demanda se caracteriza porque estos valores que toma varían siempre alrededor de la media, y la variabilidad de estos es siempre la misma. Se dice que una demanda es normal, cuando esta aumenta al reducir su precio y disminuye cuando este aumenta. Por último, he de destacar que asumimos que la capacidad del almacén “stock de recuperados” (que veremos en el siguiente apartado) es ilimitada, por lo que siempre tendremos disponible todos los productos

consumidos que se hayan recuperado y aún no hayan sido remanufacturados.

Anteriormente se comentó que en el modelado será utilizada una política de revisión de inventario por períodos, siguiendo esta línea de tiempo discreta, de igual forma se modelarán las ecuaciones que conforman el modelo matemático de la política de retorno tipo push. Para el modelado se consideran una secuencia de eventos que ocurren en cada uno de estos en un período t , siendo estos días, meses, años o cualquier unidad de tiempo. Estos eventos se clasifican en tres etapas: recepción, servicio y suministro. Estas serán descritas en los siguientes apartados.

2.2 Elementos de una cadena de suministro cerrada

La Ilustración 1. *Cadena de suministro cerrada y política de devolución* muestra de forma simplificada la estructura de una cadena de suministro cerrada, según la política de retorno tipo push. En esta podemos observar a la izquierda la fábrica o industria, donde se procesa por primera vez la materia prima para transformarla en un producto procesado listo para el consumo. Posteriormente encontramos el stock de productos terminados, en este se almacenan los productos ya finalizados, tanto los procedentes de materias prima, como de productos consumidos. Los productos salen del almacén de productos terminados y se ponen a disposición del usuario final. Una vez consumidos, según el cliente o el grado de compromiso de la sociedad con el medio ambiente, parte de estos regresan a la cadena de suministro y otra parte son desechados.

La parte proporcional de los productos que regresa a la cadena de suministro se almacena en un almacén denominado stock de recuperados, donde esperan para ser procesados y transformarlos de nuevo en productos terminados. La principal diferencia entre la política de retorno tipo push y tipo pull la encontramos en esta parte de la cadena, ya que, según la política push, las órdenes de producción de los productos remanufacturados se calculan en base del stock disponible de los productos recuperados. Sin embargo, en la política de retorno tipo pull las órdenes de producción se procesan en función a la demanda de los clientes.

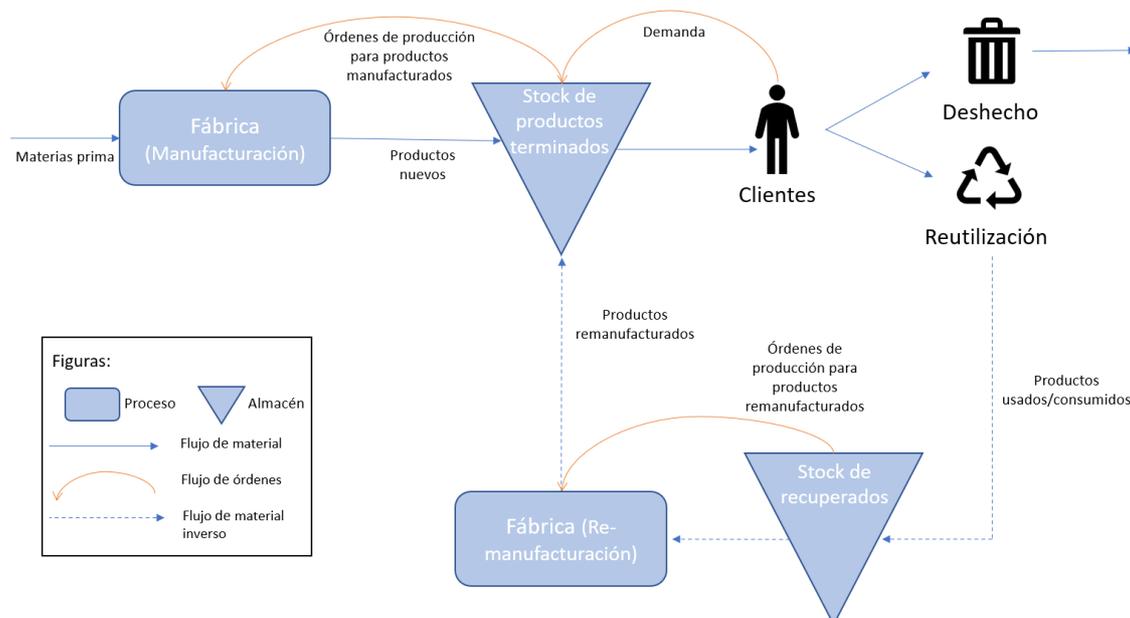


Ilustración 1. Cadena de suministro cerrada y política de devolución tipo push. Fuente: Adaptación (Ponte et al., 2021a)

Como se observa en la Ilustración 2. *Cadena de suministro cerrada y política de devolución* las órdenes de producción ya no dependen del stock disponible de los productos recuperados, sino de la demanda del cliente. El stock de

recuperados ahora pasa a ser un elemento independiente a la cadena de suministro, ya que almacena los productos que serán reutilizados, pero estos no pertenecen a la cadena de suministro hasta que son adquiridos para ser remanufacturados. En el modelado de esta política vamos a asumir que la capacidad de este almacén de recuperados es infinita, por lo que siempre tendremos disponible todos los productos que hayan retornado para ser remanufacturados. La decisión de adquirir o no estos productos para remanufacturarlos depende de la demanda de los clientes. Siempre se le dará prioridad a la producción de artículos remanufacturados, ya que los costes de producción son menores.

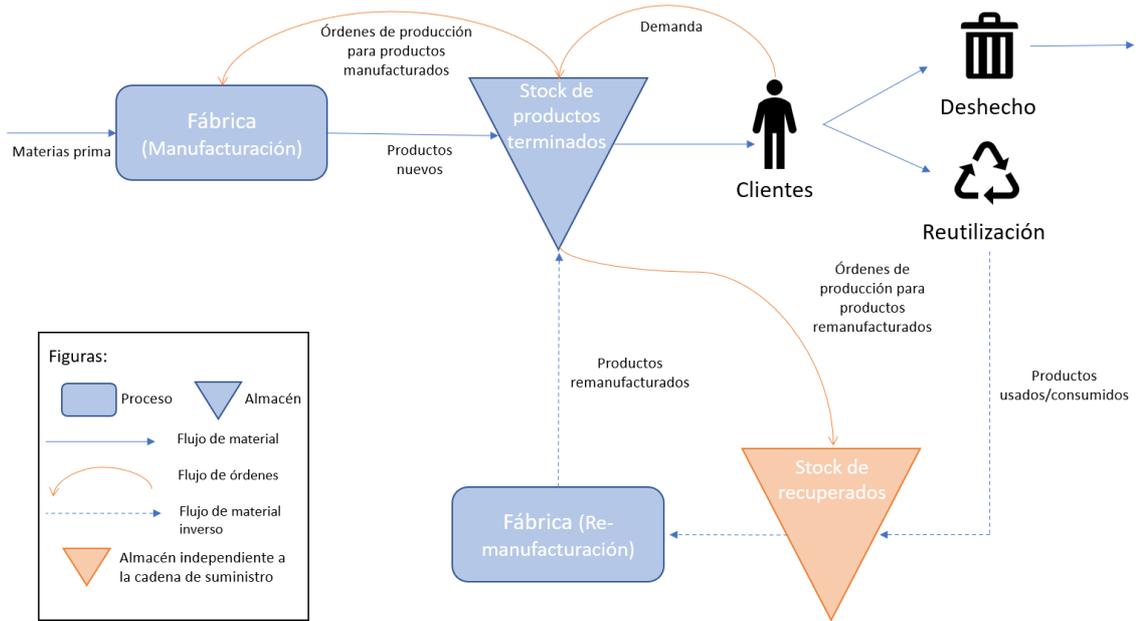


Ilustración 2. Cadena de suministro cerrada y política de devolución tipo pull. Fuente: Adaptación (Ponte et al., 2021a)

2.3 Modelado de la política de retorno tipo push

A continuación, será modelada la política de retorno de tipo push, en la que el total de los artículos vendidos, una vez agotado su ciclo de vida, serán remanufacturados y regresarán a la cadena de suministro. Los diferentes pasos que recorren los artículos dentro de la cadena de suministro cerrada han sido divididos en tres etapas: etapa de recepción, etapa de servicio y etapa de suministro. En la etapa de recepción se añaden las órdenes de producción que han sido finalizadas al inventario, tanto de manufactura como de remanufactura. En la etapa de servicio, se intenta cubrir la demanda con el stock disponible, cuando esto no es posible se intenta satisfacer la parte que no ha quedado cubierta en el siguiente periodo en el que hay stock disponible. En esta etapa también retornan a la cadena de suministro los productos que han agotado el ciclo de vida en este periodo, para ser remanufacturados posteriormente. Por último, en la etapa de suministro basándonos en la predicción de la demanda se calcularán las órdenes de remanufactura y manufactura que serán necesarias y se lanzarán las órdenes de producción.

2.3.1 Etapa de recepción

Al principio de cada periodo t , las órdenes de producción terminadas, de tanto como los productos manufacturados como remanufacturados, son añadidas al inventario inicial. Las órdenes de producción de productos manufacturados fueron lanzadas hace $T_m + 1$ periodos, siendo T_m el tiempo de manufactura de estos artículos, ver ecuación ((1)). De igual forma, las órdenes de producción de los productos remanufacturados fueron lanzadas hace $T_r + 1$ periodos, siendo T_r el tiempo de remanufactura, ver ecuación (2). T_m y T_r son tiempos

de producción fijos; a ambos tiempos de producción se les suma una unidad temporal porque los órdenes de producción son lanzadas al final de cada periodo, por lo tanto, se comienzan a realizar al principio del periodo siguiente. Para este trabajo se han asumido tiempos de producción fijos debido a que el periodo de revisión del inventario es muy superior (p.ej. semanas o meses), a la variabilidad de los tiempos de producción (p. ej. horas o días) (Goltsos T. E. et al., 2019).

El stock inicial se calcula sumando las órdenes de manufactura y remanufactura completadas en este período al stock final del periodo anterior, ver ecuación (3). De esta forma obtendremos el stock disponible para satisfacer la demanda de los clientes en este periodo. Hay que tener en cuenta que a la hora de modelar esta política se ha hecho uso de la variable backlog, que sirve para acumular la demanda no satisfecha en un periodo debido a una rotura de stock. La demanda insatisfecha será cubierta en el próximo periodo en el que haya stock disponible.

2.3.2 Etapa de servicio

Durante esta etapa se cubre la demanda de los clientes con el stock disponible y se reciben los productos consumidos por los clientes para remanufacturarlos posteriormente. En esta etapa también se calculan las órdenes de producción en progreso. Para este proyecto se ha determinado que la demanda será siempre desconocida, por lo que para modelarla se hará uso de una variable aleatoria, x_t , que seguirá una distribución normal con media μ , y desviación típica σ . El coeficiente de variación de la demanda será calculado de la siguiente forma, $CV_d = \frac{\sigma}{\mu}$. La demanda solo puede ser positiva, por lo que truncaremos la variable de la demanda para que solo pueda adoptar valores positivos, ver ecuación (4).

La demanda de los clientes es satisfecha a través del stock disponible, que ha sido calculado en la etapa anterior como stock inicial. El stock restante una vez cubierta la demanda de los clientes, se calcula como la diferencia del stock inicial menos la demanda de los clientes, pero hay que tener en cuenta también si en el periodo anterior se cubrió la demanda totalmente o hubo una rotura de stock; por lo que también hay que restarle al stock inicial el backlog final del periodo anterior, ver ecuación (5). Cuando el stock final, $ns_t > 0$, significa que la demanda ha sido cubierta en su totalidad y no se ha producido una rotura de stock. Por el contrario, cuando $ns_t < 0$, es que se ha producido una rotura de stock y la demanda no se ha podido cubrir totalmente. En este caso entra en juego la variable backlog, donde se almacena la parte de la demanda que no ha sido satisfecha para intentar cubrirla en el siguiente periodo en el que haya stock disponible.

En esta misma etapa y mismo periodo t , los artículos que han sido consumidos previamente por los clientes retornan a la cadena de suministro para ser reutilizados, produciendo con ellos nuevos productos para satisfacer la demanda de los clientes. Los productos retornados representan el porcentaje de los artículos que una vez han sido consumidos por los clientes, regresan a la cadena de suministro, este es desconocido y será modelado como una variable aleatoria, esta es una práctica común en este tipo de industria (Goltsos T. E. et al., 2019). La tasa de retorno se modela con un conjunto de variables aleatorias idénticas e independientes, y_t , que sigue una distribución beta con los parámetros de forma α_y y β_y . El uso de este tipo de distribución es una elección razonable, ya que esta nos devolverá un valor entre $[0,1]$ y puede tomar diferentes formas dependiendo de α_y y β_y . La media, μ_y , la desviación estándar, σ_t , de y_t son funciones de los parámetros de forma como se muestra:

$$\mu_y = \frac{\alpha_y}{\alpha_y + \beta_y}, \quad \sigma_y = \frac{\sqrt{\alpha_y \beta_y}}{(\alpha_y + \beta_y) \sqrt{\alpha_y + \beta_y + 1}}$$

De igual forma, el coeficiente de variación de la tasa de retorno

se calcula de la siguiente manera, $CV_y = \frac{\sigma_y}{\mu_y} = \sqrt{\frac{\beta_y}{\alpha_y(\alpha_y + \beta_y + 1)}}$. Finalmente, el retorno en t se calcula como el producto de la tasa de retorno en t , multiplicado por la demanda de $t - T_c$ periodos, siendo T_c el tiempo de medio de consumo del producto, ver ecuación (6).

Por último, se calculan las órdenes de producción que están siendo procesadas o también llamada esta variable *work-in-progress (wip)* de este periodo t , tanto las de productos manufacturados como remanufacturados. El *wip* se calcula como la suma de las diferencias de las ordenes de producción lanzadas en $t - 1$ y las órdenes de producción completadas en este periodo t , de los productos manufacturados y remanufacturados más el *wip* del periodo anterior, ver ecuación (7).

2.3.3 Etapa de suministro

Durante esta etapa se lanzan las órdenes de producción de los productos manufacturados y remanufacturados. En primer lugar, se les da prioridad a todos los productos consumidos que han sido recuperados, ya que el proceso de remanufactura incurre en menos costes de producción que el de manufactura y es menos dañino para el medio ambiente al estar reutilizando un producto (Parker D. et al, 2015). De este modo se lanza una orden de producción para los productos remanufacturados igual a la tasa de retorno del mismo periodo t , ver ecuación (12).

Por otro lado, las órdenes de manufactura siguen una política proporcional de lanzamiento de órdenes de producción, es decir, solo se producirá la parte proporcional de la demanda que no haya podido ser cubierta con las órdenes de remanufactura. Esta política se denomina en inglés “*Proportional order up to policy*” (*POUT*) y es una generalización de la bien conocida “*Order up to policy*” (*OUT*), cuyo objetivo es alcanzar un mejor equilibrio entre el efecto látigo y el nivel de servicio (Ponte et al., 2021a). Las órdenes de manufactura se calculan como la suma de: (i) la diferencia entre la predicción de la demanda esperada y las órdenes de remanufactura completas, representando la demanda neta; (ii) una parte de la diferencia entre el stock de seguridad objetivo y el nivel de stock de servicio al final del periodo; y (iii) una parte de la resta del objetivo de órdenes de trabajo en progreso menos las órdenes de trabajo en progreso en este periodo, ver ecuación (11) (Ponte et al., 2021a). Esta suma es truncada para evitar que se lancen órdenes de producción negativas. De esta ecuación hay que destacar el uso de las constantes de tiempo de los controladores (T_i para el stock de servicio, también llamado controlador de inventario y T_w para las órdenes de trabajo en progreso). Estos son dos importantes parámetros de decisión de la política *POUT*, que permite a los gestores de la cadena de suministro controlarla de forma más eficaz.

Como han sido mencionados anteriormente, para estimar las órdenes de manufactura necesitamos conocer el stock de seguridad, las órdenes de trabajo en progreso y la predicción de la demanda. En nuestro proyecto la predicción de la demanda es calculada a través del método de suavizamiento exponencial. Esta fórmula toma la demanda media para un cierto periodo de tiempo y a través de un parámetro α , les da una ponderación mayor a los valores más cercanos en el tiempo, ver fórmula (8). El stock de seguridad se calcula como el producto del factor del stock de seguridad, ssf , multiplicado por la predicción de la demanda en el periodo t , ver ecuación (9).

El objetivo de las órdenes de trabajo en progreso se estima como el producto de la predicción de la demanda por la estimación del tiempo de producción ponderado, T_p , ver ecuación (10). Por último, cabe destacar que los parámetros α , ssf y T_p son muy importantes a la hora de gestionar la cadena de suministro cerrada; α impacta en la sensibilidad de la predicción de la demanda frente a los cambios de la demanda real; ssf determina el número de periodos que están protegidos contra las rupturas de stock por el stock de seguridad; y T_p afecta significativamente el equilibrio entre el nivel de servicio y costes de almacenamiento.

2.4 Modelado de la política de retorno tipo pull

En este apartado estudiaremos en profundidad la política de retorno tipo pull, en la cual solo serán remanufacturados aquellos productos que sean necesarios para satisfacer la demanda.

Esta política de retorno esta dividida de igual forma que la política anterior en tres etapas. La etapa de recepción es exactamente igual que la de la política push. Por otro lado, la política de servicio y de suministro sufren algunos cambios que veremos a continuación.

2.4.1 Etapa de servicio

La diferencia con la política de retorno tipo push es que en esta haremos uso de dos nuevas variables para almacenar el stock de recuperados. La primera variable se denomina isr o stock inicial de recuperados, a la segunda variable se le ha denominado sr y hace mención del stock de recuperados. La función de estas dos variables es la misma, almacenar el número de productos retornados que están en disponibles para ser

remanufacturados. Como se comentó anteriormente estas dos variables son tratadas como externas a la cadena de suministro cerrada, es decir, como si tuviéramos un proveedor que almacenase productos recuperados hasta que la cadena de suministro cerrada los demandase. El stock inicial de recuperados se calcula como la suma de los productos retornados (r) y el stock de recuperados (sr) del periodo anterior, ver ecuación (14). El cálculo de la variable sr lo veremos en el siguiente apartado.

2.4.2 Etapa de suministro

Esta etapa es la que más difiere respecto a la política anterior, ya que para este caso de retorno tipo pull los gestores de la cadena de suministro son los que deciden cuantos artículos recuperados quieren que sean remanufacturados. Es decir, los artículos recuperados no forman parte de la cadena de suministro hasta que se decide que van a ser remanufacturados según la demanda, a diferencia de la política anterior en la que todos los artículos eran remanufacturados, sin importar si estos excedían la demanda de los clientes para un periodo en concreto.

En el retorno tipo pull se calculan las ordenes de producción necesarias (on), tanto de manufactura como de remanufactura. Esta variable se calcula como la suma de la predicción de la demanda (d_t), más una parte de la diferencia entre el stock de seguridad objetivo y el nivel de stock disponible al final del periodo, mas una parte de la resta del objetivo de órdenes de trabajo en progreso menos las órdenes de trabajo en progreso en este periodo, ver ecuación (15). En la política anterior las órdenes de manufactura se calculaban de manera similar, la diferencia es que en el retorno tipo push, a la predicción de la demanda se le restaba las órdenes de manufactura completas. La razón por la que esta ecuación ha cambiado es que ya los productos recuperados no se tratan como productos que pertenecen a la cadena de suministro, hasta que se procesan las órdenes de remanufactura, suponiendo esto un ahorro de costes en el almacenaje y la producción.

Una vez que conocemos las órdenes de producción necesarias, vamos a darle prioridad a los productos que pueden ser remanufacturados siguiendo las motivaciones económicas y medioambientales mencionadas anteriormente. En primer lugar, se comprueba si el stock inicial de productos recuperados (isr) es mayor que las órdenes de producción necesarias, cuando esto se produce el número de órdenes de remanufactura es igual a las órdenes de remanufactura necesarias, ver ecuación (17). A continuación, se actualiza el stock de productos recuperados, resultando este como la diferencia del stock inicial de recuperados menos las órdenes de producción necesarias, ecuación (16). En este caso no se lanzan órdenes de manufactura ya que toda la demanda queda cubierta con órdenes de remanufactura, ver ecuación (18).

El segundo caso que se puede dar se produce cuando el stock inicial de productos recuperados (isr) es menor que las órdenes de producción necesarias. Las órdenes de remanufactura, en este caso, son igual al número de productos disponible en el stock inicial de recuperados, ver ecuación (17). El stock de recuperados quedaría igual a cero, ya que se remanufacturan todos los artículos disponibles. Por último, las órdenes de manufactura se estiman como la diferencia de órdenes de producción necesarias menos las órdenes de remanufactura, ver ecuación (18).

Política de retorno tipo push

Variable

Ecuación

1. Etapa de recepción

Órdenes de manufactura completadas, mc_t

$$mc_t = mo_{t-(Tm+1)}$$

(1)

Órdenes de remanufactura completadas, rc_t	$rc_t = ro_{t-(T_r+1)}$	(2)
Stock inicial, is_t	$is_t = ns_{t-1} + mc_t + rc_t$	(3)
2. Etapa de servicio		
Demanda, d_t	$d_t = \max\{x_t, 0\}, x_t \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$	(4)
Stock, ns_t	$ns_t = is_t - d_t + bl_{t-1}$	(5)
Productos retornados, r_t	$r_t = y_t \times d_{t-T_c}, y_t \rightarrow B(\alpha_y, \beta_y)$	(6)
Órdenes en progreso, w_t	$w_t = w_{t-1} + (mo_{t-1} - mc_t) + (ro_{t-1} - rc_t)$	(7)
3. Etapa de suministro		
Predicción de la demanda, $d_{_t}t$	$d_{_t}t = \alpha d_t + (1 - \alpha)d_{_t}t_{-1}$	(8)
Stock de seguridad, ss_t	$ss_t = ssf \times d_{_t}t$	(9)
Objetivo de órdenes en progreso, $t_w t$	$t_w t = Tp \times d_{_t}t$	(10)
Órdenes de producción necesarias, on_t	$mr_t = \max\{(d_{_t}t - rc_t) + \frac{1}{T_i}(ss_t - ns_t) + \frac{1}{T_w}(tw_t - w_t), 0\}$	(11)
Órdenes de remanufactura lanzadas, ro_t	$ro_t = r_t$	(12)
Órdenes de manufactura lanzadas, mo_t	$mo_t = mr_t$	(13)
Ecuaciones propias de política de retorno tipo pull		
1. Etapa de servicio		
Stock inicial de recuperados, isr_t	$isr_t = sr_{t-1} + r_t$	(14)
2. Etapa de suministro		
Órdenes de producción necesarias, on_t	$on_t = \max\{d_t + \frac{1}{T_i}(ss_t - ns_t) + \frac{1}{T_w}(tw_t - w_t), 0\}$	(15)
Stock recuperados, sr_t	$sr_t = \begin{cases} isr_t - on_t, & on_t \leq isr_t \\ 0, & on_t > isr_t \end{cases}$	(16)
Órdenes de remanufactura lanzadas, ro_t	$ro_t = \begin{cases} on_t, & on_t \leq isr_t \\ isr_t, & on_t > isr_t \end{cases}$	(17)
Órdenes de manufactura lanzadas, mo_t	$mo_t = \begin{cases} 0, & on_t \leq isr_t \\ on_t - ro_t, & on_t > isr_t \end{cases}$	(18)

Tabla 1. Formulación matemática de la política de retorno tipo push y pull..

2.5 Indicadores clave de rendimiento

Para evaluar el rendimiento de las políticas de retorno en una cadena de suministro cerrada, vamos a utilizar los siguientes indicadores de rendimiento: “the Manufacturer Order Variance Ratio (**MOV**R)” o ratio de variación

de los pedidos manufacturados, “the Remanufacturer Order Variance Ratio (**ROVR**)” o ratio de variación de los pedidos remanufacturados, “the Inventory Variance Ratio (**IVR**)” o ratio de variación del inventario, el stock y el backlog medios. Estos indicadores los podemos encontrar en la parte inferior de la *Tabla 1. Formulación matemática de la política de retorno tipo push y pull.*

El **MOVR** evalúa la varianza de las órdenes de producción de los productos manufacturados comparándola con la demanda de los clientes, ver ecuación (19). Unos altos valores de este indicador se interpretan como procesos de la cadena de suministro ineficientes, incluyendo sobreproducción y altos tiempo de espera. Este indicador nos muestra cuanto afecta el efecto látigo a la cadena de suministro cerrada, siendo este mayor cuanto mayor es el valor del indicador.

El siguiente indicador que vamos a analizar es el **ROVR**, este mide la variación que se produce entre las órdenes de producción de productos remanufacturados con la demanda, ver ecuación (20). En esta ocasión cuando obtenemos como resultados un alto valor del indicador, se puede traducir como procesos de remanufactura ineficientes al no hacer un uso de los recursos estable.

Posteriormente tenemos el **IVR**, este tipo de métrica compara la varianza que sufre el stock con la varianza de la demanda de los clientes, ver ecuación (21). Cuando se obtienen bajos valores de este indicador, significa que el nivel de servicio a los clientes es alto con un stock bajo. De lo contrario, cuando el **IVR** es alto, los niveles de servicio al cliente son bajos; una forma aumentar el nivel de servicio en este caso sería realizar una gran inversión en almacenamiento y mantener un stock alto.

El objetivo de un sistema híbrido de manufactura y remanufactura, con una demanda dada, es obtener los mínimos valores de los indicadores anteriores. Aunque, también se puede jugar con los diferentes indicadores, dejando de lado alguno de ellos, para conseguir los resultados deseados.

A estos tres indicadores anteriores hay que sumarles el stock y el backlog medios, que están directamente relacionados con el nivel de servicio, ver ecuaciones (22) y (23). Cuando se producen rupturas de stock o se obtienen altos valores del backlog, el nivel de servicio es bajo.

<i>Key performance indicator</i>		
<i>Manufacturing Order Variance Ratio</i>	$MOVR = \frac{var(mo_t)}{var(d_t)}$	(19)
<i>Remanufacturing Order Variance Ratio</i>	$ROVR = \frac{var(ro_t)}{var(d_t)}$	(20)
<i>Inventory Variance Ratio</i>	$IVR = \frac{var(ns_t)}{var(d_t)}$	(21)
Media stock	$media_{ns} = \frac{\sum_{t=1}^n ns_t}{n}$	(22)
Media backlog	$media_{bl} = \frac{\sum_{t=1}^n bl_t}{n}$	(23)

Tabla 2. Indicadores clave de rendimiento

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El propósito principal de este trabajo de investigación es comparar las dos políticas de retorno, para poder sacar una conclusión razonada y justificada de cuál de las dos es más eficiente. La naturaleza no lineal del modelo matemático, creado a partir de los procesos de una cadena de suministro cerrada, nos obligan a estudiar este a través de experimentos, en vez de hacerlo de forma analítica.

Para llevar a cabo las simulaciones de los modelos matemáticos de las políticas detalladas en el capítulo anterior, vamos a implementar estas en MATLAB R2021b. Este sistema de computación nos permite programar de forma sencilla los dos modelos matemáticos, correr tantos experimentos como sean necesarios y establecer los diferentes parámetros de los experimentos. Los modelos matemáticos de ambas políticas han sido verificados y validados formulando a partir de cada uno de ellos una cadena de suministro abierta. Los resultados obtenidos tras simular varios experimentos de los modelos matemáticos de ambas políticas con retorno 0 han sido iguales (simulando una cadena de suministro abierta), por lo que podemos confirmar que los modelos matemáticos funcionan correctamente. También se ha realizado un exhausto seguimiento de los resultados intermedios de las variables principales, como las órdenes de manufactura y remanufactura, del stock y del backlog, para comprobar una vez más la correcta ejecución del modelo.

Cada una de las políticas ha sido simulada 18 veces (una por cada uno de los escenarios que van a ser explicados a continuación) utilizando variables aleatorias para modelar la demanda y la tasa de retorno. Una vez realizados los diferentes experimentos se han comparado los resultados los indicadores con los de otro trabajo de investigación (Ponte et al., 2021a), siempre comparando la misma configuración de las variables independientes, y los resultados han sido muy similares por lo que se puede confirmar el correcto funcionamiento de los modelos matemáticos.

3.1 Alcance de los experimentos

Con el objetivo de analizar de forma exhaustiva ambas políticas para determinar cuál de ellas es más eficiente, vamos a explicar en este apartado cuales son los parámetros que vamos a configurar para realizar el diseño de experimentos. Las variables que vamos a estudiar van a ser: la media de la tasa de retorno, el tiempo de entrega (*lead time*) y la constante de tiempo para el inventario.

Es muy importante estudiar diferentes configuraciones de la tasa de retorno, ya que afecta de forma directa al rendimiento de una cadena de suministro cerrada, y en especial cuando el objeto de estudio del proyecto son las diferentes políticas de retorno de los productos. Una baja tasa de retorno, comparándola con la demanda, puede que no represente ninguna diferencia en las dos políticas de devolución, ya que todo lo que regrese a la cadena de suministro será remanufacturado. Por otro lado, una tasa de retorno alta puede que establezca diferencias de rendimiento entre las dos políticas, ya que en la política de retorno tipo pull solo se remanufacturará lo estrictamente necesario, mientras que en la política de retorno tipo push se remanufacturará todo, lo que podría provocar una saturación del sistema. Por esta razón se ha determinado que se estudiaran dos valores de la tasa de retorno: $\mu_y = \frac{1}{3}$, correspondiendo con un valor bajo para la tasa de retorno; y $\mu_y = \frac{3}{4}$, correspondiendo con un valor alto para la tasa de retorno. Ambos valores van acompañados por un coeficiente de variación, $\sigma_y = 10\%$. Cabe destacar que los valores máximos y mínimos de las dos configuraciones de las medias de la tasa de retorno no deben solaparse, ya que en ese caso no se observarían diferencias en las tasas de retorno.

También es interesante considerar las interacciones entre el nivel de servicio que se alcanza y el efecto suavizante ante el efecto látigo de la política *POUT*, ya que esto tendría implicaciones de gestión relevantes sobre el control adecuado de la dinámica de la cadena de suministro cerrada. Por esta razón, se han establecido tres valores diferentes para la constante de tiempo controladora del inventario, T_i . En los experimentos se estudiarán los

valores de $T_i, 2^k$, para $k=0, 2, 4$. Para el valor $k=0$, por lo que $T_i = 1$, la política *POUT* se simplifica, resultando ser como el modelo de *OUT*; mientras que para $k=3$ ($T_i = 16$) el efecto suavizante es mucho mayor en las órdenes de manufactura. También es importante remarcar que estudiaremos la configuración Deziel-Elion, en la que se establece que $T_i = T_w$ (Deziel et al., 1967). Esta es la configuración más extendida de la política *POUT* puesta en práctica.

Por último, vamos a analizar el factor del tiempo de entrega o *lead time*. Cuando nos referimos a tiempo de entrega, nos referimos al tiempo que se tarda desde que se lanza una orden de producción (ya sea para productos manufacturados o remanufacturados) hasta que el producto está finalizado y listo para servir al cliente. El plazo de entrega en una cadena de suministro cerrada afecta la eficiencia y rentabilidad de las operaciones. Un plazo más corto puede dar lugar a una mayor rotación de productos, lo que puede resultar en un aumento de la sostenibilidad y una reducción de los residuos. Si el plazo es demasiado corto, puede resultar en dificultades operativas, como interrupciones en la cadena de suministro, aumento de los costos y disminución de la calidad. Por otro lado, un plazo más largo puede resultar en un aumento de los costos de inventario y almacenamiento, así como en una reducción de la respuesta a la demanda del cliente. El equilibrio entre el plazo y la sostenibilidad es una consideración importante en la gestión de la cadena de suministro cerrada.

En este proyecto vamos a trabajar con un solo *lead time*, es decir, el tiempo de manufactura (T_m) y el tiempo de remanufactura (T_r) siempre van a ser iguales, siguiendo las recomendaciones de (Hosoda et al., 2008). Esta situación permite a los administradores de una cadena de suministro cerrada mejorar la sostenibilidad de sus operaciones sin perder su rentabilidad, ya que los tiempos más cortos de remanufactura a menudo pueden ser difíciles de manejar en la vida real, como se puede ver en (Hosoda et al., 2008). Los valores que va a tomar este parámetro van a ser $T_m = 2, 4$ y 6 . Para $T_m = 2$, es el caso más extendido de tiempo de entrega en la configuración de una cadena de suministro cerrada, según. (Costantino et al., 2013); para los casos $T_m = 4$ y 6 , nuestra intención es comprobar como responden las diferentes políticas ante mayores tiempo de entrega, ya que esto puede suponer un problema de sobrecarga para el sistema cuando no se controla el retorno de los productos.

3.2 Escenario de la cadena de suministro y configuración de la simulación

En este apartado se describirá la configuración del resto de parámetros que forman parte del modelo matemático y que no han sido mencionados en el apartado anterior. A continuación, se va a definir un escenario realista para una cadena de suministro cerrada que está caracterizado por valores fijos para los siguientes parámetros: tiempo de consumición (T_c), media (μ) y desviación típica (σ) de la demanda, el coeficiente para la predicción de la demanda (α_d) y el factor del stock de seguridad (ssf).

En primer lugar, nos centraremos en el tiempo de consumición, a este parámetro se le ha dado un valor de $T_c = 16$, ya que este, por regla general es bastante más alto que el resto de *lead time* (tiempo de manufactura y tiempo de remanufactura). A continuación, vamos a configurar los parámetros estocásticos de la demanda de los clientes. Esta demanda está compuesta por la media $\mu = 120$ y un coeficiente de variación $CV_d = 25\%$, es decir, una desviación típica $\sigma = 30$. Estos valores continúan la línea de la investigación de (Dejonckheere J. et al., 2003), donde se determina que los coeficientes típicos de variación de las series temporales de demanda en el mundo real rondan entre en 15% y el 50% .

En relación con los parámetros de decisión del modelo de reabastecimiento, se ha determinado utilizar un factor de alisamiento, $\alpha_d = 0,1$ siguiendo la recomendación de los expertos de situarlo entre $0,05 \leq \alpha_d \leq 0,2$ (Teunter R.H. et al., 2011). Respecto al factor del stock de seguridad se le dará el siguiente valor, $ssf = 1$, esto significa que el stock de servicio está protegido durante un periodo para reducir la probabilidad que se produzca una rotura de stock, como en (Ponte et al., 2021b). Para la estimación de *lead time* conjunto, es decir, tiempo de manufactura y tiempo de remanufactura unidos, se aplicará la siguiente fórmula, $T_p = T_p^{TN} = (1 - \mu_y) \times T_m + \mu_y \times T_r$ (Tang O. et al., 2004).

Para concluir, la siguiente tabla

Tabla 3. Diseño de experimentos

Tabla 3 recoge los diferentes escenarios que se utilizarán para los experimentos que han sido nombrados anteriormente. Cada uno de los escenarios se realizará 15 veces, es decir, está compuesto por 15 simulaciones, y cada una de estas simulaciones está formada por 2000 periodos para asegurar la consistencia de los resultados

y la veracidad de nuestros hallazgos. En resumen, se llevarán a cabo un total de 36 experimentos (2 valores de μ_y \times 3 valores de T_i \times 3 valores de T_p \times 2 política de devolución) y por consecuencia unas 540 simulaciones (36 experimentos \times 15 simulaciones). La estabilidad de los dos modelos matemáticos será comprobada también posteriormente, a través del análisis de resultados.

Política	μ_y	σ_y	Lead time	Controlador de inventario
1	1/3	10%	2	1
1	1/3	10%	2	4
1	1/3	10%	2	16
1	1/3	10%	4	1
1	1/3	10%	4	4
1	1/3	10%	4	16
1	1/3	10%	6	1
1	1/3	10%	6	4
1	1/3	10%	6	16
1	3/4	10%	2	1
1	3/4	10%	2	4
1	3/4	10%	2	16
1	3/4	10%	4	1
1	3/4	10%	4	4
1	3/4	10%	4	16
1	3/4	10%	6	1
1	3/4	10%	6	4
1	3/4	10%	6	16
2	1/3	10%	2	1
2	1/3	10%	2	4
2	1/3	10%	2	16
2	1/3	10%	4	1
2	1/3	10%	4	4

2	1/3	10%	4	16
2	1/3	10%	6	1
2	1/3	10%	6	4
2	1/3	10%	6	16
2	3/4	10%	2	1
2	3/4	10%	2	4
2	3/4	10%	2	16
2	3/4	10%	4	1
2	3/4	10%	4	4
2	3/4	10%	4	16
2	3/4	10%	6	1
2	3/4	10%	6	4
2	3/4	10%	6	16

Tabla 3. Diseño de experimentos

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se analizarán los resultados obtenidos una vez han sido simulados los diferentes escenarios que han sido descritos en el capítulo anterior. Para llevar a cabo este estudio vamos a realizar un análisis de varianza o ANOVA de varios factores. Un análisis de varianza es una fórmula estadística que se utiliza para comparar las varianzas entre las medias (o el promedio) de diferentes grupos. Este se suele utilizar para determinar si existe alguna diferencia entre las medias de los diferentes grupos y si esta es estadísticamente significativa (TIBCO, s.f.). En este caso se utilizará para comparar las medias de las diferentes réplicas, de cada experimento. Un ANOVA establece dos hipótesis: la hipótesis nula, que se corrobora cuando no existe diferencia entre las medias o los grupos; por otro lado, tenemos la hipótesis del investigador o hipótesis alternativa, que se confirma cuando existe una diferencia entre los grupos y las medias, esta es siempre respaldada por los resultados cuantitativos del análisis de varianza. El análisis de los resultados de un ANOVA se realiza a través del factor p , cuando este es mayor a 0,05 (determinando este valor una confianza del 95%) indica que el factor no es significativo, es decir, no tiene una importancia relevante a la hora de comparar las medias de las réplicas. Por otro lado, tenemos el factor F , este ratio muestra la diferencia entre la varianza dentro del grupo y la varianza entre grupos, lo que finalmente produce una cifra que permite concluir que la hipótesis nula es respaldada o rechazada. Si hay una diferencia significativa entre los grupos, la hipótesis nula no es compatible y la razón F será mayor (TIBCO, s.f.).

Existen dos tipos de ANOVA, de un factor y de varios factores. El primero se centra en estudiar la incidencia de un único factor o variable independiente, sobre la media de la variable dependiente que estamos estudiando. Con respecto al ANOVA de varios factores, evalúa el efecto que tienen varias variables independientes sobre las medias de una variable dependiente, este último caso es el que utilizaremos en nuestro análisis de varianza. Para llevar a cabo este, haremos uso del software estadístico SPSS, ya que nos ofrece ventajas como la fácil interpretación de los resultados y la posibilidad de dibujar gráficas según los parámetros que se quieran utilizar.

4.1 Análisis del indicador: Manufacturing Order Variance Ratio

En este apartado se analizará como influye la política de retorno tipo push o la política de retorno tipo pull al MOVR, junto con los otros parámetros que han sido explicados anteriormente en el diseño de experimentos. Para ello nos ayudaremos de las gráficas proporcionadas por SPSS y la tabla de prueba de efectos inter-sujetos. En esta tabla *Tabla 1* podemos observar que todas las variables poseen medias estadísticamente diferentes con un 95% de confianza, es decir, podemos rechazar la hipótesis nula de igualdad de las medias, a la hora de estudiar la influencia en la variable **MOVR**. La significancia de todas las variables o relaciones de dos variables son menores a 0,05, este hecho corrobora nuestra afirmación anterior. Por otro lado, en la segunda columna podemos encontrar el factor F que cuantifica la diferencia entre estas medias. Cuanto mayor es el factor F con mayor determinación podemos afirmar que las medias son diferentes entre sí y que por lo tanto existe una relación directa entre la configuración de nuestro parámetro y el resultado de nuestro indicador. Los parámetros que afectan en mayor medida al MOVR son el controlador de inventario ($F = 130510,64$) y el lead time ($F = 2571,543$), ya que ofrecen los mayores valores del factor F . El parámetro que menos altera el MOVR es la interacción entre la política y el lead time porque posee el menor factor F y el nivel de significancia es mayor a 0.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Manufacturing Order Variance Ratio		
Origen	F	Sig.
Política	856,111	0
Tasa retorno	352,928	0
Lead time	2571,543	0
Ti	130510,64	0
Política * Tasa retorno	57,088	0
Política * Lead time	6,536	0,002
Política * Ti	443,659	0

Tabla 4. Resultados ANOVA: MOVR

En la siguiente gráfica *Ilustración 3* podemos observar que existe una clara diferencia de los valores que adopta el MOVR según la política, y según la tasa de retorno. En primer lugar, para los dos casos de tasa de retorno, la política 1 o de retorno tipo push nos ofrece un valor más alto que la política 2 o de retorno tipo pull. Esto se debe a que en la política 1 la variación del retorno es mucho mayor al retornar todos los productos sin tener en cuenta cuantos son realmente necesarios, por otro lado, en la política 2 la variación es mucho menor al tener controlado el retorno.

Teniendo en cuenta la tasa de retorno, cuando $\mu_y = \frac{1}{3}$ los valores que alcanza el MOVR son mayores que cuando $\mu_y = \frac{1}{4}$, como hemos explicado anteriormente, la política 1 es la que alcanza un mayor valor de las dos. Esto se debe a que, con una tasa de retorno menor, se tiene que hacer uso mayor de las órdenes de producción de los artículos nuevos, ya que los productos que regresan cubren en menor medida la demanda que cuando la tasa de retorno es alta. Por último, recalcar que la diferencia entre los valores del MOVR para la política 2 son mucho mayores que para la política 1, la razón por la que esto ocurre es que cuando el retorno es alto el control de la política 2 es mucho más efectivo.

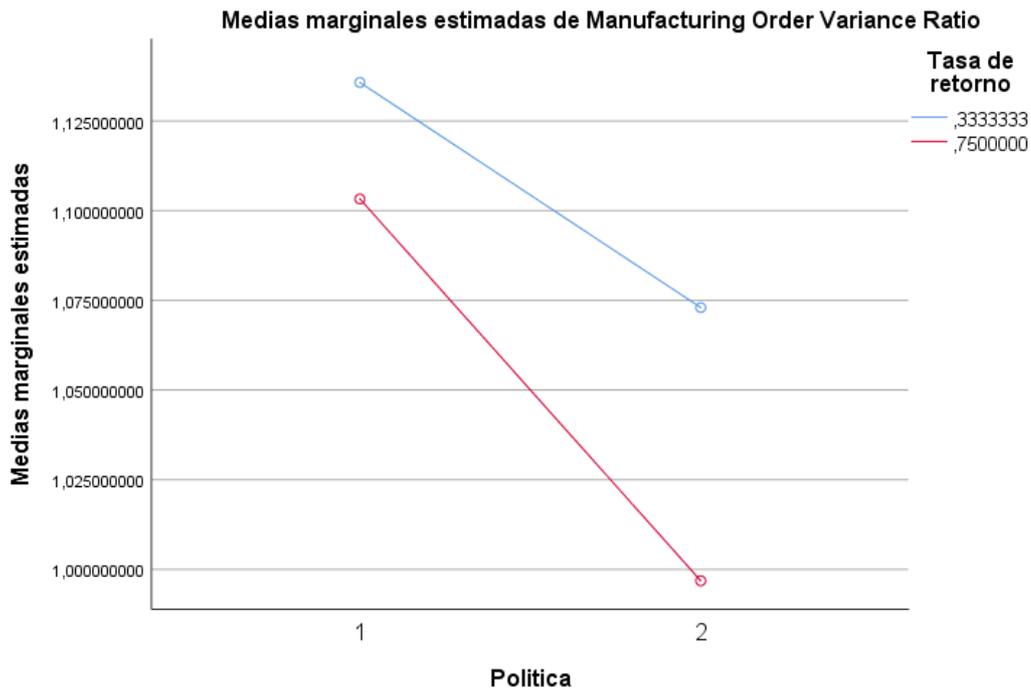


Ilustración 3. Análisis del MOVR y la tasa de retorno

En la siguiente gráfica *Ilustración 4* analizaremos como afectan los diferentes tiempos de entrega de los productos manufacturados y remanufacturados según la política de retorno de estos. Como podemos observar en la gráfica, la pendiente de la recta es siempre la misma para los tres valores del *lead time*. En la política de retorno tipo push los valores del MOVR son siempre mayores que para la política de retorno tipo pull, siendo el *lead time* el mismo. Esto se debe al efecto que produce el control del retorno de los productos a la cadena de suministro, reduciendo la varianza del lanzamiento de órdenes de producción de productos manufacturados. Por otro lado, cuanto mayor es el *lead time* mayor es el MOVR, debido a que cuanto mayor es el tiempo desde el lanzamiento de la orden a la recepción de producto, menos se puede predecir y controlar el retorno de los productos, produciendo que la varianza de las ordenes de producción aumenten.

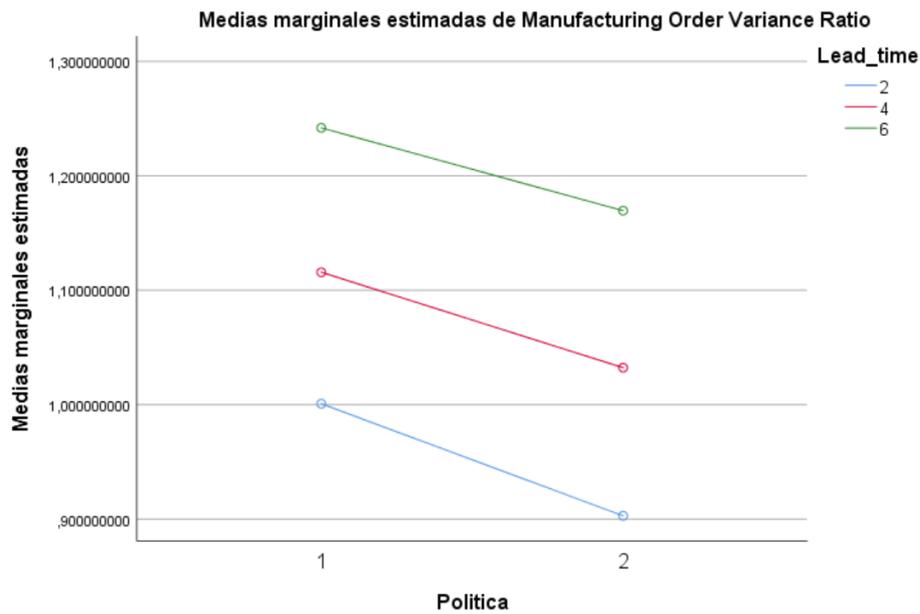


Ilustración 4. Análisis del MOVR y del lead time

Por último, vamos a estudiar de qué forma afecta el controlador de inventario al MOVR según la política con la que estemos trabajando. Lo primero que llama la atención es la gran diferencia que experimenta el MOVR, cuando el controlador de inventario es mayor que 1. La principal razón por la que existe esta gran diferencia es que cuando el controlador de inventario es 1, la demanda de órdenes de producción necesarias varía más, ya que no existe este elemento regulador que disminuye la diferencia entre el stock de seguridad y el stock neto. Por lo tanto, aumenta la variabilidad de las órdenes de producción. Cuando mayor es el controlador de inventario mejores valores del MOVR obtenemos, es decir, el MOVR es menor, esto ocurre tanto para la política 1 y 2. También cabe destacar que apenas se aprecia una diferencia de los valores del MOVR ante la política 1 y 2, cuando $T_i = 4$ ó 16 . Sin embargo, cuando $T_i = 1$, sí se observa una diferencia entre la política 1 y 2, obteniéndose un menor valor del indicador en esta segunda. La razón por la que se produce esta reducción del valor de este indicador es que, al controlar el retorno, solo regresan a la cadena de suministro los artículos necesarios, porque el inventario se vuelve más estable y por consecuencia el número de órdenes de producción de artículos nuevos también se estabiliza. Estos resultados siguen la línea de investigaciones anteriores como el mencionado anteriormente (Ponte et al., 2021a, págs. 9-10), en las que se estudia la relación entre el MOVR y el controlador de inventario.

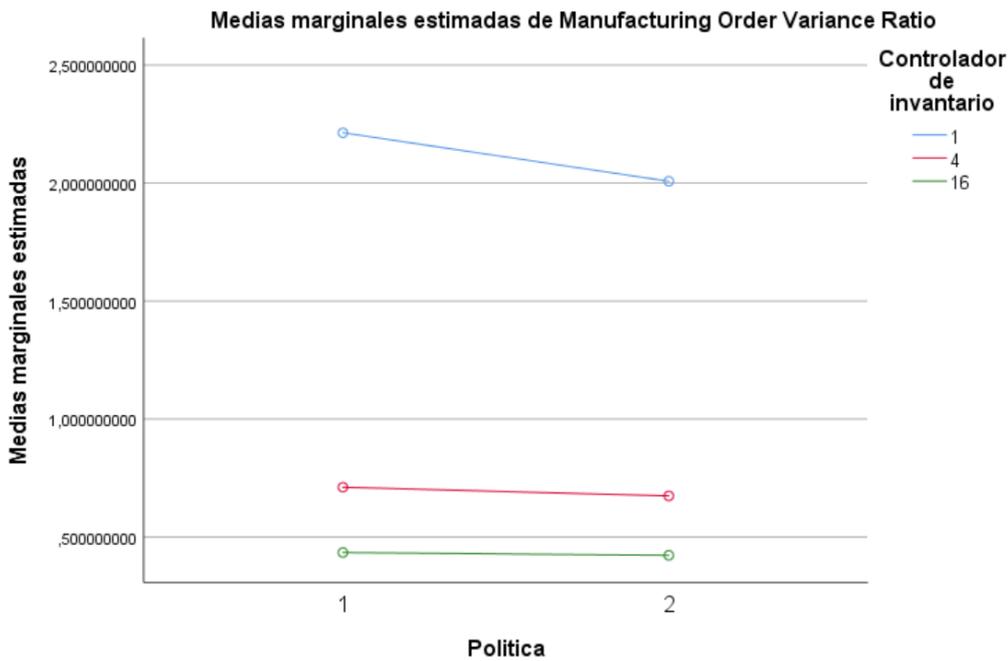


Ilustración 5. Análisis del MOVR y del controlador de inventario.

4.2 Análisis del indicador: Remanufacturing Order Variance Ratio

En este apartado se estudiará como afecta los diferentes parámetros configurados en el diseño de experimentos al indicador ROVR. En la siguiente tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** podemos observar que el ANOVA nos confirma la invalidez de la hipótesis nula, por lo que las medias son diferentes entre sí con un 95% de confianza. Los resultados del ANOVA para el indicador ROVR son realmente interesantes porque para las todas las variables e interacciones de variables obtenemos un nivel de significancia igual a 0. Si nos fijamos en el factor F podemos afirmar que existe una gran relación entre el resultado del ROVR y la configuración del controlador de inventario, ya que el valor del factor F es el más alto de todos. Por otro lado, el parámetro que menos afecta al ROVR es el *lead time*, porque el factor F es considerablemente el más bajo de todos, siendo este 542,97 y el de la tasa de retorno (el mayor) 172800,574.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Remanufacturing Order Variance Ratio		
Origen	F	Sig.
Modelo corregido	7354,047	0
Intersección	359975,056	0

Politica	2754,932	0
Tasa_retorno	172800,574	0
Lead_time	542,97	0
Ti	10069,241	0
Politica * Tasa_retorno	1472,785	0
Politica * Lead_time	535,788	0
Politica * Ti	10116,231	0

Tabla 5. Resultados ANOVA: ROVR

En este primer gráfico *Ilustración 6* el parámetro que se estudia es la tasa de retorno, como ya hemos explicado anteriormente esta toma dos valores, uno alto ($\mu_y = \frac{1}{4}$) y otro bajo ($\mu_y = \frac{1}{3}$). Tanto para la política 1 como para la política 2, los valores del ROVR son menores cuando la tasa de retorno es baja. Entre las dos políticas, la que alcanza un menor valor del indicador es la política 1, siendo la diferencia entre estas dos casi despreciable. Para el caso en el que la tasa de retorno es alta, la política 2 alcanza un valor significativamente más alto que la política 1. Lo que más llama la atención de esta gráfica es que con una tasa de retorno alta, se da una mayor variabilidad de las órdenes de producción de los artículos remanufacturados en la política en la que se controla el retorno de los productos. Esto sucede porque al no permitir el retorno de los productos de forma constante, sino que vamos permitiendo el retorno en función de la demanda, aumenta la varianza de las ordenes de producción de los artículos remanufacturados. Como conclusión, de esta gráfica podemos observar que la dinámica de la cadena de suministro cerrada se puede ver empeorada al pasar de la política de retorno tipo push a la de retorno tipo pull.

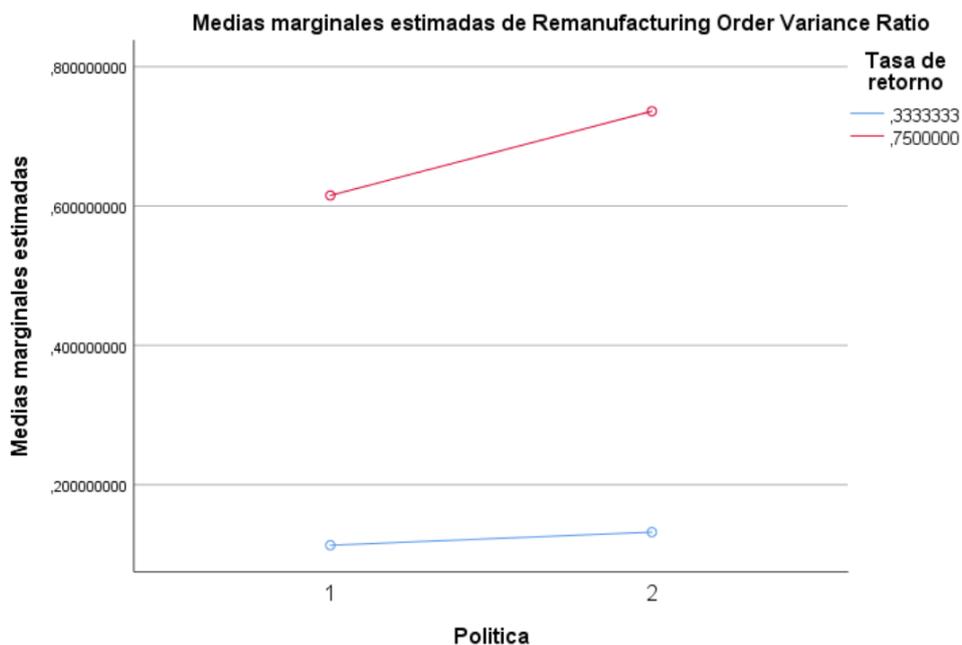


Ilustración 6. Análisis del ROVR y de la tasa de retorno.

En la gráfica *Ilustración 7* que se presenta a continuación vamos a analizar los valores que toma el indicador ROVR, teniendo en cuenta el parámetro del tiempo de producción o entrega, también conocido como *lead time*. Como se explicó anteriormente en el capítulo “*Escenario de la cadena de suministro y configuración de la simulación*” el *lead time* toma un valor bajo, medio y alto, los cuales son 2, 4 y 6, respectivamente. En la siguiente gráfica podemos observar que en la política 1, independientemente del valor que toma el *lead time*, el ROVR no varía y siempre se obtiene el mismo resultado. Por lo que se observa que la dinámica de la cadena de suministro cerrada puede no verse alterada cuando cambia la configuración del *lead time*. Por otro lado, cuando estudiamos la política 2, el ROVR adquiere un valor más alto cuando *lead time* es igual a 6, un resultado medio cuando el *lead time* es igual a 4 y un resultado bajo cuando el *lead time* es igual a 2. La explicación de este suceso se basa en que cuanto mayor es el *lead time*, más difícil es predecir cual será el estado del stock cuando recibamos los productos, ya que la cadena de suministros está sujeta a una mayor variabilidad desde el lanzamiento de la orden de producción hasta la recepción del producto. También hay que tener en cuenta que en la política 2 se les da preferencia a los artículos remanufacturados, por lo tanto, este efecto recae directamente sobre el indicador ROVR.

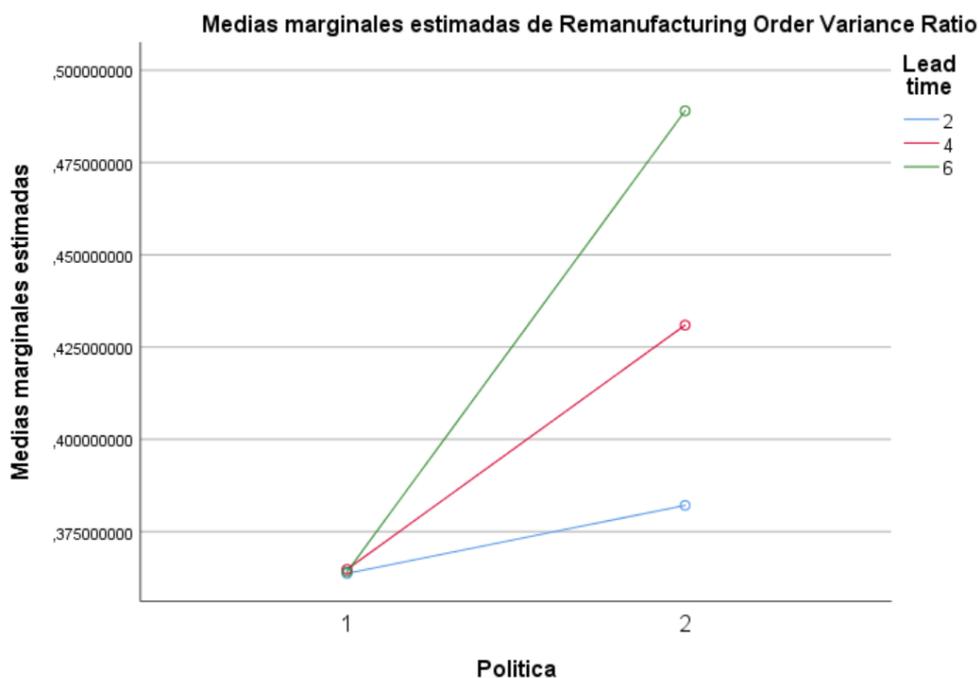


Ilustración 7. Análisis del ROVR y del Lead Time

En la siguiente gráfica *Ilustración 8* que se presenta a continuación, comparamos como afecta la configuración de la variable independiente, controlador de inventario, a la variable dependiente ROVR para las dos políticas de retorno de los productos que estudiamos en este trabajo. Lo primero que nos podría llamar la atención, es que como en el caso anterior, la dinámica de la cadena de suministro cerrada no se ve afectada por el controlador de inventario en la política 1, ya que siempre obtenemos el mismo valor para las tres entradas de la variable independiente. Por otro lado, en la política 2 si podemos observar diferentes resultados. Cuando el controlador de inventario toma valores mayores que uno se mejora de forma considerable el resultado del ROVR, siendo este incluso mejor que la para la política 1. En el caso en el que $T_i = 1$, es decir cuando la cadena sigue una política de reposición OUT, se obtiene un resultado peor que en el caso anterior, cuando $T_i > 1$. Obtenemos

estos resultados cuando $T_i = 1$, porque la variable que contiene las órdenes de producción necesarias está sujeta a una mayor variabilidad, ya que se anula el efecto suavizador del controlador de inventario; esto hecho sumado a que se les da preferencia a las órdenes de remanufactura sobre las de remanufactura resulta en unos peores valores del indicador ROVR. Como conclusión podemos resaltar que solo se produce una mejora de la dinámica de la cadena de suministro cerrada en la política 2 del ROVR cuando utilizamos la política de reposición POUT.

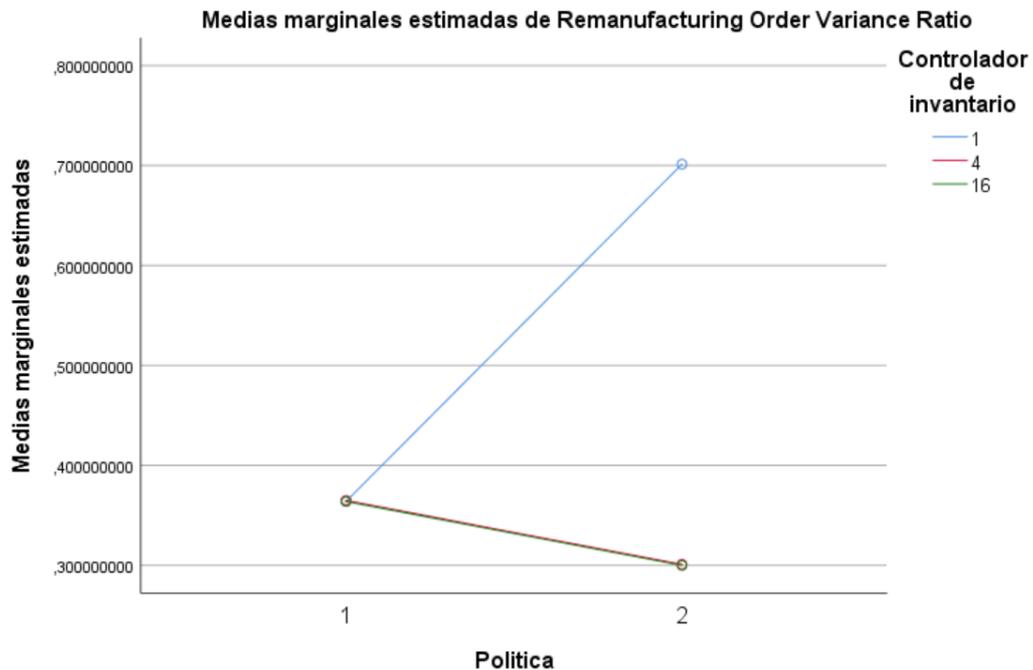


Ilustración 8. Análisis del ROVR y del controlador de inventario

4.3 Análisis del indicador: Inventory Variance Ratio

En el siguiente apartado se explicará cómo afectan las diferentes configuraciones de los parámetros escogidos, al indicador *Inventory Variance Ratio* a través de las diferentes gráficas presentadas a continuación. El IVR, como se ha comentado anteriormente, nos cuantifica el rendimiento de nuestro inventario, siendo mejor cuanto menor es el valor de este. En la siguiente tabla *Tabla 6* se observa que todas las variables e interacciones de variables independientes obtienen un valor de la significancia igual a 0, por lo que todas ellas tienen un efecto directo en nuestro parámetro. Siguiendo los resultados del factor F, el parámetro que afecta con mayor intensidad al IVR es el *lead time*. Aunque realmente los valores obtenidos del factor F para este indicador son bastante bajos comparándolo con los otros indicadores.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Inventory Variance Ratio		
Origen	F	Sig.
Política	739,115	0
Tasa retorno	440,703	0

Lead time	2379,722	0
Ti	283,269	0
Política * Tasa retorno	446,597	0
Política * Lead time	13,279	0
Política * Ti	31,255	0

Tabla 6. Resultados ANOVA: IVR

En el escenario de la política 1, como podemos observar en la gráfica *Ilustración 9*, con una tasa de retorno alta el IVR alcanza valores mucho más altos, que cuando la tasa de retorno es baja. Esto significa que cuando la tasa de retorno es baja se alcanza un nivel de servicio menor, que cuando esta es alta. Por otro lado, en la política 2 podemos observar que este indicador se muestra invariable a la configuración de la tasa de retorno, ya que obtenemos para ambos valores de μ_y el mismo resultado del IVR. Por lo que controlando el retorno de los productos podemos alcanzar mejores valores del nivel de servicio. La razón por la que la variación del indicador IVR en la política 2 es independiente a la configuración de la tasa de retorno, es que al solo retornar a la cadena de suministro los artículos estrictamente necesarios para cubrir la demanda, la variación del stock se reduce drásticamente, hasta llegar a ser independiente a la configuración de este parámetro.

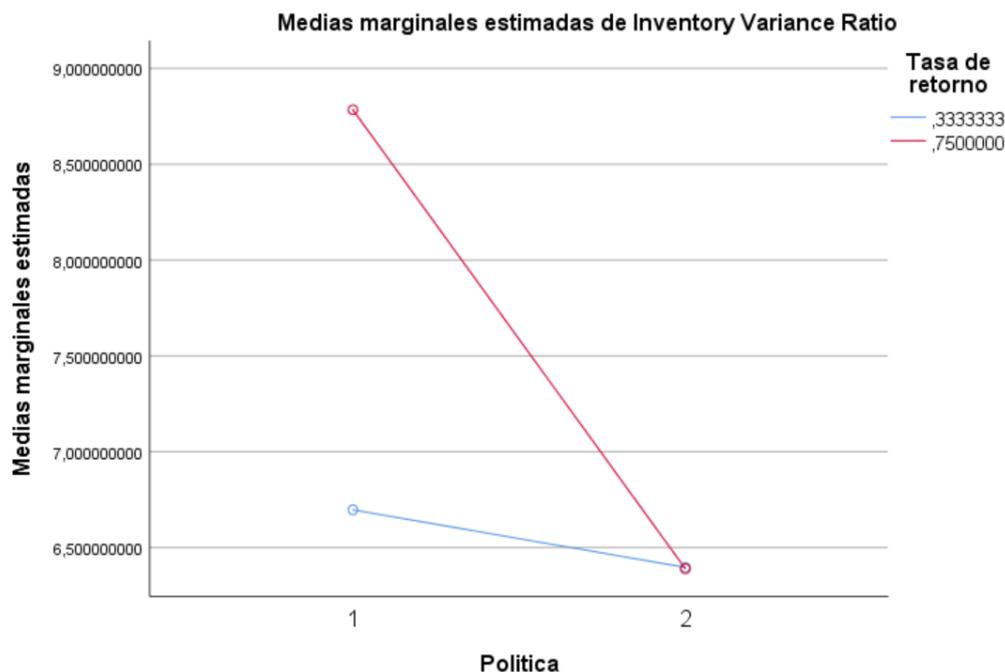


Ilustración 9. Análisis del IVR y de la tasa de retorno

En la gráfica *Ilustración 10* que se presenta a continuación vamos a analizar cómo afecta la configuración de *lead time* al indicador IVR. De forma general se observa que en la política 2 se obtienen mejores niveles de servicio que en la política 1, independientemente del *lead time* utilizado. Para las tres configuraciones del *lead time* la pendiente de mejora del IVR es la misma, obteniéndose un mejor nivel de servicio cuando *lead time*, toma un valor de 2 y un peor nivel de servicio cuando el *lead time* es igual a 6. La principal diferencia entre la

política 1 y 2, que causa esta mejora en los resultados, es que solo retornan a la cadena de suministro los artículos consumidos necesarios para cubrir la demanda, por lo que la variación del stock se reduce.

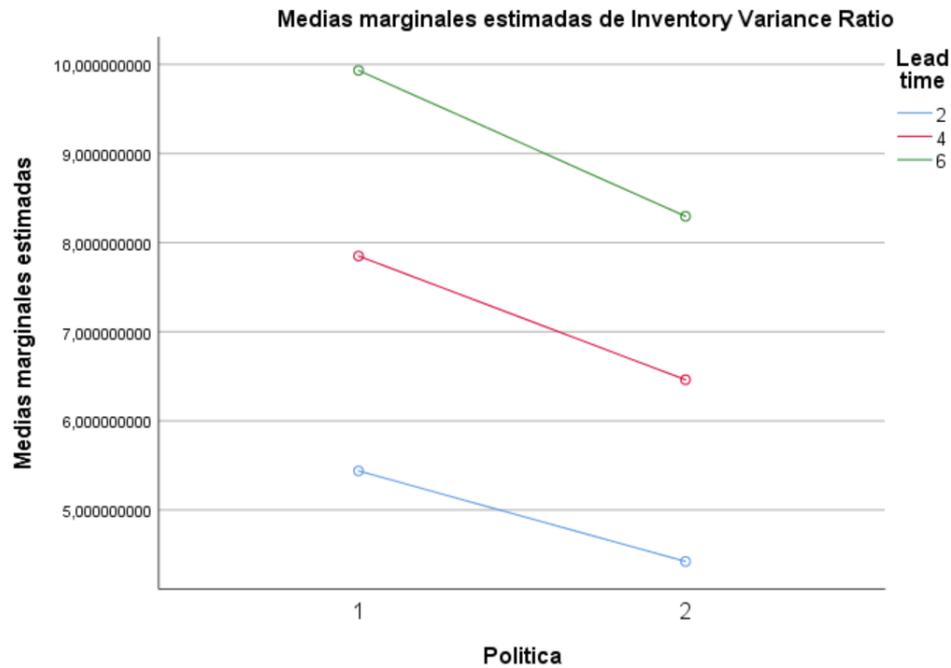


Ilustración 10. Análisis del IVR y del Lead Time

Por último, vamos a analizar la gráfica *Ilustración 11* que estudia la relación entre el IVR y la variable del controlador de inventario. De forma general podemos observar que hemos obtenido mejores resultados en la política 2, ya que para los tres posibles valores de T_i , el resultado del IVR es menor en la política de retorno tipo pull que en la política de retorno tipo push. En este caso llama la atención que cuanto mayor es el controlador de inventario peores resultados del IVR obtenemos, por lo que peor es el rendimiento del inventario. Este es un hecho típico en la política POUT que encontramos en diversos estudios sobre la dinámica de las cadenas de suministro cerradas como pueden ser (Ponte et al., 2021a, págs. 9-10) (Cannella et al., 2021). En cuanto a la mejora que experimenta el indicador cuando pasa de la política 1 a la 2, cabe destacar que la mayor reducción se experimenta cuando $T_i = 16$.

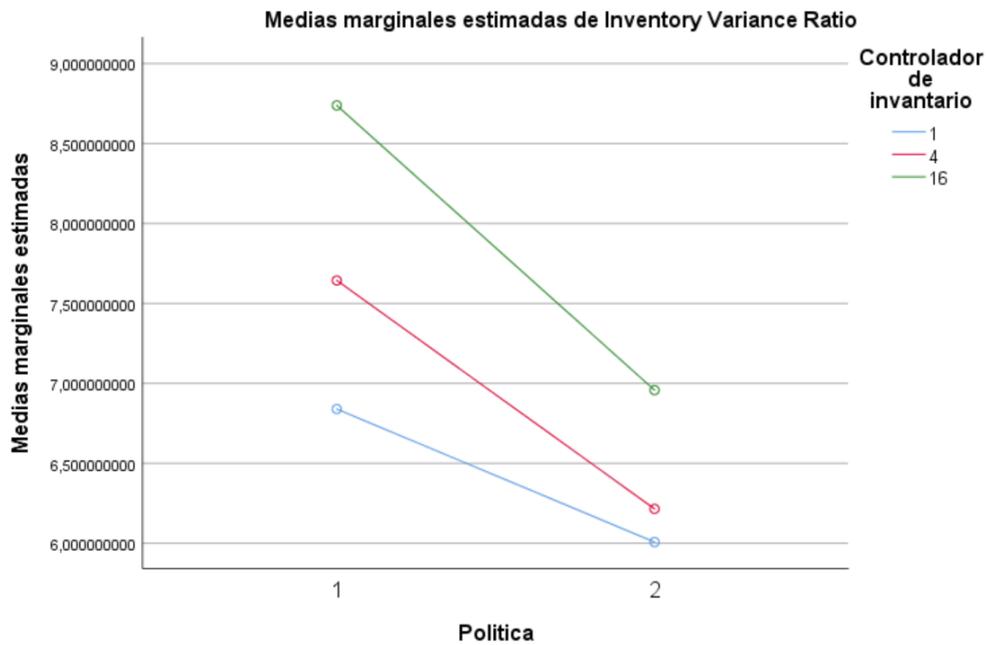


Ilustración 11. Análisis del IVR y del controlador de inventario

4.4 Análisis del indicador: Stock medio

En este apartado se analizará como afecta las diferentes configuraciones de los parámetros tasa de retorno, *lead time* y controlador de inventario, al indicador de rendimiento del stock medio, considerando los diferentes escenarios de las políticas de retorno de productos que estamos estudiando en este proyecto. En la siguiente tabla *Tabla 7* se observa, que al igual que para otros indicadores, la significancia es siempre igual a 0. Por lo tanto, podemos afirmar con un 95% de confianza que las medias son diferentes entre sí y que por lo tanto existe una interacción entre estas variables y el stock medio. Los parámetros que afectan en mayor medida al indicador del stock medio son la política, la tasa de retorno y la interacción entre estas dos últimas. A continuación, serán analizadas todas las gráficas que muestran la interacción entre la política y otro de los parámetros con el indicador del stock medio.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Origen	F	Sig.
Política	9708,988	0
Tasa retorno	9088,89	0
Lead time	29,278	0
Ti	221,86	0
Política * Tasa retorno	9087,113	0

Política * Lead time	31,551	0
Política * Ti	204,885	0

Tabla 7. Resultados ANOVA: Stock

En primer lugar, se puede observar en la siguiente gráfica *Ilustración 12*, que en la política 1 cuando la tasa de retorno es baja obtenemos un stock medio llamativamente más bajo que cuando la tasa de retorno es alta. Este resultado es razonable ya que en la política 1 están retornando todos los productos a la cadena de suministro, sin tener en cuenta la demanda. Por otro lado, en la política 2 el stock medio no se ve alterado por la configuración de la tasa de retorno, es decir, tanto como para una tasa de retorno alta como baja, obtenemos el mismo valor del stock medio. La justificación de este hecho se basa en que en esta ocasión solo retornan los productos estrictamente necesarios para cubrir la demanda. Basándonos en estos resultados, se puede determinar estudiando únicamente la variable del stock, que la política 2 mejora la dinámica de la cadena de suministro cerrada comparándola con la política 1.

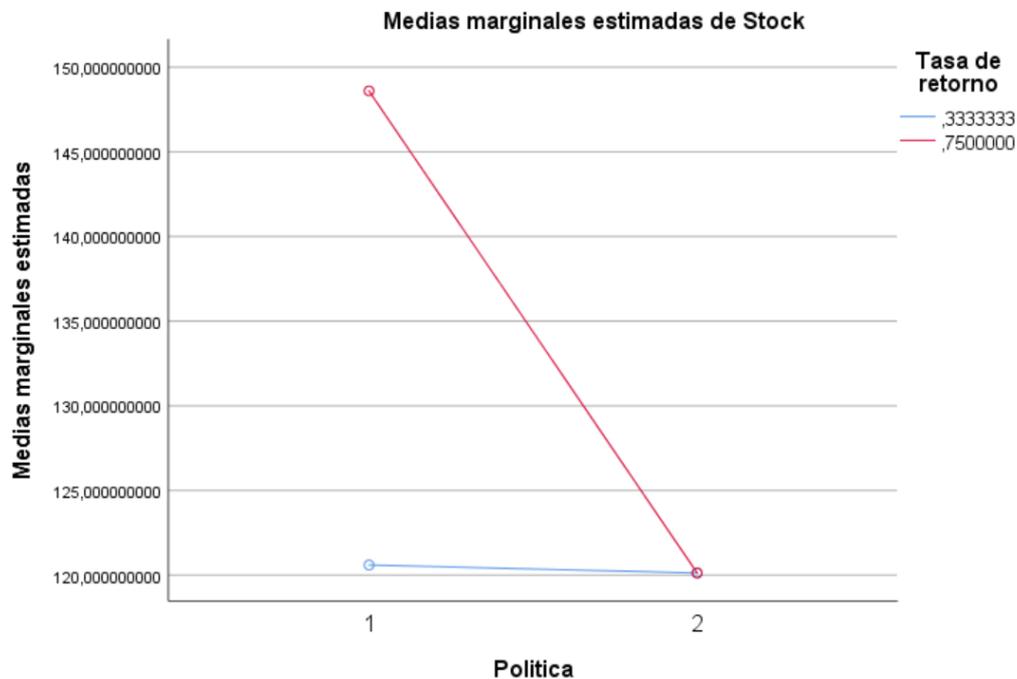


Ilustración 12. Análisis del Stock y de la tasa de retorno

En la gráfica *Ilustración 13* presentada a continuación, llama la atención en primer lugar la reducción del stock medio al pasar de la política 1, obteniendo valores entre 132-136, a la política 2, con un stock medio alrededor de 120 unidades de producto. En la política de retorno tipo push se puede observar una ligera diferencia para los tres *leads time* respecto al valor del stock medio, siendo este igual a 136 cuando el tiempo de fabricación es 6, 135 para un valor de 4 y por último, el stock medio alcanza aproximadamente unas 133 unidades cuando el *lead time* toma un valor de 2. En el caso de la política 2, apenas se aprecia diferencia de valores del indicador para las tres configuraciones de tiempo de entrega. Podemos concluir el análisis de este parámetro, afirmando que el valor del stock medio se ve beneficiado al tener en cuenta la demanda de los productos para aceptar o rechazar el retorno de los artículos y consumidos a la cadena de suministro cerrada.

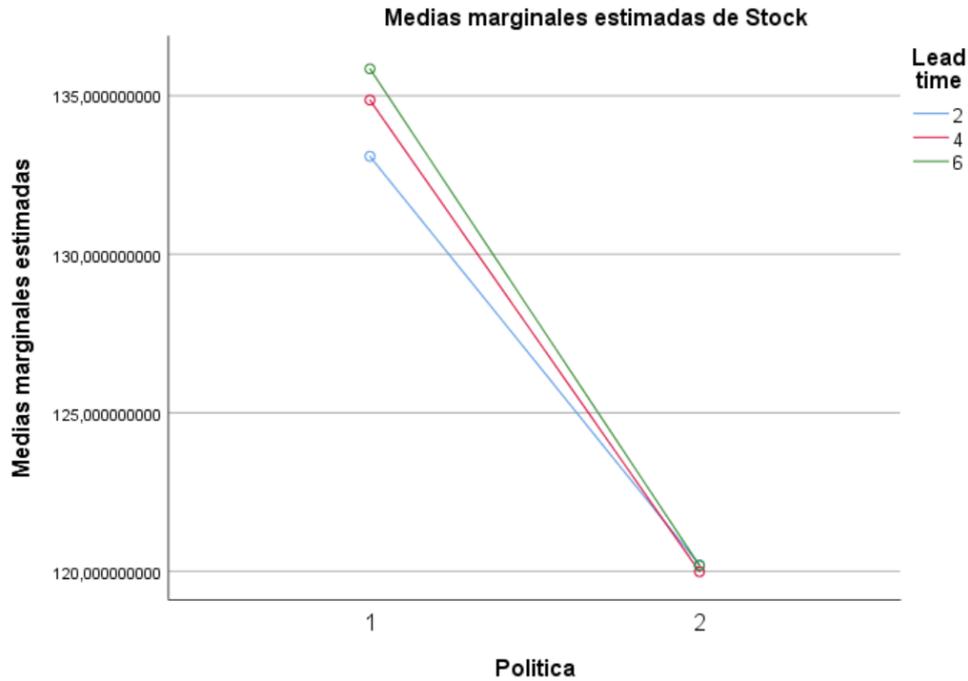


Ilustración 13. Análisis de Stock y de la tasa de retorno

A continuación, vamos a analizar como la afecta la configuración del controlador de inventario al stock medio de nuestra cadena de suministro cerrada. En la política 1, se observa que obtenemos un menor valor del stock medio cuando el controlador de inventario toma un valor igual a 4. Por otro lado, cuando el controlador de inventario vale 16, el stock medio de la cadena de suministro cerrada alcanza un valor de aproximadamente 130 unidades, el menor valor de las tres configuraciones. Si estudiamos la política 2, se reduce considerablemente el stock medio, tomando estos valores en torno a 120 para las tres configuraciones del controlador de inventario. Como conclusión, se puede afirmar que se consigue alcanzar un menor valor del stock medio en la política 2, debido al control que se ejerce sobre el retorno de los productos.

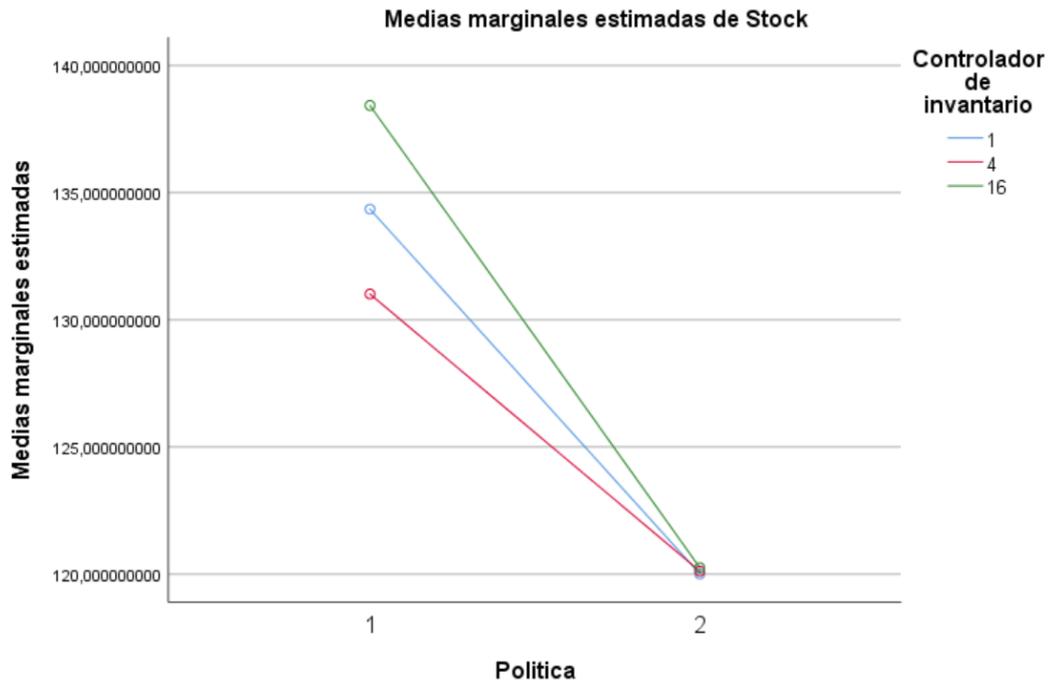


Ilustración 14. Análisis del Stock y del controlador de inventario

4.5 Análisis del indicador: Backlog

Por último, en este apartado se estudiará como afectan las diferentes configuraciones de los parámetros a estudiar al backlog, teniendo en cuenta las dos políticas de retorno de productos para una cadena de suministra cerrada. En la tabla *Tabla 8* se observa que no todos los parámetros afectan al backlog, ya que la significancia es $> 0,05$ para la política y para la interacción entre la política y la tasa de retorno, por lo tanto, no vamos a estudiar la gráfica que relaciona esta dos variables con nuestro indicador ya que no afecta a la dinámica de la cadena de suministro. En general se han obtenidos valores bajos del factor F, por lo que la repercusión de las diferentes configuraciones de los parámetros estudiados al backlog es muy baja.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Backlog		
Origen	F	Sig.
Política	0,619	0,432
Tasa retorno	40,951	0
Lead time	926,146	0
Ti	72,15	0
Política * Tasa retorno	34,232	0
Política * Lead time	0,251	0,778

Política * Ti 15,555 0

Tabla 8. Resultados ANOVA: Backlog

En la siguiente gráfica *Ilustración 15* se observa como alcanzamos el mayor valor del backlog en la política 1 con una tasa de retorno alta, ya que todos los productos retornan a la cadena de suministro sin tener en cuenta la demanda. Por otro lado, en la política 1, cuando la tasa de retorno es baja obtenemos el menor valor para el backlog. Cuando estudiamos la política 2, se observa un comportamiento totalmente diferente del backlog, obtenemos para las dos tasas de retorno valores muy similares del backlog. El control del retorno de los productos consumidos nos permite ofrecer un nivel de servicio más estable.

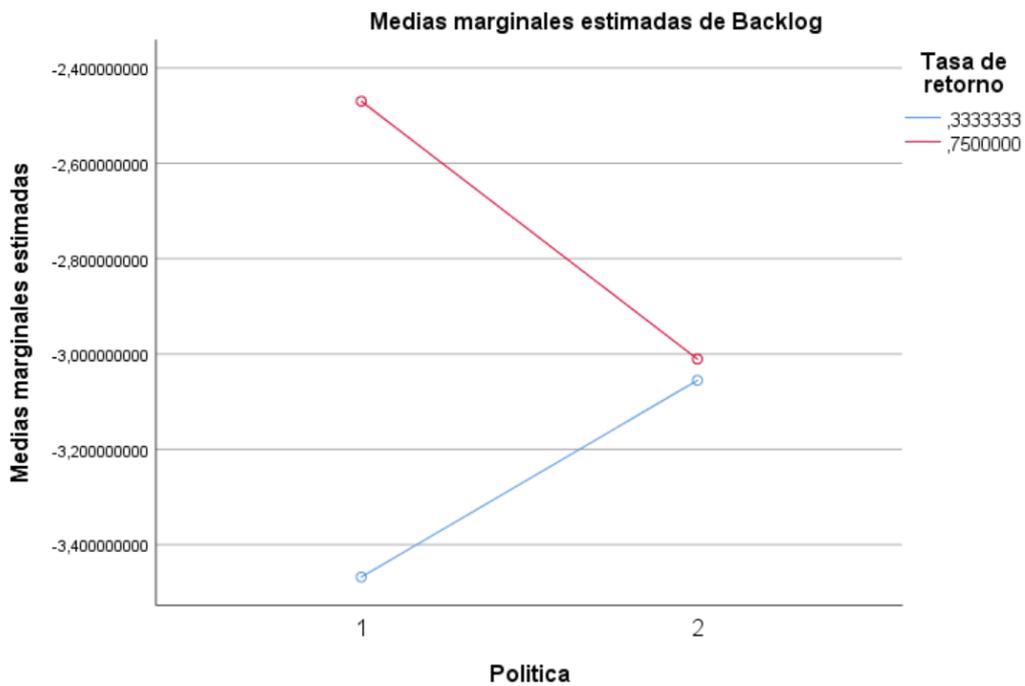


Ilustración 15. Análisis del Backlog y de la tasa de retorno

Por último, vamos a analizar cómo afecta la configuración del controlador de inventario. Para ambas políticas observamos que cuanto mayor es controlador de inventario, mayor es el backlog. Cuando el controlador de inventario vale 1, el valor del backlog aumenta en la política 2, por lo que empeora al pasar de la política de retorno tipo push a la de retorno tipo pull. En el caso en el que el controlador toma los valores 4 y 16 se un comportamiento opuesto, es decir se reduce el valor del backlog, por lo que se producen menos roturas de stock y el nivel de servicio es mayor.

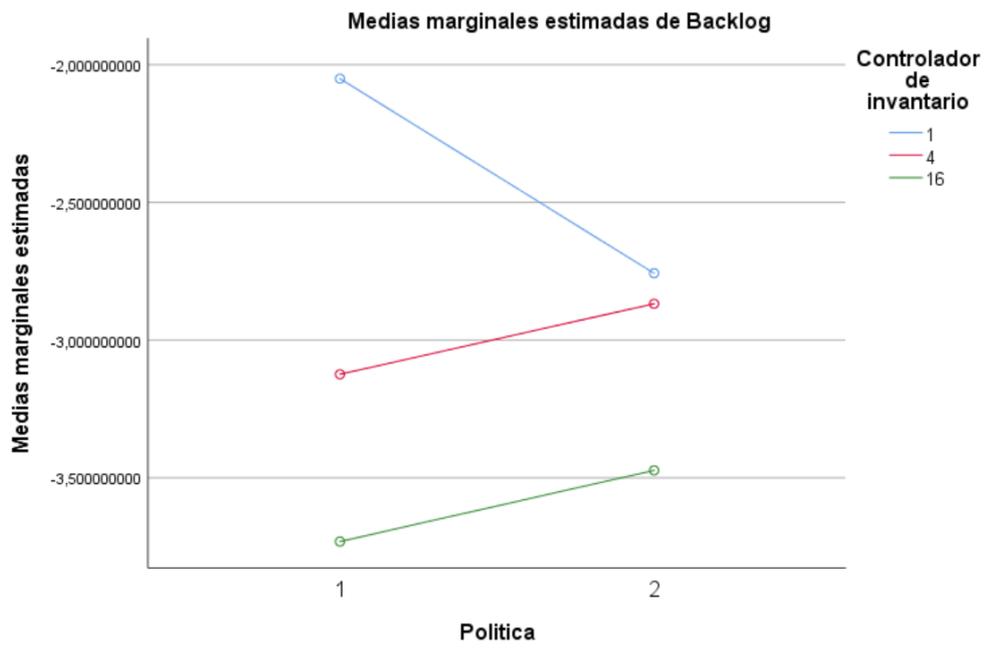


Ilustración 16. Análisis del Backlog y del controlador de inventario

5 CONCLUSIONES CLAVES

Por último, en este capítulo serán descritos los hallazgos encontrados durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Tras haber analizado los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se puede determinar que la política 2, es decir, la política de retorno tipo pull, produce una mejora general en la dinámica de la cadena de suministro cerrada, aunque existen algunas excepciones. Tanto el nivel de servicio, como la dinámica del inventario de la cadena de suministro cerrada se ven afectados positivamente, cuando hacemos uso de esta política tipo pull de retorno de los artículos. Para entrar más en detalle vamos a ver en que factores se ven beneficiados por la política del retorno tipo pull y cuáles no.

En primer lugar, se ha analizado el MOVR, que es un indicador que nos determina el nivel de efecto látigo que afecta a la cadena de suministro cerrada. Este indicador se ve siempre beneficiado al pasar de la política de retorno tipo push a la de retorno tipo pull. Ya sea cuando analizamos la relación con la tasa de retorno o con el *lead time*, la dinámica de la cadena de suministro se verá mejorada. Sin embargo, a la hora de evaluar la relación del MOVR con el controlador de inventario solo se aprecia una ligera mejora del funcionamiento de la cadena de suministro cerrada cuando $T_i = 1$, es decir, cuando utilizamos la política de reposición OUT.

Si tenemos en cuenta el indicador ROVR, la cadena de suministro cerrada no sufre una mejora de su dinámica como en el caso anterior, ya que al no retornar todos los productos de manera constante y controlar el retorno de estos, este sufre una mayor variabilidad. Cuando estudiamos como afecta la configuración de la tasa de retorno al ROVR al pasar de la política 1 a la 2, la dinámica de la cadena de suministro cerrada empeora, de igual forma que cuando tenemos en cuenta el *lead time*. Sin embargo, a la hora de investigar cómo afecta el controlador de inventario al ROVR, la dinámica de la cadena experimenta una mejora cuando hacemos uso de la política de reposición POUT, es decir cuando $T_i > 1$.

El IVR nos muestra como varía la dinámica del inventario. De forma general, es decir evaluando los tres parámetros claves: tasa de retorno, *lead time* y controlador de inventario, la dinámica de la cadena de suministro mejora de forma sustancial al pasar de la política de retorno tipo push a la de retorno tipo pull. En cuanto a la tasa de retorno, mejora tanto para el valor bajo como el alto, aunque lo hace con mayor efecto en este último. La mejora en el *lead time* se produce en la misma proporción en los tres posibles valores que toma este. Por último, los valores que muestra el controlador de inventario son mejores para la política 2 que para la política 1, donde se observa una mayor mejora de la dinámica de la cadena de suministro cerrada es en $T_i = 16$; sin embargo, cuando $T_i = 1$ se observa una mejora más leve.

Respecto a la evolución del stock medio, que mide también el nivel de servicio de la cadena de suministro cerrada, también se observa una mejora de la dinámica utilizando la política de retorno tipo pull, comparándola con la de retorno tipo push. Evaluando la tasa de retorno, la mayor mejora al pasar de la política 1 a la política 2, se da lugar cuando el valor medio de la tasa de retorno es alto. Por otro lado, la mejora de la dinámica de la cadena en la política de retorno controlado es muy similar para los tres valores estudiados del *lead time*. En el caso del controlador de inventario ocurre lo mismo que para el *lead time*, aunque es esta ocasión la diferencia de mejora entre los tres valores de T_i es un poco mayor, obteniéndose una mayor mejora cuando $T_i = 16$, al igual que para el IVR.

Por último, en cuanto al backlog, en esta ocasión solo se tienen en cuenta los parámetros: tasa de retorno y controlador de inventario, ya que solo los resultados de estos han ofrecido una significancia igual a cero, es decir para los resultados del *lead time* no se ha podido demostrar que exista una diferencia entre los valores de las medias con una confianza mayor al 95%. En este caso no se observa una mejora clara al pasar de la política 1 a la 2. Por ejemplo, en el caso de la tasa de retorno, la dinámica de la cadena de suministro sufre una mejora cuando la media de la tasa de retorno es un tercio, pero empeora cuando la media de la tasa de retorno es igual a tres cuartos. Si analizamos como varía el *lead time* a penas se pueden observar cambios en la dinámica de la cadena de suministro al pasar de la política de retorno tipo push a la de retorno tipo pull. Hay que remarcar que tanto para la tasa de retorno como el *lead time*, los valores del factor F son muy bajos, por lo que la influencia de la configuración de estos parámetros al backlog es muy reducida.

Para finalizar este trabajo de investigación, me gustaría añadir que esta investigación está delimitada por una demanda estacionaria, por lo que sería interesante investigar cómo responde la dinámica de la cadena de suministro cerrada ante una demanda estacional. La demanda estacional se caracteriza porque esta se concentra en uno o varios períodos concretos del año, algunos ejemplos de productos que tienen esta demanda son los mantecados o los bañadores. Otro factor que sería interesante investigar, es la limitación del almacén “stock de recuperados” ya que esta configuración se acerca más a la que podemos encontrar en la industria. Al limitar este parámetro habría que estudiar nuevamente cual sería la mejor configuración de la política de retorno de los productos, ya que no tendríamos disponible de forma ilimitada todos los productos que han sido recuperados.

REFERENCIAS

- Axsäter, S. (2005). Supply Chain Operations: Serial and Distribution Inventory Systems. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 11, 525-559.
- B. Ponte, R. D. (2021a). The implications of batching in the bullwhip effect and customer service of. *International Journal of Production Economics*, 1-2.
- B. Ponte, R. D. (2021b). Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains: the dynamic effects of inventory controllers. *International Journal of Production Research*, 1-4.
- Costantino, F. D. (2013). Information sharing policies based on tokens to improve supply chain performances. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 133-160.
- Dejonckheere, J. D. (2003). Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, 567-590.
- Desconocido. (2019, Septiembre 19). *Mecalux Esmena*. Retrieved from <https://www.mecalux.es/blog/efecto-latigo-bullwhip-effect>
- Desconocido. (2021, Junio 15). *Mecalux Esmena*. Retrieved from <https://www.mecalux.es/blog/nivel-de-servicio#:~:text=Qu%C3%A9%20es%20el%20nivel%20de,suficiente%20para%20abastecer%20la%20demanda>.
- Deziel, D. E. (1967). A linear production-inventory control rule. *Production Engineer*, 4, 93.
- Estaún, M. (2021, Julio 7). *IEBSCHOOL*. Retrieved Octubre 5, 2022, from <https://www.iebschool.com/blog/cadena-gestion-suministro-negocios-internacionales/>
- Goltsos T. E., S. A. (2019). Forecasting for remanufacturing: The effects of serialization. *Journal of Operations Management*, 65(5), 447-467.
- Hosoda, T. D. (2008). A unified theory of the dynamics of closed-loop supply. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 313-326.
- J.D. Blackburn, V. G. (2004). Reverse supply chains for commercial returns. *California Management Review*, 6-22.
- M. Fleischmann, P. B.-R. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10, 156-173.
- Parker, D. R. (2015). *Remanufacturing Market Study*. Aylesbury, UK: European. Retrieved from <https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf>
- Roldán, P. N. (n.d.). *Economipedia*. Retrieved Octubre 5, 2022, from <https://economipedia.com/definiciones/cadena-de-suministro.html>
- S. Cannella, B. P. (2021). Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains: the dynamic effects of inventory controllers. *International Journal of Production Research*, 3323-3337.
- Souza, G. C. (2012). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research. *Decision Sciences*, 7-38.
- Tang, O. N. (2004). The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system. *International Journal of Production Research*, 4135-4152.
- Teunter, R. S. (2011). Intermittent demand: linking forecasting to inventory obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 606-615.
- TIBCO. (s.f.). Retrieved from ¿Qué es Análisis de la Varianza (ANOVA)?: [https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-analysis-of-variance-anova#:~:text=An%C3%A1lisis%20de%20la%20Varianza%20\(%20ANOVA%20\)%20es%20una%](https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-analysis-of-variance-anova#:~:text=An%C3%A1lisis%20de%20la%20Varianza%20(%20ANOVA%20)%20es%20una%20)

20f%C3%B3rmula%20estad%C3%ADstica%20que,medias%20de%20los%20diferentes%20grupos.

V.D.R. Guide Jr., T. H. (2003). The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. *Interfaces*, 3-6.

V.D.R. Guide Jr., V. J. (2003). Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery. *Journal of Operations Management*, 259-279.

5.1 Código: Política de retorno tipo push

```
%Declaración de los arrays
simulation_time=2000;
numero_replicas=15;
warm_up=500;
mc=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de manufactura completadas
mo=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de manufactura
rc=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de remanufactura completadas
ro=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de remanufactura
is=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock inicial
ns=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock
d=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Demanda
z=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Variable auxiliar de demanda
y=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Variable auxiliar de la tasa de retorno
r=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Retorno
w=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes en progreso
mr=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Requisitos de manufactura
d_t=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Predicción de la demanda
ss=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock de seguridad
t_w=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Objetivo de órdenes en progreso
MOVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Manufacturing Order Variance Ratio
IVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Inventory Variance Ratio
ROVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Remanufacturing Order Variance Ratio
media_ns=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock medio
bl=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Backlog
media_bl=zeros(numero_replicas,simulation_time); %bl medio

% Definición de tiempos de procesos
Tm=6; % Tiempo de manufactura
Tr=6; % Tiempo de remanufactura
Tc=16; % Tiempo de consumición o de uso de los productos

% Parámetros estocásticos
mean1= 120; % Media de la demanda
sigma1= 30; % Desviación típica de la demanda

alpha= 43.7; % Parámetro alpha de distribución beta
beta= 14.57; % Parámetro beta de distribución beta

% Parámetros de decisión del modelo
alpha_demand= 0.1;
ssf= 1;
Ti=16;
Tw=Ti;
muy=alpha/(alpha+beta); %Fórmula beta
Tp=((1-muy)*Tm)+(muy*Tr); %Fórmula Tp

for c=1:numero_replicas
    for t=1:simulation_time

        % Etapa de recepción
        if(t>Tm+1) %Si Tm y Tr son iguales
            mc(c,t)= mo(c,t-(Tm+1));
```

```

        rc(c,t)= ro(c,t-(Tr+1));
    end

    if(t>1)
        is(c,t)= ns(c,t-1)+ mc(c,t) + rc(c,t);
    end

    % Etapa de servicio
    x= makedist('Normal', mean1, sigma1);
    z(c,t)=random(x);
    d(c,t)= max(z(c,t),0);
    if(t>1)
        if(is(c,t)>=d(c,t)-bl(c,t-1))
            ns(c,t)= is(c,t)-d(c,t)+bl(c,t-1);
            bl(c,t)=0;
        else
            bl(c,t)=is(c,t)-d(c,t)+bl(c,t-1);
            ns(c,t)=0;
        end
    end
    end
    s= makedist('Beta','a', alpha,'b',beta);
    y(c,t)=random(s);
    if(t>Tc)
        r(c,t)=y(c,t)*d(c,t-Tc);
    end
    if(t>1)
        w(c,t)=w(c,t-1)+(mo(c,t-1)-mc(c,t))+(ro(c,t-1)-rc(c,t));
    end

    % Etapa de suministro
    ro(c,t)=r(c,t);
    if(t>1)
        d_t(c,t)= alpha_demand*d(c,t)+(1-alpha_demand)*d_t(c,t-1);
    end
    ss(c,t)=ssf*d_t(c,t);
    t_w(c,t)=Tp*d_t(c,t);
    mr(c,t)=max((d_t(c,t)-rc(c,t))+(1/Ti)*(ss(c,t)-ns(c,t))+(1/Tw)*(t_w(c,t)-
w(c,t)),0);
    mo(c,t)=mr(c,t);

    end
    MOVR(c)=var(mo(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
    ROVR(c)=var(ro(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
    IVR(c)=var(ns(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
    media_ns(c)=mean(ns(c,warm_up:end));
    media_bl(c)=mean(bl(c,warm_up:end));
end

MOVR_final=mean(MOVR);
ROVR_final=mean(ROVR);
IVR_final=mean(IVR);
ns_final=mean(media_ns);
backlog_final=mean(media_bl);

```

5.2 Código: Política de retorno tipo pull

```
%Declaración de los arrays
simulation_time=2000;
numero_replicas=15;
warm_up=500;
mc=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de manufactura completadas
mo=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de manufactura
rc=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de remanufactura completadas
ro=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de remanufactura
is=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock inicial
ns=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock
d=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Demanda
z=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Variable auxiliar de demanda
y=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Variable auxiliar de la tasa de retorno
r=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Retorno
w=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes en progreso
on=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Órdenes de producción necesarias
d_t=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Predicción de la demanda
ss=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock de seguridad
t_w=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Objetivo de órdenes en progreso
MOVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Manufacturing Order Variance Ratio
IVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Inventory Variance Ratio
ROVR=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Remanufacturing Order Variance Ratio
isr=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock inicial de recuperados
sr=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock recuperados
media_ns=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Stock medio
bl=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Backlog
media_bl=zeros(numero_replicas,simulation_time); %Backlog medio

% Definición de tiempos de procesos
Tm=6; % Tiempo de manufactura
Tr=6; % Tiempo de remanufactura
Tc=16; % Tiempo de consumición o de uso de los productos

% Parámetros estocásticos
mean1= 120; % Media de la demanda
sigma1= 30; % Desviación típica de la demanda

alpha= 43.7; % Parámetro alpha de distribución beta
beta= 14.57; % Parámetro beta de distribución beta

% Parámetros de decisión del modelo
alpha_demand= 0.1;
ssf= 1;
Ti=16;
Tw=Ti;
muy=alpha/(alpha+beta); %Fórmula beta
Tp=((1-muy)*Tm)+(muy*Tr); %Fórmula Tp

for c=1:numero_replicas
    for t=1:simulation_time

        %Etapa de recepción
        if(t>Tm+1) %Si Tm y Tr son iguales
            mc(c,t)=mo(c,t-(Tm+1));
            rc(c,t)=ro(c,t-(Tr+1));
```

```

        end

        if(t>1)
            is(c,t)=ns(c,t-1)+mc(c,t)+rc(c,t);
        end

% Etapa de servicio
x=makedist("Normal", mean1, sigma1);
z(c,t)=random(x);
d(c,t)=max(z(c,t),0);

if(t>1)
    if(is(c,t)>=d(c,t)-bl(c,t-1))
        ns(c,t)=is(c,t)-d(c,t)+bl(c,t-1);
        bl(c,t)=0;
    else
        bl(c,t)=is(c,t)-d(c,t)+bl(c,t-1);
        ns(c,t)=0;
    end
end

s=makedist("Beta", "a", alpha, "b", beta);
y(c,t)=random(s);

if(t>Tc)
    r(c,t)=y(c,t)*d(c,t-Tc);
end

if(t>1)
    w(c,t)=w(c,t-1)+(mo(c,t-1)-mc(c,t))+(ro(c,t-1)-rc(c,t));
    isr(c,t)=sr(c,t-1)+r(c,t);
end

% Etapa de suministro

if(t>1)
    d_t(c,t)=alpha_demand*d(c,t)+(1-alpha_demand)*d_t(c,t-1);
end

ss(c,t)=ssf*d_t(c,t);
t_w(c,t)=Tp*d_t(c,t);
on(c,t)=max((d_t(c,t))+((1/Ti)*(ss(c,t)-ns(c,t)))+((1/Tw)*(t_w(c,t)-w(c,t))),0);

if(on(c,t)<=isr(c,t))
    ro(c,t)=on(c,t);
    sr(c,t)=isr(c,t)-on(c,t);
    mo(c,t)=0;
else
    ro(c,t)=isr(c,t);
    sr(c,t)=0;
    mo(c,t)=on(c,t)-ro(c,t);
end

end

MOVR(c)=var(mo(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
ROVR(c)=var(ro(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
IVR(c)=var(ns(c,warm_up:end))/var(d(c,warm_up:end));
media_ns(c)=mean(ns(c,warm_up:end));

```

```
media_bl(c)=mean(bl(c,warm_up:end));  
end
```

```
MOVR_final=mean(MOVR);  
ROVR_final=mean(ROVR);  
IVR_final=mean(IVR);  
ns_final=mean(media_ns);  
backlog_final=mean(media_bl);
```