

Modelado y simulación de un sistema de reposición de inventarios bajo demanda incremental constante

Dany José Cárdenas-Romay ¹
Universidad de América
cardenasromay@gmail.com

Andrés Mauricio Navarrete Ramos ²
Universidad Surcolombiana
andres.navarrete@usco.edu.co

Fecha de recepción: 30 de octubre de 2023
Fecha de aprobación: 12 de diciembre de 2023



Cómo citar este artículo: Cárdenas-Romay, D.J.; Navarrete Ramos, A.M. (2023). Modelado y simulación de un sistema de reposición de inventarios bajo demanda incremental constante. *Revista Ontare*, 11, (páginas). DOI:

Resumen

La gestión efectiva de inventarios representa un componente vital para asegurar una operación continua y sin interrupciones en cualquier empresa. En situaciones donde la demanda se mantiene constante a lo largo del tiempo, la necesidad de contar con un sistema de gestión de inventarios que logre mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda es aún más crucial. Este estudio se centró en el desarrollo y la simulación de un modelo de reposición de inventarios diseñado específicamente para adaptarse a una demanda incremental constante. Utilizando ecuaciones diferenciales como herramienta principal, se construyó un modelo que no solo considera la demanda, sino también los flujos de reposición de inventario en función de la cantidad óptima que minimiza los costos (ROQ), además de tener en cuenta otros factores críticos, como el tiempo de entrega y el punto de reorden (ROP). Para evaluar la efectividad del modelo, se llevó a cabo una simulación exhaustiva utilizando las herramientas Simulink y Vensim en diversos escenarios y con diferentes parámetros. Los resultados revelaron que el modelo propuesto es altamente eficiente en la gestión de la demanda, evitando eficazmente la falta de inventario.

Palabras clave: modelado; simulación; inventarios; ecuaciones diferenciales; cantidad económica del pedido.

¹ Ingeniero Químico. Universidad del Zulia, Venezuela. Magíster en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá - Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2041-0846>

² Administrador de Empresas. Universidad Surcolombiana, Colombia. Especialista en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo. Universidad ECCI, Colombia. Magíster en Ingeniería con Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - ITESM, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4050-2454>

1. Introducción

La gestión de inventarios es una pieza fundamental en la operación de cualquier empresa, ya que tiene un impacto directo en su eficiencia operativa y su capacidad para satisfacer de manera continua la demanda del mercado (Bancroft y Li, 2021). En situaciones donde la demanda se mantiene constante y no presenta variaciones significativas a lo largo del tiempo, la gestión de inventarios sigue siendo esencial para asegurar que los productos estén disponibles de manera consistente y que los niveles de inventario estén optimizados. En este contexto, es crucial contar con un sistema de reposición de inventario que mantenga un equilibrio constante entre la oferta y la demanda, garantizando una operación sin interrupciones y una satisfacción continua de los clientes (Muller, 2019; Stadtler, 2014).

Este estudio se centra en abordar el desafío específico de desarrollar y simular un modelo de reposición de inventarios adaptado a una demanda constante. Utilizando herramientas de modelado matemático, como ecuaciones diferenciales, se ha creado un modelo que tiene en cuenta la estabilidad de la demanda a lo largo del tiempo, así como los costos asociados con el almacenamiento y los asociados a emitir una orden. Además, se consideran factores esenciales como el tiempo de entrega y el nivel óptimo de inventario que minimiza los costos. A través de una simulación exhaustiva utilizando las plataformas Simulink y Vensim, este estudio evalúa cómo se comporta el modelo propuesto en diversos escenarios y condiciones, proporcionando una comprensión profunda de su eficacia en la gestión de inventarios en entornos con demanda constante.

2. Modelos de inventarios

2.1. Modelos de inventario

La gestión eficiente de inventarios es un aspecto fundamental de la logística y la cadena de suministro en cualquier empresa o industria. Los modelos de inventario desempeñan un papel esencial en la toma de decisiones relacionadas con la cantidad óptima de productos o materiales que una organización debe mantener en *stock* para satisfacer la demanda del mercado, mientras se minimizan los costos asociados con el almacenamiento, la adquisición

y la escasez de inventario (Barnes, 2018). Esta teoría de modelos de inventario es una disciplina que combina conceptos matemáticos y económicos, para ayudar a las empresas a tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus existencias.

En la teoría de modelos de inventario, un enfoque central es la minimización de costos, considerando diversos componentes clave de los costos de inventario (Flores y Clay-Whybark, 1986). El costo de adquisición, que representa el desembolso directo para comprar productos, se gestiona estratégicamente mediante la teoría de inventario para determinar cuándo y cuánto ordenar, buscando así minimizar estos costos asociados a la adquisición de inventario. Además, el costo de almacenamiento, que abarca gastos relacionados con espacio, seguro, personal y otros recursos, es crucial en la teoría de inventario, que se esfuerza por hallar un equilibrio óptimo entre este costo y el de escasez, vinculado a pérdidas de ventas y clientes debido a la falta de existencias. Asimismo, se debe tener en cuenta el costo de oportunidad, ya que el dinero invertido en inventario no está disponible para otras inversiones, generando un costo adicional al mantener recursos financieros inmovilizados.

Los modelos de gestión de inventarios se clasifican según el tipo de pronóstico de la demanda, pudiendo distinguirse entre aquellos diseñados para gestionar la demanda dependiente e independiente. En términos de demanda independiente, los modelos clásicos deterministas de inventario se dividen generalmente en dos categorías principales: modelos de cantidad de pedido fija (EOQ, por sus siglas en inglés) y modelos de punto de reorden. Estos modelos se basan en supuestos claves sobre la demanda, la tasa de reposición y la variabilidad, siendo esenciales para optimizar la gestión de inventario y minimizar costos asociados (Harrison *et al.*, 2019).

El modelo de cantidad de pedido fija (EOQ) busca determinar la cantidad óptima que una organización debe pedir en cada reposición para minimizar los costos totales de inventario. Se basa en supuestos como la demanda constante y conocida, costos constantes de adquisición y almacenamiento, y la ausencia de escasez (Benids, 2020).

Por otro lado, los modelos de punto de reorden se centran en cuándo volver a ordenar

inventario. Cuando el nivel de inventario alcanza un punto de reorden predeterminado, se coloca un pedido de reposición. Estos modelos son útiles en situaciones donde la demanda es variable y no se puede prever con precisión (Slack y Brandon-Jones, 2019).

Además de la EOQ y los modelos de punto de reorden, existen numerosas variantes y extensiones de estos modelos básicos para abordar situaciones más complejas. Algunos ejemplos incluyen la introducción de descuentos por cantidad, plazos de entrega inciertos, tasas de deterioro de inventario y modelos multinivel que consideran múltiples niveles de la cadena de suministro.

La tecnología ha transformado la gestión de inventarios a lo largo de los años. Los sistemas de *software* de gestión de inventarios (como el sistema ERP) permiten a las empresas automatizar gran parte del proceso de seguimiento y gestión de inventarios, lo que mejora la precisión y la eficiencia.

3. Análisis bibliométrico del modelado y la simulación de sistemas de inventario

El estudio del modelado y la simulación de sistemas de reposición de inventario ha sido una temática recurrente en la literatura científica. En este análisis bibliométrico, examinamos la distribución, frecuencia y relevancia de los trabajos publicados relacionados con este tema específico.

3.1. Tendencia global

Para comprender la evolución de este campo, es esencial analizar su desarrollo a lo largo del tiempo. Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos académicas, haciendo uso de una herramienta innovadora llamada Research Rabbit. Esta herramienta, basada en inteligencia artificial, fue empleada con el propósito de agilizar y optimizar el proceso de búsqueda bibliométrica.

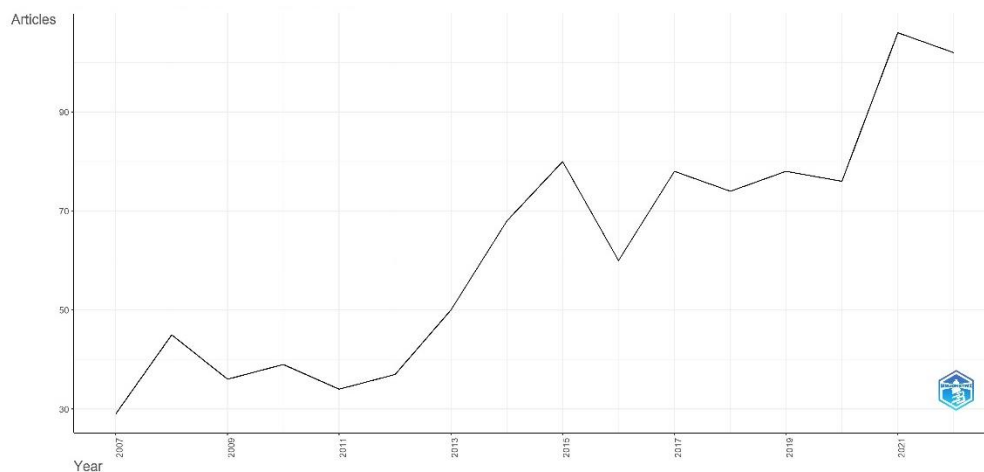
En el enfoque de búsqueda utilizado se seleccionaron las palabras clave: *replacement, inventory, modeling, system*, junto con el operador booleano *And* para obtener resultados

precisos y relevantes. Esta búsqueda se extendió más allá de una sola fuente de información, abarcando bases de datos académicas de renombre como Scopus y Web of Science. A través de esta estrategia amplia, se logró recopilar una amplia gama de publicaciones académicas relacionadas con sistemas de reposición de inventarios.

Durante el proceso de búsqueda exhaustiva, se identificaron un total de 992 artículos publicados en el periodo comprendido entre 2007 y 2022 que se relacionan directamente con el campo de estudio de sistemas de reposición de inventarios. Este enfoque meticuloso de recopilación de literatura proporcionó a los investigadores una visión sólida y completa de la investigación en sistemas de reposición de inventario a lo largo de los últimos años. Además, permitió analizar y sintetizar una gran cantidad de información relevante, lo que es fundamental para comprender las tendencias emergentes, los avances y las áreas clave de interés en este campo en constante evolución.

A partir de la búsqueda se identificó un incremento sostenido de la producción de artículos relacionados al modelamiento de sistemas de reposición de inventarios, como se puede observar en la figura 1.

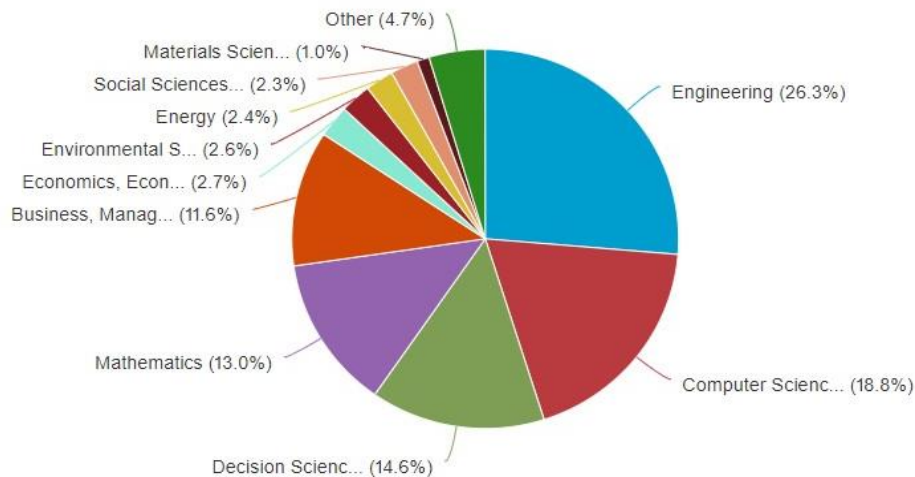
Figura 1. Producción científica anual



Fuente. Biblioshiny.

Al analizar detenidamente estas publicaciones según sus áreas de conocimiento, se observó que las investigaciones principales se concentran en campos como la ingeniería, las ciencias computacionales, la ciencia aplicada a la toma de decisiones y las matemáticas, como se refleja claramente en la figura 2.

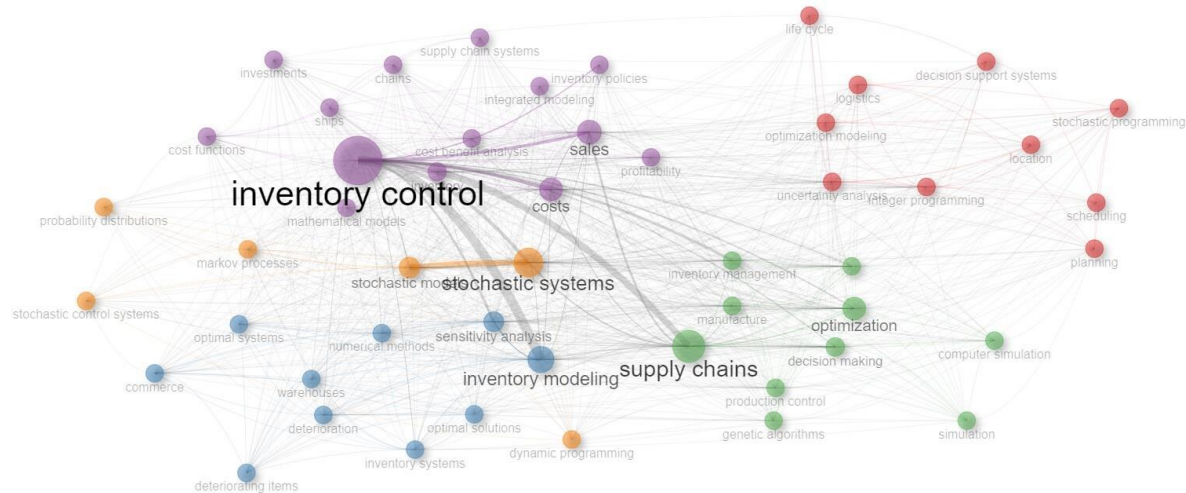
Figura 2. Producción de artículos por áreas de conocimiento



Fuente. Base de datos Scopus.

Los resultados de la búsqueda revelaron que las principales tendencias en investigación dentro del ámbito de los sistemas de reposición de inventarios se centran en cuatro áreas fundamentales: el control de inventario, la gestión de cadenas de suministro y la toma de decisiones, así como también el modelado de inventarios y la aplicación de métodos estocásticos. Estas áreas emergen claramente como las más destacadas en la figura 3. La atención hacia el control de inventario y la optimización de la cadena de suministro refleja la creciente importancia de la eficiencia operativa en el entorno empresarial actual. Además, el modelado de inventario y la utilización de enfoques estocásticos han ganado relevancia debido a la necesidad de lidiar con la incertidumbre en las demandas y los tiempos de entrega. Estas tendencias indican una sólida dirección de investigación en la que los académicos y profesionales del campo de la gestión de inventarios están enfocando sus esfuerzos para abordar desafíos contemporáneos y mejorar la toma de decisiones en este ámbito crítico.

Figura 3. Red bibliométrica de términos más frecuentes y relevantes

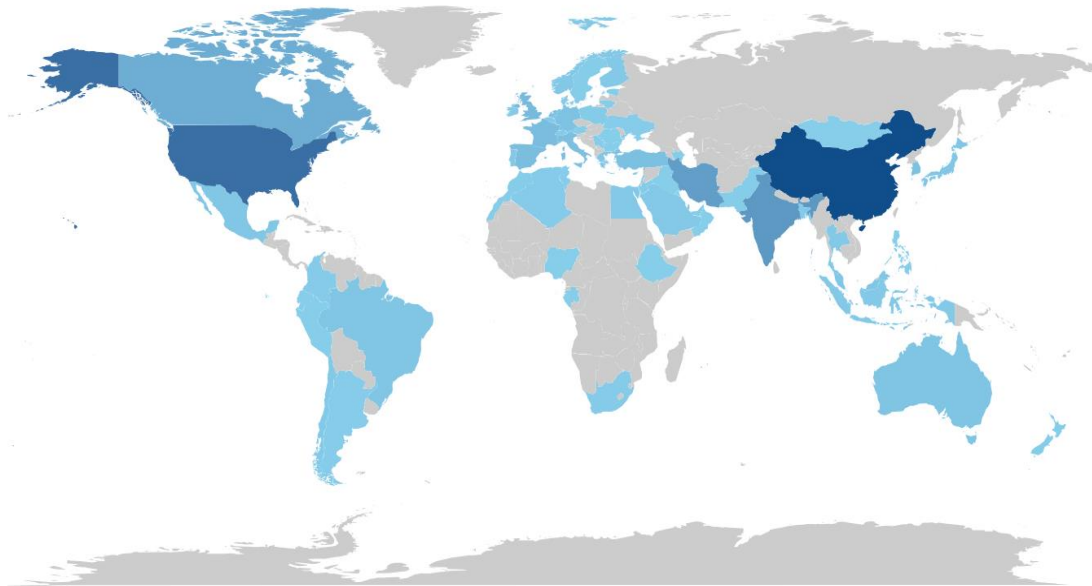


Fuente. Biblioshiny.

3.2. Distribución geográfica

La investigación en este campo se ha distribuido geográficamente de manera significativa. Asia y Norteamérica destacan como las regiones con un mayor número de publicaciones en este ámbito. En particular, países como China, Estados Unidos y la India han liderado en la producción de investigaciones relacionadas con modelamiento de sistemas de reposición de inventarios. No obstante, también se observa un incremento en investigaciones provenientes de países emergentes en Sudamérica y Oceanía, lo que indica una expansión geográfica del interés en el tema.

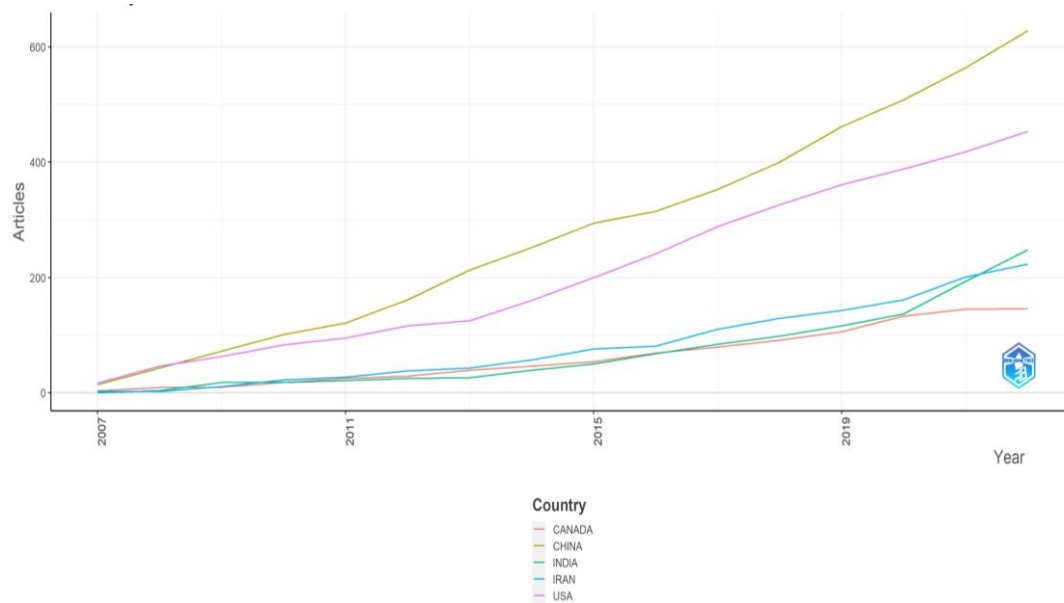
Figura 4. Distribución geográfica según el número de publicaciones



Fuente. Biblioshiny.

La figura 5 presenta la evolución temporal de los países más prominentes en cuanto a la producción de estas publicaciones.

Figura 5. Producción de artículos por países durante el periodo 2007-2022

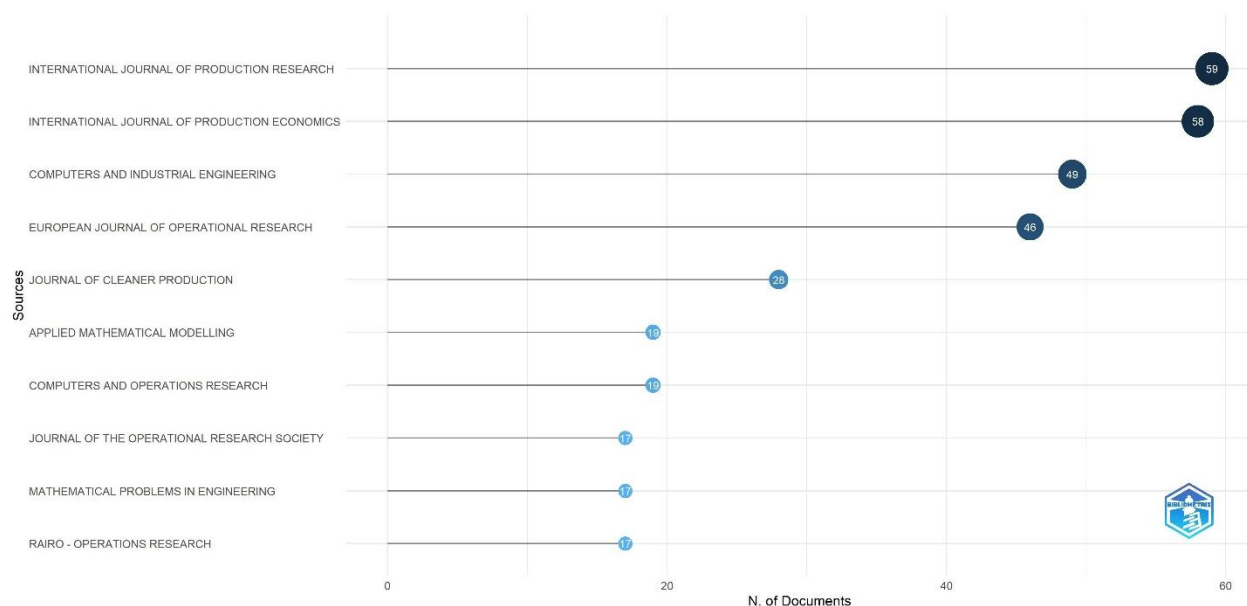


Fuente. Biblioshiny.

3.3. Principales revistas

Un aspecto crítico en el análisis bibliométrico radica en la identificación de las revistas más influyentes en este campo. Las publicaciones académicas desempeñan un papel fundamental en la diseminación del conocimiento y la promoción de debates en la comunidad científica. Entre las revistas más prominentes en esta área se encuentran el “International Journal of Production Research”, que ha publicado un total de 59 investigaciones relevantes, el “International Journal of Production Economics” con 58 publicaciones destacadas, y el “Computers and Industrial Engineering”, que ha contribuido con 49 artículos significativos. Como se aprecia en la figura 6, estas revistas sobresalen por su cantidad de publicaciones. La concentración de investigaciones en estas fuentes de información sugiere que son recursos fundamentales para aquellos que desean profundizar en el estudio del modelado y la simulación de sistemas de reposición de inventario en el contexto de demandas cíclicas.

Figura 6. Revistas más relevantes

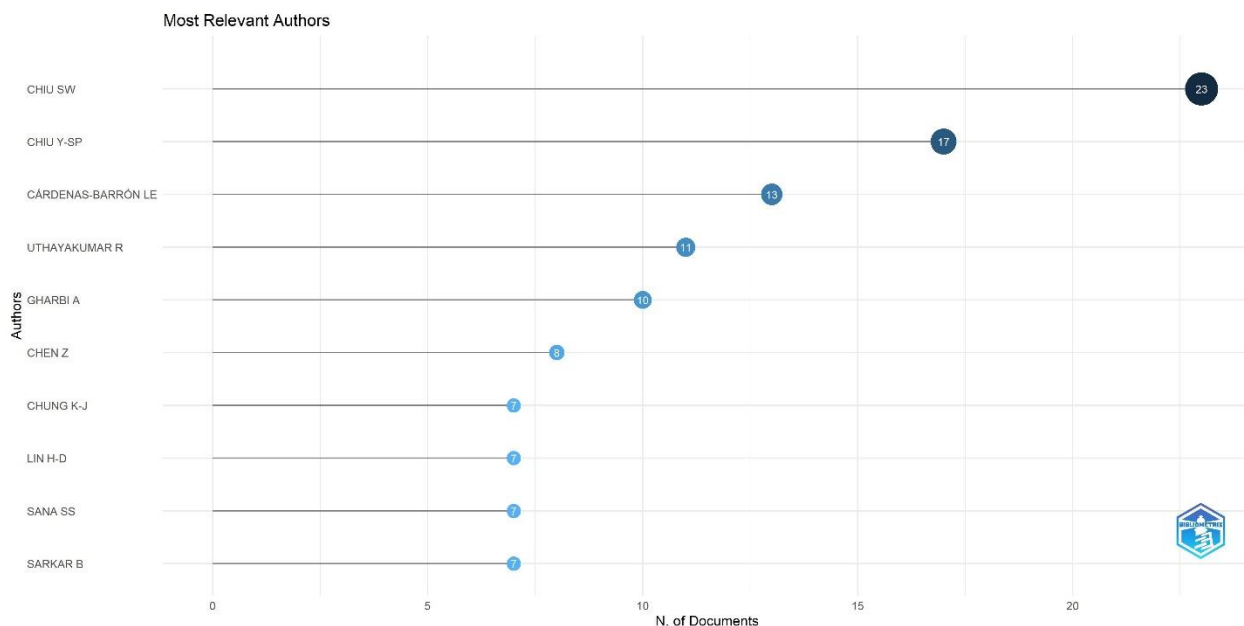


Fuente. Biblioshiny.

3.4. Citas e influencia

El análisis de las citas de los artículos es un indicador clave de su impacto en la comunidad científica. Los trabajos más influyentes en el campo del modelado y simulación de sistemas de reposición de inventario con demandas cíclicas seremontan principalmente a la década de 1990. Estos primeros estudios establecieron las bases teóricas y prácticas que han informado la investigación subsiguiente. Entre los autores más citados en esta área se encuentran nombres como Chiu Sw y Cárdenas-Barrón, como se observa en la figura 7, cuyos trabajos pioneros continúan siendo referencias clave en la literatura. Sin embargo, es notable que, en los últimos quince años, ha habido un resurgimiento de citas hacia trabajos enfocados al modelamiento, lo que indica una evolución en la metodología y en los enfoques teóricos.

Figura 7. Autores más relevantes



Fuente. Biblioshiny.

3.5. Interdisciplinariedad y temáticas emergentes

Un hallazgo interesante en el análisis bibliométrico es la interdisciplinariedad en el estudio de estos sistemas. Aunque la gestión de operaciones y la ingeniería industrial dominan el campo, se observa una creciente presencia de disciplinas como la informática y la economía. Esta interconexión disciplinaria sugiere que el modelado de sistemas de reposición de inventarios bajo demandas cíclicas es una problemática compleja que se beneficia de múltiples perspectivas.

Dentro de las temáticas emergentes relacionadas con la demanda constante, la integración de tecnologías de la información, como el internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial, están ganando terreno (Toorajipour *et al.*, 2021). Estas tecnologías ofrecen nuevas formas de monitorear, predecir y responder a escenarios futuros, representando una frontera emocionante para la investigación.

4. Ecuaciones diferenciales

En la gestión eficiente de inventarios, el método económico del pedido desempeña un papel crucial al equilibrar los costos asociados con el mantenimiento de inventario y las pérdidas por falta de existencias (Wilson, 1934). En este contexto, la aplicación de ecuaciones diferenciales ofrece una herramienta matemática poderosa para modelar y prever el comportamiento dinámico de un sistema de reposición de inventario sujeto a una demanda incremental constante. Estas ecuaciones capturan las relaciones fundamentales entre la tasa de reposición, el nivel de inventario y la demanda, permitiendo así una comprensión más profunda de las dinámicas subyacentes. Al explorar este enfoque, se puede optimizar la frecuencia y la cantidad de pedidos, minimizando los costos totales y mejorando la eficiencia operativa en el ámbito de la gestión de inventarios (Betria y Lara, 2011; Torres *et al.*, 2014).

A partir de lo anteriormente expuesto, se puede proponer una ecuación diferencial que describa la dinámica del sistema de reposición de inventario. Suponiendo que la tasa de

demanda aumenta de manera constante y que el tiempo de espera para recibir nuevos productos es conocido, la ecuación diferencial puede expresarse como una relación entre la tasa de cambio del nivel de inventario respecto al tiempo y la diferencia entre la tasa de demanda y la tasa de reposición (Edwards *et al.*, 1994; Simmons, 1977). Denotando $I(t)$ como el nivel de inventario en el tiempo t , D como la tasa de demanda y R como la tasa de reposición para un mismo periodo de tiempo t , la ecuación diferencial resultante se muestra en (1). Esta ecuación capta la esencia del modelo económico del pedido al considerar cómo la tasa de cambio en el inventario se relaciona con la diferencia entre la demanda y la tasa de reposición, proporcionando así un marco matemático para analizar y optimizar el sistema de reposición de inventario en función de los costos asociados (Valero y Sánchez, 2016).

4.1. Nivel de inventario $I(t)$

$$dI(t)/dt = -D(t) + R(t) \quad (1)$$

$I(t)$: nivel de inventario en el tiempo t .

$D(t)$: es la demanda cíclica en el tiempo t .

R : cantidad de pedido de reposición en el tiempo t .

La expresión refleja cómo cambia el nivel de inventario con el tiempo. Es así como, la tasa de cambio del inventario es igual a la negativa de la demanda más la cantidad de pedido de reposición.

4.2. Cantidad de pedido de reposición $R(t)$

$$dR(t)/dt = ROQ - I(t) \text{ si } I(t) \leq ROP;$$

$$0 \text{ si } I(t) > ROP. \quad (2)$$

4.3. Cantidad óptima de pedido de reposición (ROQ)

$$ROQ = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot S}{H}} \quad (3)$$

4.4. Punto de pedido (ROP)

$$ROP = d * LT \quad (4)$$

R: cantidad de pedido de reposición en el tiempo t.

ROQ es la cantidad de orden (la cantidad óptima para pedir en cada lote). D es la tasa de demanda anual (o la tasa de demanda en el periodo de tiempo considerado). S es el costo de hacer un pedido (costo de ordenar). H es el costo de mantenimiento de inventario por unidad por año (o por unidad por el periodo de tiempo considerado).

ROP es el punto de reorden. d es la tasa de demanda diaria. LT es el tiempo de espera o tiempo de entrega promedio en unidades de tiempo.

La tasa de cambio de pedido de reposición depende de si el nivel de inventario está por debajo o por encima del punto de pedido (ROP). Si está por debajo, el pedido se realiza hasta alcanzar el ROQ; de lo contrario, no se realiza ningún pedido.

4.5. Demanda $D(t)$

$$dD(t)/dt = D(t) \quad (5)$$

5. Implementación del modelo

La implementación de modelos de reposición de inventarios es una fase crítica en la gestión eficiente de las operaciones comerciales. En este estudio, se abordó la implementación del modelo propuesto en dos entornos de simulación ampliamente utilizados: Simulink y Vensim (Dabney y Harman, 2004; Eberlein y Peterson, 1992). Ambos entornos ofrecen ventajas significativas para el análisis y la evaluación de modelos complejos de gestión de inventario.

5.1. Implementación en Simulink

Simulink es una herramienta ampliamente reconocida para la simulación y el modelado de sistemas dinámicos. Para implementar nuestro modelo de reposición de inventario, seguimos una serie de pasos clave:

Definición de variables: inicialmente, se definieron las variables esenciales del modelo, como el nivel de inventario actual, la tasa de reposición, la demanda. Cada una de estas variables se representó mediante bloques de entrada y salida en el entorno de Simulink.

Ecuaciones diferenciales: las ecuaciones diferenciales desempeñan un papel fundamental en la representación del comportamiento del inventario con el tiempo. Se emplearon bloques de integración y operaciones matemáticas para implementar estas ecuaciones, lo que permitió modelar la tasa de cambio del inventario, de reposición y de demanda, así como otros aspectos dinámicos del sistema.

Parámetros y constantes: los modelos de gestión de inventario dependen de parámetros y constantes críticos, como el tiempo de entrega (LT), la demanda promedio anual (D) y el nivel de inventario óptimo (ROQ). En Simulink, se utilizaron bloques de constante para definir y ajustar estos valores de manera eficiente.

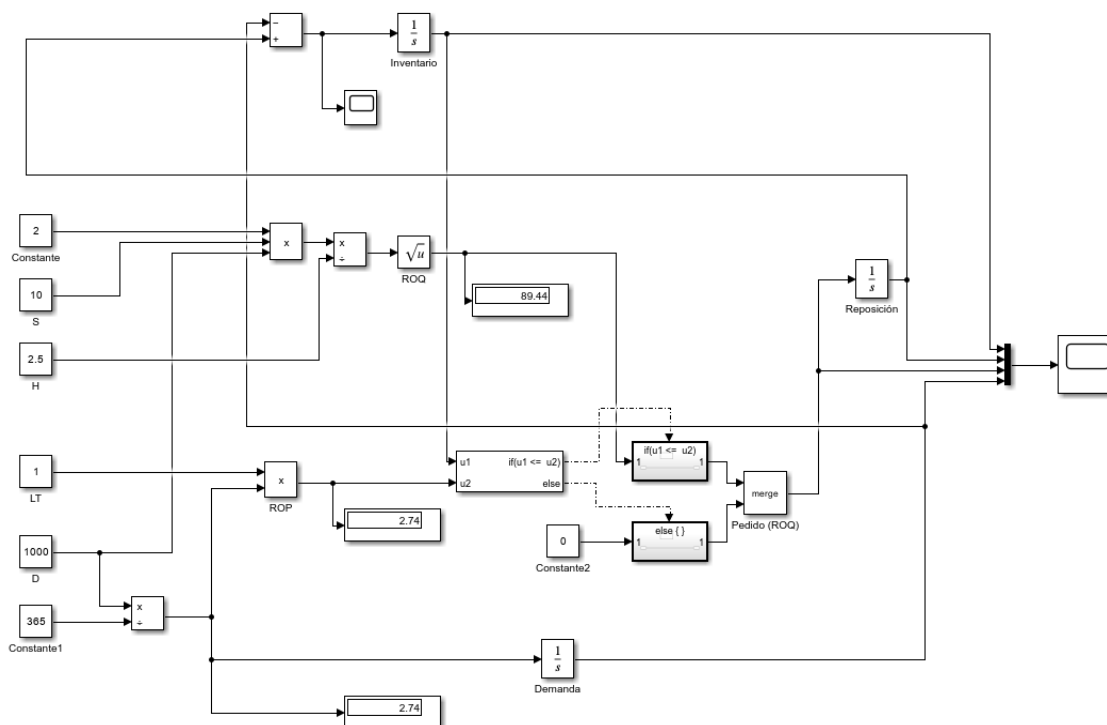
Simulación y análisis: para evaluar el comportamiento del modelo bajo diversas condiciones, se llevaron a cabo simulaciones en Simulink. Cambiando los valores de los parámetros, se analizó cómo afectaban al inventario, los costos de almacenamiento (H) y los costos de emitir una orden (S) cambios en el punto de reorden. Además, se aprovecharon las herramientas de análisis y visualización proporcionadas por Simulink para profundizar en las observaciones realizadas.

5.1.1. Resultados de la simulación en Simulink

Los parámetros y valores utilizados para la simulación se muestran en la sección de apéndice (sección VI).

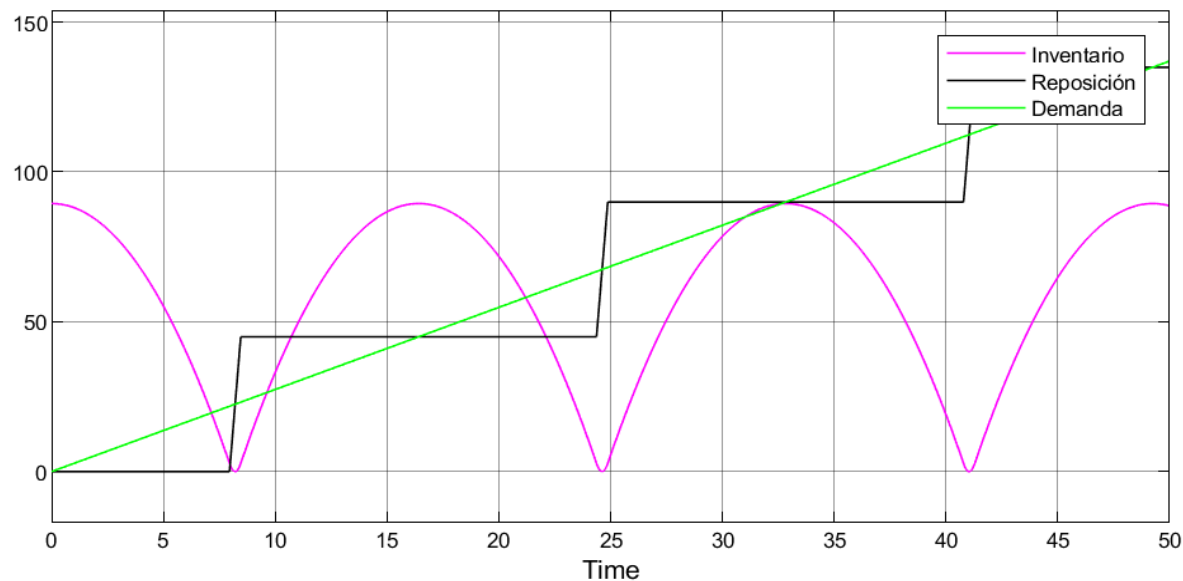
La figura 8 exhibe los bloques operativos empleados en la simulación dentro de Simulink. En esta representación, se destacan los valores presentados en los *Displays*, los cuales muestran la ROP, ROQ y la demanda promedio anual. Además, se evidencia la utilización de operadores condicionales (*IF*) que facilitaron la simulación del proceso de reposición de inventario. Por último, se observa cómo todos los flujos convergen hacia el bloque *Scope*, siendo este último el responsable de mostrar las gráficas presentadas en las figuras 9 y 10.

Figura 8. Implementación en Simulink



Fuente. Simulink-Matlab.

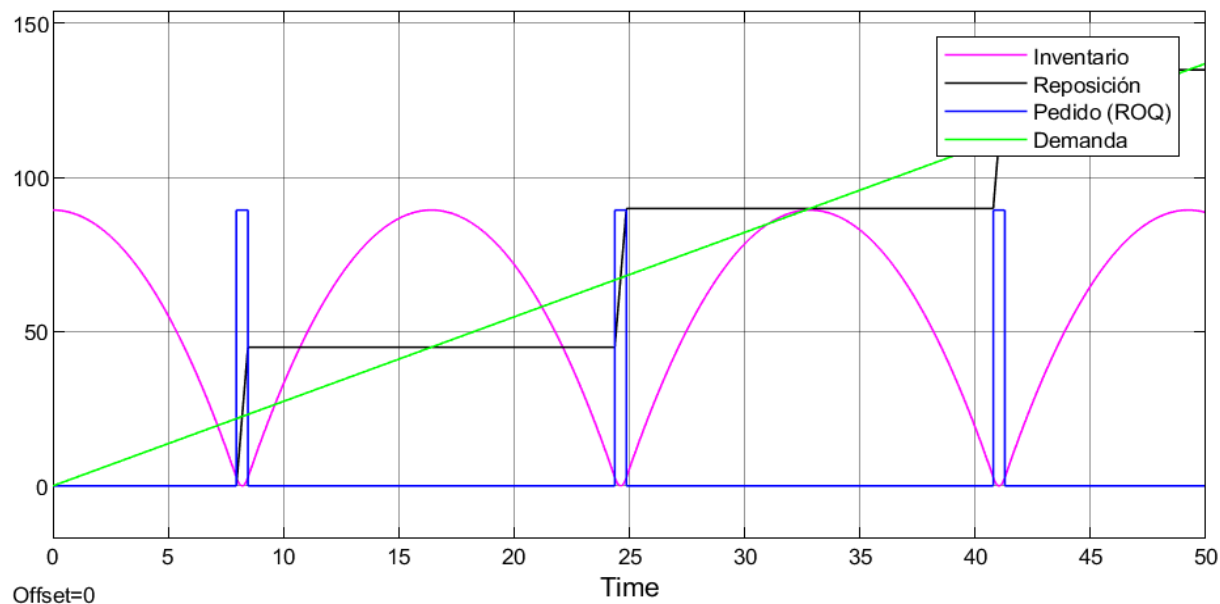
Figura 9. Respuesta gráfica de la simulación en tres niveles: inventario, reposición y demanda



Fuente. Simulink-Matlab.

La figura 9 ilustra el comportamiento del inventario a lo largo de un periodo de 50 días, un parámetro predefinido para la simulación, y muestra su relación con los flujos de reposición y demanda. En dicha gráfica, se puede apreciar una tasa de demanda incremental constante (representada por la línea verde), la cual indica una evolución de 2.74 unidades por día, equivalente a la demanda diaria (d) y reflejada en la pendiente de la recta. Además, en la misma gráfica se muestra la evolución de la reposición (línea negra) en función del tiempo, representada por el parámetro ROQ. Este parámetro puede asumir dos valores posibles: cero cuando no es necesario reponer inventario u 89.44 unidades (la cantidad óptima que minimiza los costos de inventario). Para este último valor, se observa una tasa de reposición de 44.72 unidades en un periodo de 0.5 días u 89.44 unidades en un día completo (*lead time* establecido en la simulación). La representación detallada de esta reposición se muestra en la figura 10. Por último, se muestra la evolución del inventario (línea magenta), el cual comienza con la cantidad ROQ y disminuye con el tiempo debido a la demanda, hasta que se efectúan las reposiciones necesarias para alcanzar nuevamente el nivel de inventario óptimo.

Figura 10. Respuesta gráfica de la simulación incluyendo: inventario, reposición, demanda y los ciclos de pedido en el tiempo



Fuente. Simulink-Matlab.

La figura 10, al igual que la figura 9, ilustra las fluctuaciones en el inventario a lo largo del tiempo para un periodo de 50 días, influenciadas por la tasa de demanda, los flujos de reposición y las cantidades de pedido (ROP). Como se mencionó anteriormente, los cálculos revelaron que el tamaño óptimo que minimiza los costos del inventario es de 89.44 unidades. Por lo tanto, esta cantidad deberá ser reabastecida periódicamente en función del tiempo. En este ejercicio, se estableció un punto de reorden (ROP) de 2.74 unidades, el cual coincide con la tasa de demanda anual. Cuando el inventario disminuye a 2.74 unidades (indicado por la línea magenta), se genera un pedido de 89.44 unidades (señalado por la línea azul). Este pedido se distribuye en un flujo continuo (representado por la línea negra) a una tasa de 44.72 unidades en un lapso de 0.5 días, u 89.44 unidades en un día completo (*lead time*).

Después de este proceso, la línea permanece estacionaria (es decir, sin reposición) hasta que el inventario alcanza nuevamente las 2.74 unidades, momento en el que se genera un nuevo pedido y reposición, de manera que el ciclo se repite. Es importante destacar que, a pesar de que la demanda es incremental constante, la función de integración modela simultáneamente

la influencia de la demanda y la reposición en el inventario, lo que se refleja gráficamente en unas líneas curvas en lugar de líneas rectas para el comportamiento del inventario.

5.2. Implementación en Vensim

Vensim es una herramienta especializada en el modelado de sistemas dinámicos que se basa en diagramas causales o diagramas de Forrester. Estos diagramas se emplean para comprender cómo evolucionan los sistemas a lo largo del tiempo. Utilizamos esta plataforma para llevar a cabo la implementación del modelo y realizar análisis detallados.

Los siguientes pasos destacan en la implementación en Vensim:

Diagrama Forrester: comenzamos creando un diagrama que representa las relaciones entre las variables del modelo en función del tiempo. Con Vensim, es posible conectar las flechas que representan la demanda, el inventario y la tasa de reposición.

Definición de variables y ecuaciones: en el diagrama de Forrester correspondiente, se han definido las variables y ecuaciones que regulan el comportamiento del inventario a lo largo del tiempo. Este proceso ha involucrado la utilización de ecuaciones diferenciales para expresar las relaciones dinámicas presentes en el modelo.

Parámetros y constantes: al igual que en Simulink, Vensim permitió la definición de parámetros y constantes clave. Estos valores se asignaron numéricamente y se utilizaron en las ecuaciones para garantizar una fácil manipulación y reutilización.

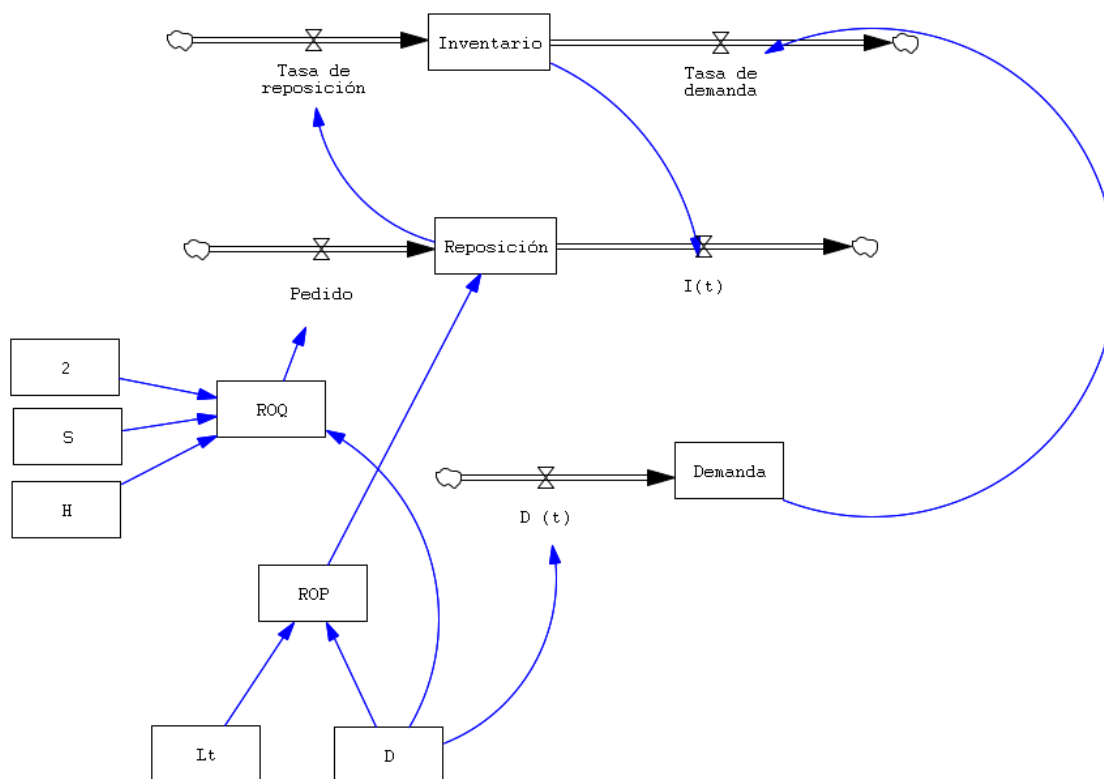
Simulación y análisis: se llevaron a cabo simulaciones en Vensim para examinar el comportamiento del modelo en diversas circunstancias. Mediante la modificación de los valores y las condiciones iniciales de las variables, se pudo observar la evolución del inventario y analizar los resultados utilizando gráficos y tablas proporcionadas por la herramienta.

5.2.1. Resultados de la simulación en Vensim

Los parámetros y valores utilizados para la simulación se muestran en la sección de anexos (tabla 1).

En la figura 11, se presentan los bloques operativos utilizados en la simulación en Vensim. Se han definido tres niveles de bloques: inventario, reposición y demanda. Los flujos que se encuentran en estos niveles representan la tasa de reposición, la tasa de demanda, los pedidos (que reflejan los cambios en ROQ), $I(t)$ (que representa la evolución del inventario a lo largo del tiempo) y $D(t)$, que corresponde a la demanda promedio diaria (d). Los demás bloques corresponden a valores constantes dentro del modelo.

Figura 11. Implementación en Vensim. Diagrama de Forrester

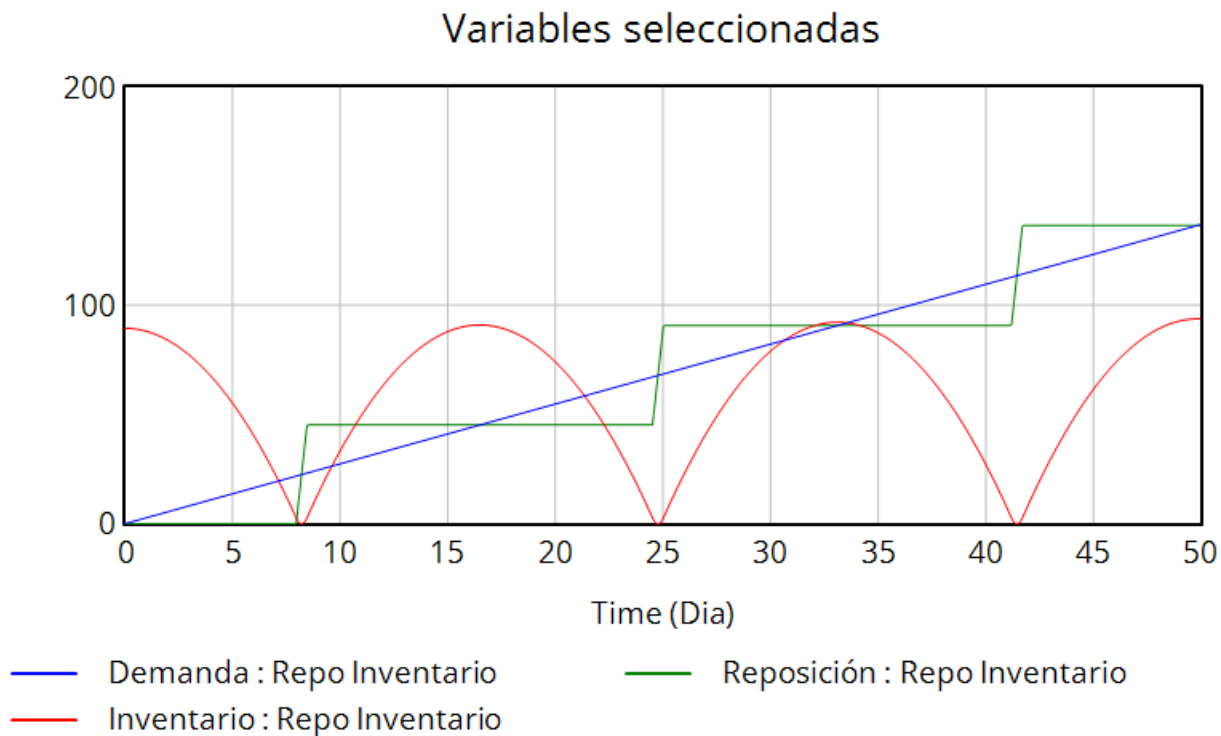


Fuente. Vensim Ple.

En la figura 12 se presenta el resultado gráfico de la simulación en Vensim, que al igual que el resultado de la figura 9, correspondiente a la simulación en Simulink, representa el

comportamiento del inventario durante un periodo de 50 días, un parámetro previamente configurado para la simulación. Ambas simulaciones exhiben un comportamiento idéntico, validando así la precisión de la simulación realizada en Simulink. Además, esta representación gráfica ilustra la relación del inventario con los flujos de reposición y demanda. En la figura se destaca de manera evidente una tasa de demanda incremental constante, claramente indicada por la línea azul, que equivale a una evolución de 2.74 unidades por día. Además, se puede apreciar la dinámica del inventario (representada por la línea roja), con sus fluctuaciones que reflejan los procesos de agotamiento y reposición. Por último, la reposición (identificada mediante la línea verde) en función del tiempo también se encuentra representada en la figura.

Figura 12. Respuesta gráfica de la simulación en Vensim en tres niveles: inventario, reposición y demanda



Fuente. Vensim Ple.

6. Conclusiones

El uso de ecuaciones diferenciales permitió identificar un nuevo enfoque en la simulación de reposición de inventarios. Si bien los modelos clásicos deterministas capturan con precisión las variaciones en el inventario, también es factible validar una respuesta con la misma precisión bajo un enfoque matemático diferencial. En ese sentido, las simulaciones de este tipo posibilitan la reducción de la cantidad de iteraciones requeridas para obtener resultados precisos. Estos hallazgos son valiosos para la optimización de sistemas de gestión de inventario y la toma de decisiones estratégicas en contextos empresariales y logísticos.

El proceso de modelado y simulación de sistemas dinámicos, utilizando herramientas como Simulink y Vensim, ha demostrado ser esencial para comprender y analizar el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo. Estas herramientas permiten definir variables, ecuaciones y relaciones que rigen el sistema, lo que facilita la evaluación de diferentes escenarios y la toma de decisiones informadas. Además, la validación cruzada de simulaciones realizadas en distintas plataformas, como se demostró en las figuras 9 y 12, refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Por último, el modelado y simulación de sistemas dinámicos ofrecen una herramienta poderosa para comprender y mejorar la gestión de inventario, así como para abordar una amplia gama de problemas en diversas áreas, desde la industria hasta la investigación científica.

7. Referencias

- Bancroft, J. & Li, D. (2021). Managing supply chains. In P. Szende, A. N. Dalton & M. (Myongjee) Yoo (Eds.), Operations Management in the Hospitality Industry (pp. 117-142). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/978-1-83867-541-720211006>
- Barnes, D. (2018). Operations management: an international perspective. Bloomsbury Publishing.

- Benids, M. (2020). Using the economic order quantity formula in inventory management. <https://www.eazystock.com/uk/blog-uk/calculating-economic-order-quantity-formula/>
- Betria, M. y Lara, L. P. (2011). Simulación de una cadena de abastecimiento. VIII Jornada de Informática Industrial (JII 2011) (XL JAIIO, Córdoba, 31 de agosto y 1.º de septiembre de 2011).
- Dabney, J. B. & Harman, T. L. (2004). Mastering simulink (Vol. 230). Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River.
- Eberlein, R. L. & Peterson, D. W. (1992). Understanding models with VensimTM. *European Journal of Operational Research*, 59(1), 216–219. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90018-5)
- Edwards, C. H., Penney, D. E. y Mondragón, M. D. (1994). Ecuaciones diferenciales elementales y problemas con condiciones en la frontera. Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Flores, B. E. & Clay-Whybark, D. (1986). Multiple criteria ABC analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 6(3), 38–46. <https://doi.org/10.1108/eb054765>
- Harrison, A., Skipworth, H., van Hoek, R. I. & Aitken, J. (2019). Logistics management and strategy. Pearson UK.
- Muller, M. (2019). Essentials of inventory management. Harper Collins Leadership.
- Simmons, G. F. (1977). Ecuaciones diferenciales con aplicaciones y notas históricas.
- Slack, N. & Brandon-Jones, A. (2019). Operations management (ninth edition).
- Stadtler, H. (2014). Supply chain management: an overview. Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies, 3–28.
- Toorajipour, R., Sohrabpour, V., Nazarpour, A., Oghazi, P. & Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 122, 502–517. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>

- Torres, F., Ballesteros, F. & Villa, M. (2014). Modeling a coordinated manufacturer-buyer single-item system under vendor-managed inventory. In: Choi, TM. (eds). *Handbook of EOQ inventory problems. International Series in Operations Research & Management Science, vol 197*. (1st ed., 247-278). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7639-9_12
- Valero, Ó. M. y Sánchez, L. F. (2016). Modelo de control óptimo para el sistema Producción-Inventarios. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 16, 35-44. <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215048805004.pdf>
- Wilson, R. H. (1934). A scientific routine for stock control. Harvard University.

8. Anexos

Se eligieron valores típicos para los sistemas de reposición de inventarios en cada uno de los modelos, con el propósito de proporcionar ejemplos representativos para comprender las dinámicas de dichos modelos. Cabe señalar que estos valores pueden ser reemplazados por otros, permitiendo así validar que el ajuste continúa siendo consistente en ambos casos.

Tabla 1. Parámetros para el modelado y la simulación en Simulink

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidades
<i>S</i>	Constante	10	\$/Pedido
<i>H</i>	Constante	2.5	\$/Unidad
<i>LT</i>	Constante	1	día
<i>D</i>	Constante	1000	Unidades/año
<i>ROP</i>	$D*LT/365$	2.74	Unidades
<i>ROQ</i>	$SQRT("2"*S*D*365/H)$	89.44	Unidades
<i>Demanda</i>	Integrator ("D(t))	Variable	Unidades/día
<i>Demanda (valor inicial)</i>	Constante	0	Unidades/día
<i>Pedido (ROQ)</i>	If ((u1 <= u2), ROQ, 0))	89.44; 0	Unidades
<i>Reposición</i>	Integrator (Pedido (ROQ))	Variable	Unidades/día
<i>Reposición (valor inicial)</i>	Constante	0	Unidades/día
<i>Inventario</i>	Integrator (Reposición-Demanda)	Variable	Unidades/día
<i>Inventario (valor inicial)</i>	Constante	89.44	Unidades
<i>Stop time</i>	Constante	50	día
<i>Max step size</i>	Constante	0,01	No aplica
<i>Min step size</i>	Constante	0.001	No aplica
<i>Inventario</i>	INTEG (Tasa de reposición-Tasa de demanda)	Variable	Unidades/día
<i>Inventario (valor inicial)</i>	Constante	89.44	Unidades
<i>Tasa de demanda</i>	Demanda	Variable	Unidades/día
<i>INITIAL TIME</i>	Constante	0	día
<i>FINAL TIME</i>	Constante	50	día
<i>TIME STEP</i>	Constante	0.001	No aplica

Fuente. Elaboración propia.