

GESTIÓN DE INVENTARIOS EN LA CADENA DE ABASTECIMIENTO SPCI UTILIZANDO SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Martín Díaz Vélez

mdiazv1@eafit.edu.co
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Universidad EAFIT

Sofía Jaramillo Chavarría

sjaramil42@eafit.edu.co
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Universidad EAFIT

Angy Sánchez Moreno

ajsanchezm@eafit.edu.co
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Universidad EAFIT

RESUMEN

Este estudio se enfoca en evaluar la gestión del inventario durante la fase de aprovisionamiento de materias primas para la fabricación de suministros de sistemas de protección contra incendios. Se implementó un modelo utilizando simulación de eventos discretos (DES) para representar la naturaleza discreta de las cadenas de suministro. Se analizaron diversos niveles de punto de reorden y cantidades a ordenar para el manejo de inventario con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa. Los resultados revelan una reducción del 9.0 % en el tiempo del sistema de pedidos y del 8.4 % en la cantidad de pedidos rechazados.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión efectiva de las cadenas de abastecimiento es fundamental para garantizar que los productos o mercancías lleguen a los clientes finales de manera oportuna y eficiente. Desde el aprovisionamiento de materias primas hasta la entrega final, este proceso abarca una serie de operaciones complejas, incluyendo provisión, producción, almacenaje y distribución, cada una requiriendo una cuidadosa planificación y coordinación.

Enfocándonos específicamente en la etapa de aprovisionamiento, esta fase se concentra en asegurar la disponibilidad y calidad de los materiales necesarios para la fabricación del producto final. Aquí, la planificación precisa es crucial, considerando factores como la cantidad de materiales requeridos, su disponibilidad y los tiempos de anticipación necesarios para garantizar un flujo constante en la cadena de abastecimiento. La flexibilidad también es clave, permitiendo ajustes ágiles ante cambios en la demanda y la oferta.

Para enfrentar los desafíos inherentes a esta compleja dinámica, es pertinente recurrir a herramientas como simulaciones, que permiten experimentar con estrategias y mejorar los procesos involucrados en la cadena de abastecimiento. En este contexto, nos enfocamos en la fase de aprovisionamiento de ciertas materias primas principales de la empresa de Sistemas en Protección Contra Incendios (SPCI), líder en soluciones integrales para la protección contra incendios. Dentro de los sistemas contra incendios ofertados

por la empresa se encuentra el suministro SMART, el cual integra procesos de modelación, prefabricación, empaque y despacho. Sin embargo, la naturaleza personalizada de estos suministros, adaptados a las necesidades específicas de cada cliente, presenta desafíos adicionales en la gestión de inventario, especialmente en un mercado dinámico donde las fluctuaciones en la demanda y los tiempos de entrega de los proveedores pueden complicar aún más el proceso.

En este contexto, uno de los retos más significativos es el manejo óptimo del inventario. Este factor tiene implicaciones directas en la eficiencia operativa y la rentabilidad, convirtiéndose en un aspecto crítico para la empresa. La dificultad al abordar este proceso se centra en el inherente conflicto de intereses que se generan dentro de la compañía. Por un lado, se desea cumplir con una promesa de tiempo con los clientes pero al mismo tiempo, se pretende tener las cantidades mínimas de inventario que permitan cumplir con la demanda. Esto resulta complejo debido a la naturaleza dinámica del mercado, donde las fluctuaciones en la demanda, la variabilidad en las materias primas y los tiempos de entrega de las órdenes de compra por parte de los proveedores, pueden desestabilizar los sistemas de inventarios establecidos que genera un impacto negativo en el funcionamiento de la cadena de abastecimiento.

El presente trabajo está distribuido de la siguiente manera: En la sección 2 se encuentra el modelamiento conceptual donde se define el problema, se plantean los objetivos, el contenido del modelo y otros aspectos relevantes. En la sección 3 presenta los antecedentes del trabajo. Luego, en la sección 4 presenta los datos del modelo junto con los análisis y pruebas estadísticas para los datos de entrada. En la sección 5 explica la implementación en la plataforma de simulación. En la sección 6 se explica la obtención de los resultados y en la sección 7 se hace validación y verificación del modelo. Finalmente, en la sección 8 presenta el análisis de sensibilidad y una optimización con base en los objetivos planteados y en la sección 9 se presentan las conclusiones del modelo además de algunas propuestas con base en los resultados y para trabajos futuros.

2. MODELAMIENTO CONCEPTUAL

2.1. Definición del problema

Una red contra incendios mostrada en la Figura 1 se compone de un conjunto de elementos diseñados para actuar de manera eficiente y rápida en caso de incendio, en el sistema se pueden encontrar materiales con finalidades diferentes, ya sea para la detección oportuna del humo o el aumento de la temperatura y materiales cuya función es apagar y controlar las llamas. Este tipo de infraestructura es crucial para la seguridad de edificios y espacios industriales, ya que permite una respuesta inmediata ante emergencias, reduciendo significativamente el riesgo de daños materiales, personales, y asegurando un entorno más seguro para los ocupantes.



Figura 1: Sistema de protección contra incendios.

Debido a que los requerimientos de este mercado varían según necesidades individuales la National Fire Protection Association (NFPA) asociación que establece más de 300 códigos y normas que abarcan las necesidades de diferentes sectores. Impone ciertas normativas en este contexto para que a pesar de la variabilidad sea estándar la implementación, principalmente: NFPA 10, NFPA 13, NFPA 13D, NFPA 25, NFPA 72, NFPA 70, entre otras. Cada una de estas tiene un enfoque diferente en el mismo mercado, ya sea para determinar la cantidad adecuada de materiales a usar, la distancia entre ellos, las medidas preventivas, los estándares para revisión continua y el mantenimiento seguro, y proporcionar directrices para la instalación segura de redes contra incendios. Por otro lado, uno de los principales problemas para las empresas es la gestión de inventarios, en donde se debe encontrar un balance para satisfacer la demanda sin entrar en pérdidas por inventario que pueden ser de capital o de espacio.

De esta manera, en SPCI se maneja el sistema de gestión de inventarios “Justo a tiempo (JIT)” donde este se centra en fabricar y entregar sólo lo que se necesita, cuando se necesita y en la cantidad necesaria, justo en el momento que se demanda. Sin embargo, el sistema JIT tiene ciertas desventajas ya que una errónea instalación del sistema puede implicar retrasos o carencia de inventario en alguna de las fases de la cadena de abastecimiento. Debido a la necesidad que surge de tener una buena coordinación en el manejo del inventario, resulta pertinente evaluar el comportamiento del sistema con JIT y otras alternativas de niveles de reorden y cantidad a ordenar que minimicen la cantidad de materias primas en la bodega pero que garantice un flujo continuo en la cadena de abastecimiento

2.2. ¿Por qué DES?

La simulación de eventos discretos (DES) se utiliza en la modelación de inventarios por varias razones fundamentales. En primer lugar, DES permite la representación detallada de eventos específicos que ocurren en momentos particulares, como la llegada de pedidos, la recepción de materias primas y las salidas de suministros. Estos eventos no suceden de manera continua, sino en instantes discretos que afectan el estado del sistema de manera significativa. Al modelar estos eventos específicos, DES proporciona una visión más precisa y realista del funcionamiento del sistema de inventarios.

Además, la simulación de eventos discretos maneja de manera efectiva la variabilidad y la estocasticidad que son inherentes a los sistemas de inventarios. Elementos que tienen un gran impacto como los tiempos de entrega ya sea por parte de proveedores para surtir el inventario o de la misma compañía en la realización total del producto, la demanda de los clientes, las cantidades pedidas y el momento adecuado para pedir suelen ser inciertos y variar considerablemente. Utilizando distribuciones de probabilidad, DES permite incorporar esta variabilidad en el modelo, lo que facilita la simulación de una amplia gama de escenarios posibles.

Otra ventaja importante es su capacidad para modelar interacciones complejas entre múltiples componentes del sistema de inventarios. En un entorno real, un sistema de inventarios puede involucrar varias materias primas, múltiples proveedores y diversas políticas de reabastecimiento. DES permite modelar estas interacciones de manera detallada para que tengan un impacto significativo general. Además, la flexibilidad de DES permite a los usuarios experimentar con diferentes configuraciones para evaluar su impacto antes de implementarlas en la práctica. Por ejemplo, tamaños de pedido, niveles de inventario de seguridad y tiempos de entrega para determinar cuál combinación ofrece el mejor equilibrio entre los intereses de la empresa. Esta capacidad de experimentar sin riesgo en un entorno simulado tiene mucho valor para la toma de decisiones futuras en pro del mejoramiento.

En resumen, la simulación de eventos discretos proporciona una herramienta versátil para modelar y optimizar sistemas de inventarios. Permite capturar la realidad de los eventos discretos, manejar la variabilidad y estocasticidad inherentes, modelar interacciones complejas y experimentar con diferentes estrategias de gestión para mejorar así la eficiencia y efectividad de la gestión del inventario.

2.3. Objetivos de la modelación

2.3.1. Propósito del modelo

Evaluar el comportamiento del modelo al modificar los niveles de orden y puntos de reorden en el inventario, de tal manera que el tiempo en el sistema se reduzca procurando atender la mayor cantidad de pedidos en la medida de lo posible.

2.3.2. Objetivos específicos del modelo

1. Considerar las principales materias primas que tienen impacto en el tiempo de realización de suministro y modelar el reabastecimiento de estos a lo largo de la simulación
2. Contemplar dos tamaños de pedidos en pro de comparar los tiempos en el sistema para evaluar el funcionamiento del modelo

2.3.3. Objetivos del proyecto

El alcance del modelo se explica en la Tabla 1

Componente	Descripción
Escala de tiempo	6 meses, en una semana se trabajan 5 días de 7:00 am a 17:00 pm
Flexibilidad	Limitada
Corridas	Muchos experimentos por correr
Visual display	Simple 2D
Modo de uso	Únicamente uso del modelar

Tabla 1: Objetivos del proyecto.

2.4. Entradas y salidas del modelo

2.4.1. Factores experimentales

El modelo tratará de lograr el objetivo mediante el control de inventario. El inventario tiene dos variables las cuales se utilizarán como factores experimentales que se explicarán más a detalle en el desarrollo del trabajo.

- Punto de reorden de cada producto almacenado: este valor R_i indica que si la cantidad almacenada del i -ésimo producto es menor a R_i se debe realizar un nuevo pedido para abastecer este producto.
- Cantidad a pedir Q_i : nos indica cuantas nuevas unidades llegarán al realizar un pedido del i -ésimo producto.

2.4.2. Respuestas Principales

Para ver si se logró el objetivo necesitamos lograr un tiempo promedio en el sistema menor al actual, mientras que los materiales no se mantienen mucho tiempo en el sistema. Por último también es clave revisar que la cantidad de pedidos rechazados por el sistema no aumente. Para evaluar estos objetivos necesitamos las siguientes respuestas:

- Tiempo promedio en el sistema.
- Tiempo promedio en bodega (por tipo de producto).

- Cantidad de órdenes rechazadas.

2.5. Contenido del modelo

En la Tabla 2 y 3 se presenta el alcance y nivel de detalle que se desea abordar.

2.5.1. Alcance

Componente	Incluir/Excluir	Justificación
Entidades:		
Pedidos a la empresa	Incluir	Entidades con las que se comienza el proceso.
Inventario	Incluir	Importante para determinar si se deben realizar órdenes de pedidos a proveedores.
Actividades:		
Formalizar pedido	Excluir	Las gestiones de contrato, cotización y verificación de planos no están dentro de los objetivos.
Realizar orden de compra	Incluir	Si se necesitan materiales que no hay en bodega para la fabricación estos se deben solicitar a proveedores.
Fabricar suministro	Incluir	Se realiza la producción.
Correcciones de fabricación	Excluir	Las correcciones no van a ser modeladas.
Despacho de vehículo	Excluir	No se pretende modelar la disponibilidad de los vehículos.
Colas:		
Cola de pedidos	Incluir	Capacidad limitada de pedidos.
Cola material que representa el inventario en bodega esperando a ser utilizado	Incluir	Material disponible para trabajar sin necesidad de hacer pedidos.
Cola mientras máquina o personal se desocupa	Excluir	No se pretende modelar.
Cola disponibilidad transporte	Excluir	No se pretende modelar.
Cola material proveedores	Incluir	Representa el material que va a llegar de una orden de compra.
Recursos:		
Empleados	Excluir	La cantidad de personal no se considera para el objetivo de modelado.
Máquinas	Excluir	Las máquinas no se consideran en el modelo.
Transporte	Excluir	Los vehículos no son relevantes según el objetivo.
Estaciones de trabajo	Incluir	Se deben considerar las estaciones de trabajo disponibles para producir un suministro.

Tabla 2: Alcance del modelo.

2.5.2. Nivel de detalle

Componente	Detalle	Incluir/Excluir	Justificación
Entidades:			
Pedidos a la empresa	Cantidad limitada	Incluir	Se recibe un máximo de pedidos.
	FIFO	Incluir	El primero que llega es el primero que sale. Se dividen los pedidos dependiendo del tamaño del pedido y si es nacional o internacional.
	Ruta	Incluir	
Inventario	Entran materiales al inventario si se realiza un pedido previo	Incluir	Solo llega material si se realiza una orden previa.
Actividades:			
Realizar orden de compra	Cantidad establecida	Incluir	La cantidad a pedir viene dada por Q y el nivel de reorden por R.
Fabricar suministro	Capacidad limitada	Incluir	Se realiza de a un suministro.
	FIFO	Incluir	El primero que llega es el primero que sale.
Colas:			
Cola pedidos	Capacidad limitada	Incluir	5 pedidos máximo para pedidos pequeños y medianos nacionales, 2 máximo para medianos internacionales.
Cola material que representa el inventario en bodega esperando a ser utilizado	FIFO	Incluir	El primero que llega es el primero que sale.
Cola material proveedores	Duración limitada	Incluir	Mientras se cumple el tiempo límite para entregar la orden.
Recursos:			
Estaciones de trabajo	Capacidad	Incluir	Se toma una estación de trabajo ya que se hace un pedido a la vez.
	Requerido en fabricación	Incluir	Se necesita para producir el suministro en las actividades.

Tabla 3: Nivel de detalle.

2.5.3. Supuestos

- Siempre hay un puesto de trabajo disponible para realizar un proyecto a la vez. Además, no presenta averías ni reparaciones que retrase el tiempo de fabricación de un suministro SMART.
- Los pedidos de materiales para el inventario siempre se pagan a tiempo por lo que estos no se retrasan mas de lo habitual.
- No van a haber otros factores que afecten el tiempo de entrega distintos a los considerados.

2.5.4. Simplificaciones

- Solo se va a modelar la sede de Sabaneta.
- Nos vamos a enfocar en un segmento de negocio específico, en este caso es residencial.
- Se trabajará solo sobre tres tipos de materiales de los múltiples manejados por la empresa.
- Se modelara solo la sección del inventario y de producción de los suministros SMART. Se omiten otros procesos como la creación de contratos, visitas a la obra o entrega de materiales en la obra.
- Catalogamos los suministros en solo tres tipos para simplificar el modelo. Estos son suministros pequeños, suministros medianos y suministros medianos que requieren materiales internacionales. Los proyectos de tamaño grande no son manejados como suministros SMART.
- Una vez los suministros fueron fabricados estos se pueden despachar inmediatamente a la obra.

3. ANTECEDENTES

La importancia de la simulación de eventos discretos en el seguimiento de los procesos de cadena de abastecimiento se puede ver reflejada en la literatura a través de diferentes estudios que han mostrado la idoneidad de DES para afrontar problemas de este estilo. Inicialmente, tenemos a (Wang y Ingham, 2008) que en “*Un enfoque de modelado de eventos discretos para la simulación de la cadena de suministro*” (Pulido et al., 2021) exponen la necesidad de las empresas de adaptarse a diversos desafíos, donde uno de ellos es crear cadenas de abastecimiento más receptivas y adaptables para satisfacer la demanda del mercado en constante cambio. Por lo que presentan la descripción general de una cadena de abastecimiento, en donde se examina la importancia de los mecanismos de liberación de pedidos y se propone su uso como medida de desempeño de monitoreo.

Se usa DES para investigar cómo se pueden utilizar herramientas de simulación para mejorar y optimizar el rendimiento de las cadenas de abastecimiento en pro de evaluar el proceso de cumplimiento de pedidos. Finalmente, al analizar los resultados de las simulaciones se pudo lograr mejoras significativas en la reducción de los costos de inventario, aumento de la producción y el cumplimiento de los pedidos a tiempo.

En el estudio "*Simulación de un Sistema de Inventarios para la Determinación de Niveles de Reposición y de Servicios: Un caso de estudio*", se propone la implementación de un modelo de simulación de inventarios discreto con el objetivo de determinar la cantidad óptima de reposición que satisfaga la demanda de los clientes. Aunque este objetivo se alinea con el enfoque de nuestro documento, el método de abordaje presenta diferencias significativas. En la investigación mencionada, se analiza un modelo que incluye tres productos (1, 2, 3) con demanda probabilística independiente histórica. Para asegurar la confiabilidad del modelo, se consideró un período de simulación de 24 meses, durante el cual cada producto fue replicado 30 veces. Las métricas de desempeño evaluadas incluyen la utilidad neta, la utilidad bruta, los costos de retención y los costos de incumplimiento. Según los resultados, al definir una cantidad de reposición promedio a la distribución de probabilidad, los productos 1 y 2 se beneficiaron, sin embargo, el producto 3 no logró cumplir otros objetivos importantes, como satisfacer completamente la demanda. Para abordar esto, los autores sugieren la implementación de niveles de inventario de seguridad. Claramente, aunque el objetivo principal es similar, la metodología implementada en el estudio citado difiere de la nuestra, considerando incluso diferentes métricas de rendimiento. Como se mencionó anteriormente, se está trabajando en un mercado con una variabilidad elevada lo que da cavidad a que un mismo problema sea abordado desde diversas perspectivas. Aunque el estudio citado no se sigue al pie de la letra como antecedente, sí reafirma la aplicabilidad de la simulación de eventos discretos (DES) en la modelación y simulación de inventarios, subrayando la estocasticidad inherente al mercado.

4. DATOS DEL MODELO

4.1. Obtención de los datos

Dadas las fechas de este año sobre cuándo SPCI recibió órdenes de suministros SMART, ya que desde este momento comenzaron a manejar el sistema ERP. Además, de información sobre cuantas de estas ordenes acabaron y de aquellas que fueron rechazadas debido a que ya tenían muchas órdenes en el sistema. Con estas fechas, fue posible calcular los tiempos entre llegadas de cada orden y con estos realizar un ajuste a los datos a una simulación para utilizar en el modelo. La compañía recibió 88 órdenes durante los primeros cuatro meses del año y se llevaron a cabo 48 de estas ordenes.

Como se mencionó anteriormente, estos pedidos se dividieron en pedidos pequeños y medianos, además los pedidos medianos pueden utilizar materiales internacionales. La compañía considera que el tamaño de los pedidos es muy variable y que aproximadamente los pedidos pequeños y medianos llegan en la misma cantidad. Además comentaron que este año tuvieron que realizar compras internacionales para 4 de sus pedidos de un total de 88 pedidos, el cual representa el 4,54% del total de pedidos. Con esta información se decidió que el 50% de pedidos simulados fueran pedidos pequeños, el 45% fueran pedidos medianos sin compras internacionales y el 5% fueran medianos con compras internacionales.

Sobre los pedidos que se realizan también se sabe que tienen que rechazarlos cuando estos alcanzan una alta cantidad en un mismo tiempo. De esta manera, en el modelo se considera que puede haber un máximo de 5 pedidos pequeños, 5 medianos y 2 medianos con materiales internacionales encolados. Cada vez que las colas de pedidos vayan a superar estas cantidades los pedidos serán rechazados.

También se tienen valores estimados de la cantidad de tiempo de espera hasta que llegan los pedidos de materiales realizados por SPCI, sin embargo no contamos con datos individuales de estos tiempos de espera, solo con la media estimada de estos. Debido a lo anterior se decidió utilizar distribuciones triangulares para estos tiempos de llegada. Para las órdenes nacionales tomamos una distribución con una media de 2 días, un valor mínimo de 1 día y un valor máximo de 3 días. Por el otro lado, las órdenes internacionales toman mucho más tiempo, por lo que se tomó una distribución para las llegadas con un valor medio de 30 días, un valor mínimo de 28 días y un valor máximo de 32 días.

Sobre los tiempos de que se tarda la fabricación de los kits, se mencionó que SPCI es capaz de terminar tres pedidos en una semana una vez ya tienen todos los materiales necesarios en bodega, pero nuevamente no se cuenta con datos individuales de estos tiempos de trabajo. Debido a ello, nuevamente se utilizó una distribución triangular para estos tiempos. Para los pedidos pequeños tomamos un valor medio de 1,5 días con un valor mínimo de 1 día y un valor máximo de 2 días y para los pedidos medianos tomamos un valor medio de 2 días con un valor mínimo de 1 día y un valor máximo de 3 días. Como la mitad de pedidos son pequeños y la otra mitad son medianos tenemos que en promedio un kit se demora 1,75 días, así que en el modelo por semana (5 días de trabajo) se pueden realizar en promedio 2,85 ordenes lo que es muy similar al valor real estimado.

Adicionalmente, se sabe que entre los materiales más importantes y utilizados en los sistemas contra incendios se encuentran las tuberías, las válvulas y los rociadores. Los cuales son los materiales que se van a simular en nuestro modelo. Así, el pedido pequeño cubre proyectos con un área aproximada de $100m^2$ y que los proyectos medianos cubren un área de $290m^2$. Además, los proyectos son rectangulares y que uno de sus lados mide $10m^2$.

Para calcular la cantidad de rociadores necesarios seguimos los estándares que se pueden encontrar en la norma NFPA 13, dado que nuestro proyecto tiene un riesgo ordinario de incendios, cada rociador

debe cubrir como máximo $12m^2$, por lo que nuestro proyecto pequeño debe tener 9 rociadores organizados en tres filas de 3 rociadores y el proyecto mediano debe tener 15 rociadores organizados en 3 filas de 5 rociadores. Por cada rociador es necesario una válvula y se necesita una más en el puesto de control del sistema contra incendios, así que estimaremos la cantidad de válvulas como uno más que la cantidad de rociadores. Finalmente para estimar la cantidad de metros de tubería que se usa en los proyectos vamos a utilizar un diseño de tuberías similar al desarrollado por (Ybirma, 2017) y se puede visualizar en la Figura 2.

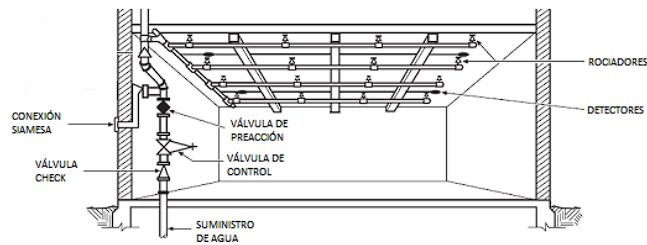


Figura 2: Diseño tuberías.

Para el proyecto mediano, hay dos filas de rociadores a lo largo del lado de $29m$ de la habitación, cada línea tiene $26m$ de tubería dejando $1,5$ metros a la pared y entre cada par de rociadores habrá una distancia aproximada de $2m$. Además hay una tubería extra que se conecta a estas dos filas de manera perpendicular, la cual debe medir $9m$ ya que deja un metro de distancia a la pared contraria. Finalmente, hay tres metros mas de tubería para bajar la pared y llegar a el puesto de control. Así que el total de metros de tubería sería: $26 * 2 + 9 + 3 = 64m$. Para el proyecto pequeño hay tres filas con tres rociadores, cada fila 9 metros de largo y se deja un espacio de 1 metro hacia una pared, mas la tubería perpendicular de 10 metros y tres metros mas para llegar al puesto de control se tiene un total de $9 * 3 + 10 + 3 = 40m$. Se utilizarán estos valores para la cantidad de materiales necesarios en cada pedido.

4.2. Análisis estadístico de los datos de entrada

4.2.1. Pruebas de homogeneidad

El primer paso para utilizar nuestros datos de los tiempos entre llegadas, es revisar que estos tengan un mismo comportamiento a lo largo del periodo de muestra de estos mismos. Para esto separamos los tiempos entre llegadas por meses, generando cuatro grupos de datos. Para revisar que los tiempos entre llegadas se comporten de manera similar a lo largo de los cuatro meses se uso el test de Kruskal-Wallis el cual tiene una hipótesis nula de que todos los grupos de datos vienen de una misma distribución. El resultado se observa en la Tabla 4.

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Groups	4297.7	3	1432.57	7.47	0.0584
Error	45766.3	84	544.84		
Total	50064	87			

Tabla 4: Prueba de independencia.

Un p-valor de $0,0584$ nos indica que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula bajo una significancia del 5% , por lo que no hay evidencia de que nuestros datos provengan de diferentes distribuciones.

Para confirmar estos resultados la Figura 3 muestra un diagrama de cajas y bigotes comparando los cuatro grupos de datos.

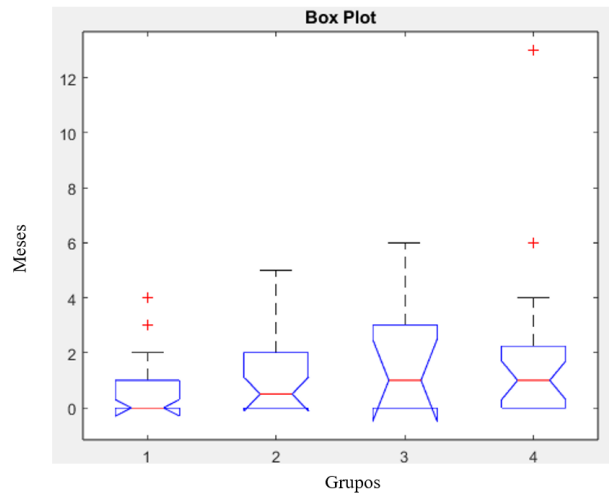


Figura 3: Diagramas cajas y bigotes para los tiempos entre pedidos por meses.

Aunque se nota que los valores en el primer mes (Enero) si fueron un poco menores (había menos tiempo entre pedidos) y que los tiempos de Marzo fueron un poco mayores, no hay ninguna diferencia significativa entre los cuatro diagramas, lo que nuevamente nos da un indicio de que los datos son homogéneos durante estos cuatro meses. De ahora en adelante trabajaremos suponiendo que nuestros datos son homogéneos por lo que utilizaremos del conjunto completo de datos durante los cuatro meses.

4.2.2. Pruebas de independencia y autocorrelación

Ahora veamos que nuestros datos de tiempos entre llegadas son independientes y no tienen correlación. En la vida real estas condiciones se deberían cumplir ya que los pedidos los realizan diferentes constructoras de forma independiente, esta independencia se puede confirmar para los datos en la Figura 4.

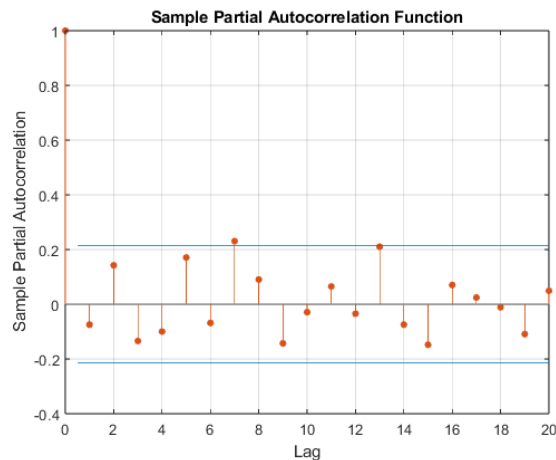


Figura 4: Autocorrelación de los datos.

Se observa que la autocorrelación toma valores pequeños y además se realizó el Ljung-Box Q-test el cual tiene una hipótesis nula de que los datos no tienen autocorrelación y no se encontró evidencia suficiente para rechazar esta hipótesis, lo que nos indica una baja autocorrelación. La Figura 5 nos muestra además el gráfico de dispersión el cual nos vuelve a confirmar una baja autocorrelación entre parejas de datos seguidos y nos da buenos indicios de que los datos son independientes.

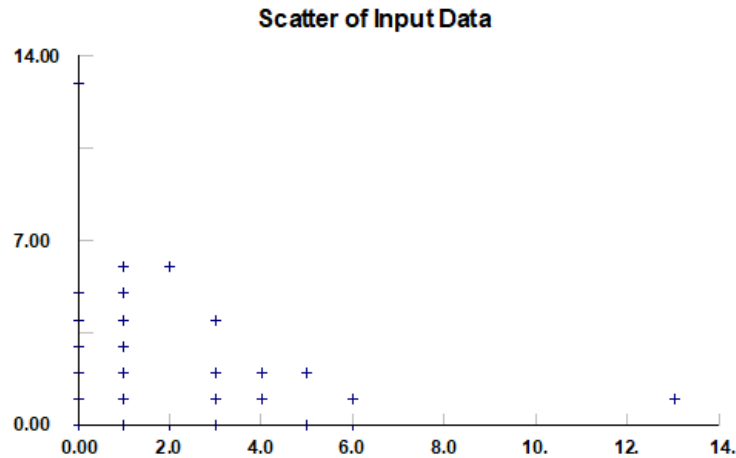


Figura 5: Gráfico de dispersión.

4.3. Ajuste de distribuciones teóricas

Trataremos de ajustar nuestros datos a distribuciones discretas, ya que los valores entre llegadas toman valores enteros de días y los valores siempre están entre 0 y 13. La Figura 6 nos muestra el resultado de ajustar diferentes distribuciones discretas.

Auto::Fit of Distributions		
distribution	rank	acceptance
Negative Binomial[1., 0.431]	100	do not reject
Geometric[0.431]	100.	do not reject
Discrete Uniform[0., 13.]	0.	reject
Poisson[1.32]	0.	reject

Figura 6: Gráfico ajuste de distribuciones.

Como podemos observar en la Figura 6, tanto la distribución geométrica como la binomial negativa logran ajustarse bien a los datos experimentales. De estas dos distribuciones utilizaremos la binomial negativa ya que esta es una distribución mas general (cubre el caso de la distribución geométrica). En la Figura 7 vemos la prueba de ajuste de la distribución binomial negativa, se puede observar que los p-valores de los test de ajuste son muy grandes, lo que significa que hay un buen indicio de que esta distribución logra explicar los datos reales. También se puede visualizar el ajuste de esta distribución en la Figura 8

Negative Binomial		
k	=	1.
p	=	0.431373
Chi Squared		
total classes		14
interval type		equal probable
net bins		3
chi**2		0.67
degrees of freedom		2
alpha		5.e-002
chi**2[2,5.e-002]		5.99
p-value		0.715
result		DO NOT REJECT
Kolmogorov-Smirnov		
data points		88
ks stat		3.92e-002
alpha		5.e-002
ks stat[88,5.e-002]		0.143
p-value		0.998
result		DO NOT REJECT

Figura 7: Ajuste binomial negativa.

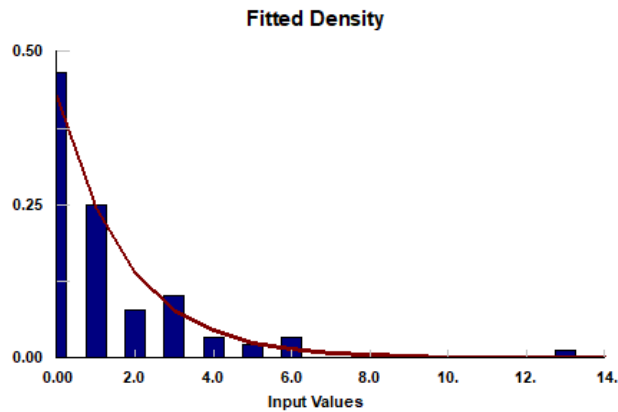


Figura 8: Gráfico de ajuste.

Se escogerá entonces la distribución binomial negativa con $k = 1$ y $p = 0,431$ para utilizar como la distribución del tiempo entre llegadas de los pedidos en nuestro modelo.

5. IMPLEMENTACIÓN EN PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

5.1. Claridad

La implementación del modelo se realizó en el software *Simul8* que permite simular eventos discretos. El modelo se diseñó buscando cumplir los objetivos del proyecto y de la modelación, es por esto que se tuvo en cuenta las distribuciones mencionadas en la sección 4 para intentar representar el comportamiento en el mundo real. En cuanto a las características consideradas en la modelación, tenemos que se simulan 6 meses en donde la unidad de tiempo se toma en días, se consideran 5 días laborales de lunes a viernes con una jornada continua de 7:00 am a 17:00 pm.

El modelo pretende representar el proceso de tres materias primas principales (tuberías, válvulas y rociadores) para la fabricación de un suministro dependiendo del tipo de pedido, esta división de los pedidos y la selección de las materias que se tendrán en consideración para simular en el inventario se explicó con más detalle anteriormente. Teniendo esto en cuenta, se inicia con la llegada de los pedidos que posteriormente deben hacer la cola de su respectivo tipo de pedido: pequeño, mediano nacional o mediano internacional.

La clasificación de un pedido mediano o pequeño se basa en el tamaño de este, es decir, la cantidad que se necesita de cada material para producir el suministro. Por otro lado, los pedidos medianos se separan en nacional e internacional que difieren en el tiempo límite, esto se debe a la disponibilidad de algún material dado a una característica específica requerida. En este caso, los pedidos internacionales se dan debido a la necesidad de adquirir un tipo específico de rociadores. Las colas de pedidos tienen una capacidad limitada, es decir, no pueden recibir infinitos proyectos. Estas capacidades están dadas por: 5 pedidos máximo para pedidos pequeños y medianos nacionales, 2 pedidos máximo para pedidos medianos internacionales.

Luego, los pedidos pasan a la actividad respectiva en la que se maneja el tipo de pedido. Esta actividad representa la producción del suministro que tiene una distribución para el tiempo que se tardan en realizarlo. La producción de un suministro se da con una cantidad específica requerida de cada material. Por otro lado, se evalúa la disponibilidad de cada material para concretar la producción de un suministro, en donde a medida que pasa el tiempo y se hace uso de ciertos materiales, se va reduciendo la existencia en las colas que representa la cantidad de inventario en bodega. Para reabastecer la bodega, se establecen puntos de reorden y la cantidad de material a pedir. Además, las órdenes de pedidos tienen una distribución que determina el lead time.

En resumen, en el modelo llegan pedidos que se dividen según su tamaño. Posteriormente, se realiza la producción del suministro que requiere cierta cantidad de cada materia prima, por lo que se debe considerar su disponibilidad en el inventario. Esto da pie a establecer puntos de reorden y cantidad a ordenar para que se puedan seguir produciendo suministros.

5.2. Presentación del modelo

El proceso que se describió anteriormente está dado por el siguiente diagrama presentado en la Figura 9:

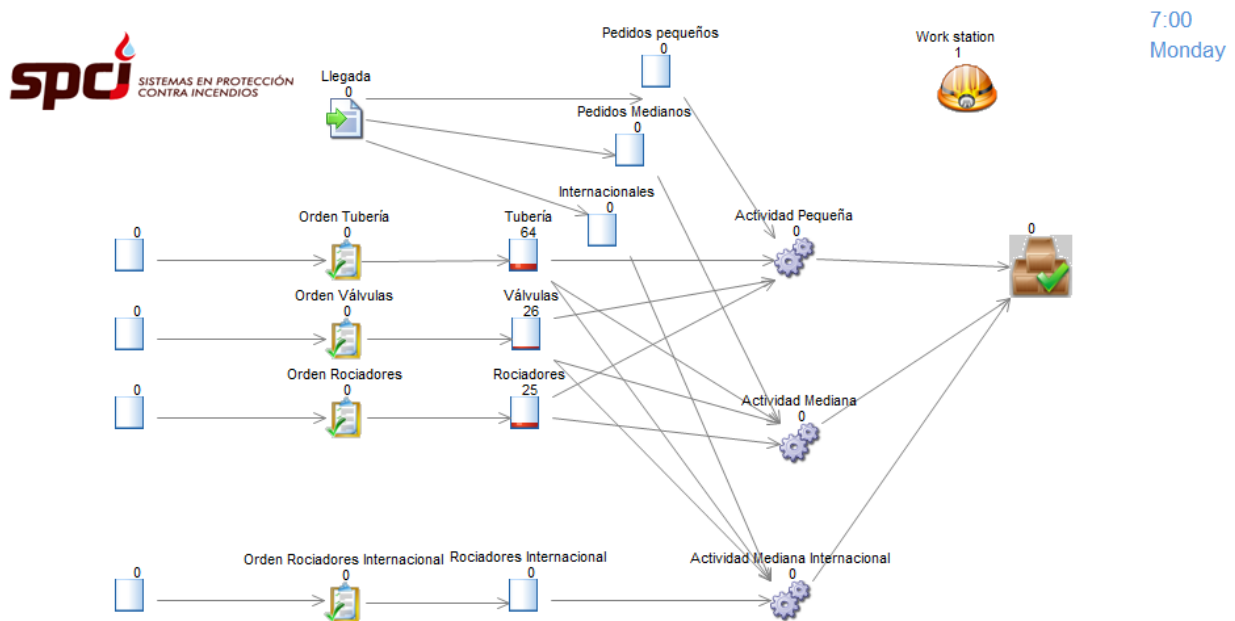


Figura 9: Diagrama del modelo en Simul8.

5.3. Uso de técnicas avanzadas

Tenemos varios aspectos importantes a resaltar en el modelo:

- Los pedidos se dividen para hacer cola según el tamaño
- Las actividades requieren cierta cantidad de cada materia para realizar un suministro
- Las órdenes de pedido tienen un nivel para reordenar y una cantidad establecida de cuanto pedir

Para poder considerar esto, se tuvo que hacer uso de distintas técnicas. Inicialmente, para la división de los pedidos se hizo uso de “Routing Out” para establecer los porcentajes que distribuían los pedidos.

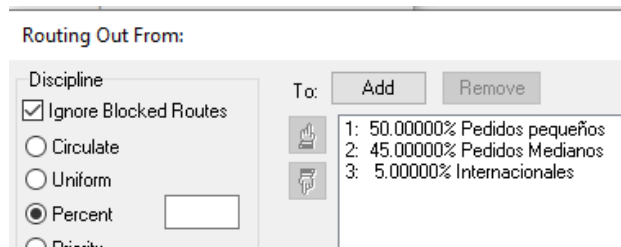


Figura 10: Routing Out por tipo de pedido.

Para recolectar la cantidad de cada materia requerida, se empleó “Routing In” donde se esperaba hasta tener una colección de 40 tuberías, 10 válvulas y 9 rociadores para los pedidos pequeños. Mientras que para los pedidos medianos se toman 64 tuberías, 26 válvulas y 25 rociadores.

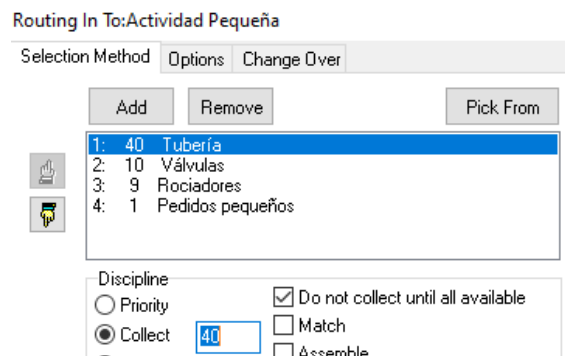


Figura 11: Routing In actividad pequeña.

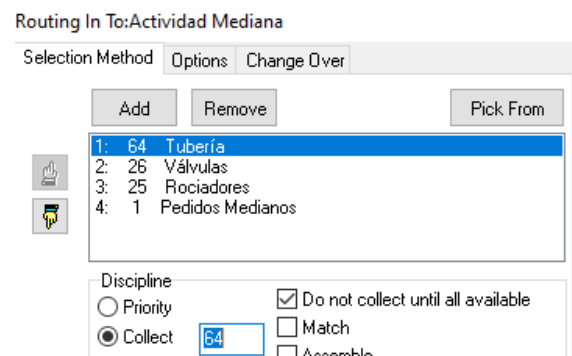


Figura 12: Routing In actividad mediana.

Para el proceso del manejo de inventario se crearon 6 variables globales de tipo numérico donde se consideran los niveles de reorden (R) y la cantidad que se pide (Q) para las tres materias primas consideradas. Como se tiene en cuenta el manejo del inventario con JIT, se toman estos dos puntos como el mínimo que se necesita para cumplir la demanda del suministro que requiera más materiales. Al llegar al nivel mínimo, con un booleano se actualiza si se debe pedir a la actividad de órdenes y por medio de “Batching Out” se indica la cantidad que debe llegar.

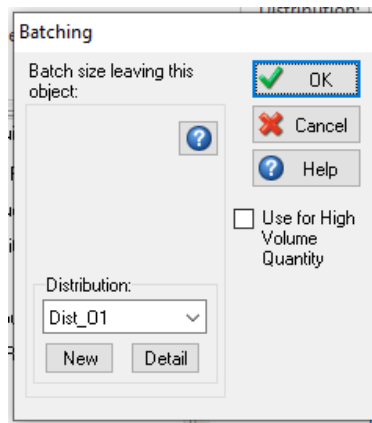


Figura 13: Batching Out para la orden 1 tuberías.

Como comentario adicional, se estableció un “Work station” que permite que se trabaja en la producción los suministros en cada actividad, se diseñó de tal manera que trabaje en un pedido al tiempo pero que pueda hacer en promedio 3 pedidos a la semana.

5.4. Presentación de resultados

Los resultados que se obtienen al correr el modelo son:

- Cantidades a ordenar y niveles de reorden utilizados en la simulación: Q1, Q2, Q3, R1, R1 y R3
- Tiempos promedio en cola para las materias prima: Tubería, válvulas y rociadores
- Número completado de materias en la salida y el tiempo promedio en el sistema de las órdenes
- Pedidos no completados

Q1	Content
Q2	Content
Q3	Content
R1	Content
R2	Content
R3	Content
Tubería	Average Queuing Time
Válvulas	Average Queuing Time
Rociadores	Average Queuing Time
End 1	Number Completed
	Average Time in System (2)
Llegada	Number Lost

Figura 14: Presentación de los resultados.

Estos resultados son de interés ya que permiten verificar el cumplimiento de los objetivos planteados.

6. OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Naturaleza del modelo

Un sistema de producción puede considerarse una simulación sin terminación, dado que no presenta un punto de finalización natural. La simulación no se detiene por eventos internos del sistema, sino que requiere que el modelador o usuario defina un punto de finalización. Podría pensarse que la simulación concluye al finalizar la jornada laboral; sin embargo, aunque el proceso se detiene temporalmente, al día siguiente se retoma desde las actividades pendientes del día anterior. No ocurre un reinicio completo del sistema, sino una continuación de las actividades previas.

6.2. Naturaleza de las salidas del modelo

En los modelos no terminantes, es común que las salidas tiendan hacia un estado estable. Al iniciar la ejecución del modelo, este parte completamente vacío y se va llenando gradualmente con el tiempo. Como resultado, el rendimiento del modelo comienza en un nivel bajo y aumenta progresivamente hasta alcanzar un estado de estabilidad, también conocido como estado transitorio. Este período inicial en la simulación se denomina transitorio inicial, ya que ocurre durante la inicialización de la ejecución. Los datos obtenidos durante este transitorio inicial son poco realistas en comparación con los sistemas físicos, dado que ningún sistema de producción comienza sin ningún trabajo en progreso algún día por la mañana. Incluir estos datos en el modelo podría introducir algún tipo de sesgo.

6.3. Manejo de sesgos iniciales

Para tener manejo de estos datos que introducen sesgo inicialmente, corremos el modelo 5 veces recolectando cada día en el tiempo de simulación y en el tiempo promedio en el sistema. Todo esto se realiza con el objetivo de encontrar el instante en la simulación en el cual se alcanza el estado estacionario a través del método de Welch, el cual genera el gráfico a partir de las medias móviles calculadas con una longitud $w = 5$ de los datos obtenidos en las corridas.

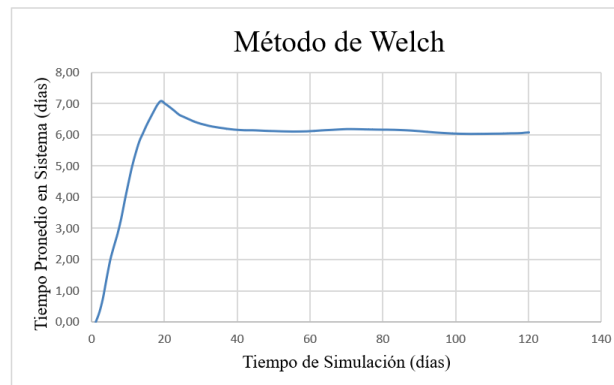


Figura 15: Control Sesgos Iniciales.

Del anterior gráfico, podemos ubicar como un tiempo factible para iniciar la simulación 40 días, esta modificación se añade al modelo para que se excluya la etapa de calentamiento

6.4. Número de corridas

Para calcular la cantidad de corridas adecuadas en el modelo se usó la herramienta *Trial Calculator* que brinda el software Simul8, esta herramienta recomienda un número de corridas adecuadas para los trials. La recomendación se basa en una precisión establecida en los intervalos de confianza estimados

alrededor de la media de los indicadores clave de rendimiento (KPIs). En este caso, usamos una precisión del 5% de la media esta elección asegura que el intervalo de confianza sea lo suficientemente estrecho, garantizando que las estimaciones de la media de los KPIs sean precisas y reflejen con un 95 % de certeza que los resultados reales se encuentran dentro de este rango.

KPI	Corridas recomendadas
Tiempo promedio en sistema (Tipo 2)	31
Número completados	6
Tubería: Tiempo promedio en sistema	15
Válvulas: Tiempo promedio en sistema	16
Rociadores: Tiempo promedio en sistema	13

Tabla 5: KPIs y corridas recomendadas.

6.5. Espacio de soluciones

Para obtener los intervalos en los cuales se encuentran los valores de las variables elegidas como significativas en el modelo, este se ejecuta 31 corridas en un trial por los resultados obtenidos en el *Trial Calculator* y los resultados son visualizados en la herramienta *Results manager*. En estas corridas dejamos los parámetros R_i y Q_i en la cantidad mínima necesaria para cumplir cualesquiera de los dos tamaños de pedidos considerados.

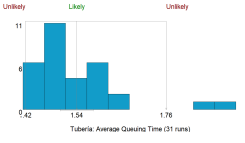
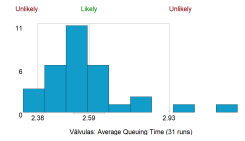
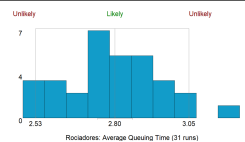
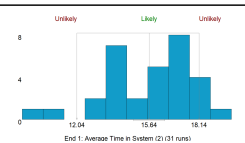
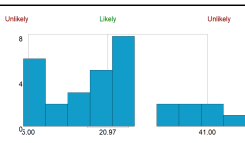
KPIs	Inf 95 %	Promedio	Sup 95 %	Riesgo
Tiempo Cola Tubería	1.50	1.54	1.58	
Tiempo Cola Válvulas	2.53	2.59	2.66	
Tiempo Cola Rociadores	2.74	2.80	2.86	
Tiempo Promedio Sistema (Tipo 2)	14.86	15.68	16.43	
Número Rechazados	16.79	20.97	25.14	

Tabla 6: Intervalos de Confianza KPIs.

Este análisis de los resultados del modelo de simulación de inventarios resalta varias observaciones respecto a las métricas seleccionadas como importantes. Se evidencia que la mayoría de las variables actúan sobre un espectro de valores estrecho lo que sugiere una estabilidad en los procesos de producción e inventario, con la notable excepción del KPI de número de rechazados, donde se observa una mayor variabilidad.

En cuanto al manejo de materias primas, el hecho de que los rociadores permanezcan más tiempo promedio en el inventario esperando a ser usados sugiere que la demanda es mucho menor que la cantidad de materiales que se solicita a proveedores. Esto contrasta con las tuberías, que muestran un tiempo de almacenamiento menor, indicando un flujo de inventario más rápido y posiblemente una mejor sincronización entre las cantidades que llegan y las que salen a la realización de suministros.

El tiempo promedio en el sistema de cada pedido, de aproximadamente 15.68 días, indica que, desde la llegada del pedido hasta la salida del producto terminado como suministro, el proceso toma un poco más de dos semanas, debido a que este en ocasiones debe esperar a la disponibilidad en el punto de fabricación, la llegada de materias primas y se considera en este espacio igualmente los productos con necesidades internacionales, esto genera una inflación debido a que estas materias primas tardan mucho más en llegar. Este tiempo es un indicativo positivo de que el modelo de simulación está alineado de buena manera con las operaciones reales de la empresa.

7. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Se pretende validar la precisión del modelo de tal manera que se este representado de forma adecuada el sistema del mundo real.

7.1. Validación caja blanca

En el modelo se realizaron ciertos supuestos y simplificaciones en los que se procuró mantenerse lo más cercano a la realidad sin un incremento significativo en la dificultad de este. Para esto se discutió con los directivos de la empresa con el objetivo de entender los puntos críticos del proceso y así enfocarse únicamente en los factores más importantes en la cadena de abastecimiento, lo cual genera precisión en el planteamiento del modelo conceptual.

En el desarrollo del código que proporciona la lógica de la dinámica del reabastecimiento del inventario, se manejaron niveles mínimos para el punto de reorden y la cantidad a ordenar siendo fieles a la estrategia de manejo de inventario JIT la cual es la implementada en la empresa.

Finalmente, para evaluar que el proceso esté representando el comportamiento esperado del sistema, aumentamos las capacidades que se tienen para recibir los distintos pedidos. Como se está manejando el inventario de manera que se pide la cantidad mínima necesaria cuando se requiere la realización del suministro y los tiempos de llegada de las órdenes de los proveedores son poco variantes, se espera que a pesar de que ingresen más pedidos al sistema, la cantidad de la salida sea la misma. Al implementar estos cambios en las condiciones del modelo, se evidenció el comportamiento esperado ya que se está simulando correctamente esta sección de la cadena de abastecimiento.

7.2. Validación caja negra

Al intentar validar el comportamiento del sistema real con el modelo no es posible realizar un análisis estadístico robusto debido a la carencia de información. Por dicho motivo, se realiza una comparación entre los pedidos que llegan al sistema en un período de 5 meses y los que salen.

Para comenzar analizaremos los datos de entrada, la empresa nos proporcionó información en la que se evidencia una llegada de 88 pedidos en el tiempo mencionado. En el modelo se obtiene una llegada de 68 pedidos en el mismo período. De igual manera, en el sistema real se terminaron 48 suministros mientras que en el modelo esta cantidad fue de 52.

Estas diferencias se pueden dar debido a la aproximación en la distribución de las llegadas, de los tiempos de fabricación y de materias primas de proveedores. Sin embargo, es un buen resultado dado que para la modelación se consideran distintos supuestos y simplificaciones que introducen esta discrepancia. Además, los datos de por sí tienen una imprecisión dado que solo representan una muestra.

8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y EXPERIMENTACIÓN

8.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se basa en cambiar levemente las distribuciones de entrada del modelo. En nuestro caso se incrementan y se reducen los parámetros de las distribuciones en un 10% y se revisa si esto tiene un gran impacto en la salida del modelo. Para esto debemos comparar los datos de salida usuales del modelo con los datos de salida al cambiar los parámetros, los datos usuales se pueden observar en la Tabla 7:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
Corrida normal inferior	14.86139	1.501711	2.525746	2.738774
Corrida normal promedio	15.64464	1.541312	2.590897	2.799003
Corrida normal alto	16.42788	1.580913	2.656049	2.859232

Tabla 7: Tiempos normales.

Primero se realizara el análisis de sensibilidad al cambiar la distribución del tiempo que se tardan en llegar de los pedidos nacionales, los resultados se pueden observar en la Tabla 8:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario valvulas	Tiempo en inventario rociadores
Parámetros -10%	14.72296	1.596094	2.573488	2.769131
Parámetros +10%	16.47422	1.503635	2.621676	2.865642
sensibilidad	1.117954	1.16738	0.369813	0.801206

Tabla 8: Tiempo que se tardan pedidos nacionales.

Se nota que esta distribución no afecta demasiado a las salidas del sistema, ya que la sensibilidad se mantiene cerca a 1, lo que nos dice que los cambios en la distribución son proporcionales a los cambios en la salida. Que los pedidos nacionales se demoren un 10% menos reduce el tiempo en el sistema en aproximadamente un 10% y sucede lo contrario cuando se demoran un 10% mas.

Veamos ahora el impacto de modificar los pedidos internacionales en la Tabla 9:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
Parámetros -10 %	15.64464	1.541312	2.590897	2.799003
Parámetros +10 %	15.64464	1.541312	2.590897	2.799003
sensibilidad	0	0	0	0

Tabla 9: Tiempo que se tardan los pedidos internacionales.

Se puede observar que cambiar esta distribución en una escala pequeña no tiene prácticamente ningún impacto sobre las salidas del sistema. Esto se puede deber a los pocos pedidos internacionales y a la espera larga que estos ya tienen de por sí.

Ahora vamos a cambiar las distribuciones de lo que se demoran en armar los pedidos medianos, los resultados se observan en la Tabla 10:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
Parámetros -10 %	15.27085	1.510493	2.558662	2.770336
Parámetros +10 %	15.99355	1.596256	2.668601	2.877562
sensibilidad	0.461347	1.082839	0.843716	0.89015

Tabla 10: Tiempos para armar suministros medianos.

El tiempo para armar suministros pequeños tampoco tiene un impacto demasiado grande en la salida del modelo, ya que la sensibilidad de las diferentes salidas se mantuvo cerca a 1 y fue aun menor para el tiempo promedio en el sistema. Observemos el efecto de realizar estos mismos cambios pero para los suministros pequeños en la Tabla 11:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
Parámetros -10 %	14.29975	1.439449	2.455959	2.689138
Parámetros +10 %	16.86265	1.671163	2.775714	2.959238
sensibilidad	1.636084	2.925609	2.45393	2.242282

Tabla 11: Tiempos para armar suministros pequeños.

A diferencia de los pedidos medianos, los pequeños sí tienen una gran sensibilidad sobre el sistema, ya que se obtuvieron valores para la sensibilidad mayores a 2. Esto nos indica que es muy importante estimar el tiempo que se demoran en realizar los pedidos pequeños de manera más precisa.

Por último, podemos observar el efecto de cambiar la distribución de los tiempos entre llegadas de pedidos en la Tabla 12:

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
Parámetros -10 %	16.71946	1.519562	2.583288	2.804464
Parámetros +10 %	14.38956	1.559216	2.621898	2.808279
sensibilidad	1.487345	0.50067	0.296313	0.031677

Tabla 12: Tiempos entre llegadas.

Como se podría esperar, esta distribución no afecta mucho los tiempos en inventario de los materiales, sin embargo si que tiene un efecto considerable en el tiempo promedio para entregar un pedido, por lo que también es importante estimar esta distribución con buena precisión.

8.2. Análisis de robustez

Las pruebas de robustez consisten en alterar considerablemente las distribuciones del modelo para ver si este funciona en situaciones críticas. Primero veamos la respuesta del modelo cuando el valor p de la distribución binomial negativa se duplica. El resultado se observa en la Tabla 13.

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
$p=8.0$	19.59	1.50	2.53	2.78

Tabla 13: Cambio tiempos entre llegadas.

Se observa que el sistema se comporta parecido al original, lo que muestra que el sistema de rechazo de pedidos maneja bien el sistema cuando hay muchos pedidos.

Veamos ahora en la Tabla 14 que sucede si los tiempos de espera nacionales por los pedidos se duplican.

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
promedio=4(dias)	29.83	1.65	3.89	4.25

Tabla 14: Cambio tiempos de pedidos nacionales.

Como podemos ver ahora si se nota que el sistema es mas sensible a este cambio, ya que los tiempos subieron considerablemente e incluso el tiempo promedio en el sistema subió mas que lo que se demoran extra los pedidos. Sin embargo el modelo sigue obteniendo resultados lógicos, por lo que la lógica del modelo soporta este cambio.

Por ultimo, veamos en la Tabla 15 el resultado de aumentar al doble el tiempo de demora de armar un pedido.

	Tiempo promedio en sistema	Tiempo en inventario tuberías	Tiempo en inventario válvulas	Tiempo en inventario rociadores
promedio=4(días)	37.65	4.22	5.53	5.70

Tabla 15: Cambio tiempos para armar pedidos.

Igual que en el caso anterior, este cambio si es sensible en el sistema ya que aumento mucho los tiempos en inventario y el tiempo promedio en el sistema, pero las salidas del modelo aun son logicas, es decir que el modelo soporta correctamente grandes cambios en las distribuciones del mismo.

8.3. Simulación y optimización

En nuestro modelo vamos a variar los valores de Q y R para tratar de obtener mejores resultados, para aquello utilizaremos de la herramienta *Opt-Quest* de Simul8. Recordemos que nuestro objetivo es minimizar el tiempo en el sistema y al mismo tiempo minimizar el tiempo que los materiales se quedan en el inventario, ya que esto también tiene un costo. En nuestro modelo el tiempo de los materiales en el inventario se ve representado en el tiempo promedio en cola de los materiales de cada tipo. Supondremos que reducir cada una de estas funciones objetivo tiene una importancia similar por lo que vamos a proponer la siguiente función objetivo a minimizar:

$$Min : T\text{-promedio-sistema} + T\text{-promedio-tuberías} + T\text{-promedio-válvulas} + T\text{-promedio-rociadores}$$

Sin embargo cuando minimicemos estos valores queremos disminuir la cantidad de pedidos rechazados en la entrada ya que esto significaría una menor cantidad de ganancias, por lo que se añadirá una restricción la cual es que la cantidad de productos rechazados debe ser menor a la cantidad de productos rechazados en la corrida original (La corrida original rechaza 20 pedidos).

Observemos primero las funciones objetivo que se agregaron en Opt-Quest en la Figura 16

Included?	Objective Variable	Objective
<input checked="" type="checkbox"/>	Tubería: Average Queuing Time	Minimize
<input checked="" type="checkbox"/>	Válvulas: Average Queuing Time	Minimize
<input checked="" type="checkbox"/>	Rociadores: Average Queuing Time	Minimize
<input checked="" type="checkbox"/>	End 1: Average Time in System (2)	Minimize
<input checked="" type="checkbox"/>	Llegada: Number Lost	Minimize

Figura 16: Funciones objetivo.

Los cuales son las mismas funciones objetivo mencionadas anteriormente pero sin ponderarlas aun. En la Figura 17 se observan los rangos que tomamos para variar las variables de decisión:

Included?	Variable	Continuous?	Lower Bound	Suggested Value	Upper Bound	Step
<input checked="" type="checkbox"/>	Q1: Content	<input type="checkbox"/>	64		300	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Q2: Content	<input type="checkbox"/>	26		150	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Q3: Content	<input type="checkbox"/>	25		150	1
<input checked="" type="checkbox"/>	R1: Content	<input type="checkbox"/>	64		300	1
<input checked="" type="checkbox"/>	R2: Content	<input type="checkbox"/>	26		150	1
<input checked="" type="checkbox"/>	R3: Content	<input type="checkbox"/>	25		150	1

Figura 17: Rangos variables de decisión.

Notemos acá que es indispensable que el valor mínimo de Q y R sean mayores a las cantidades de materiales que necesitan los pedidos, ya que de otra manera se pueden realizar pedidos y que aun no hayan suficientes materiales, lo que lleva a que haya un error en el modelo. También fue necesario agregar las restricciones observadas en la Figura 18:

Constraints		
1	Q1: Content	.
	R1: Content	>= 1
2	Q2: Content	.
	R2: Content	>= 1
3	Q3: Content	.
	R3: Content	>= 1

Figura 18: Restricciones variables de decisión.

$Q_i > R_i$ es necesario para que una vez llegan materiales se garantice que la cantidad de materiales actuales sea mayor al punto de reorden. No tendría sentido tener que pedir materiales múltiples veces para salir del punto de reorden.

Con estas configuraciones, podemos ver en la Figura 19 los resultados de las funciones objetivo de las diferentes valores de parámetros:

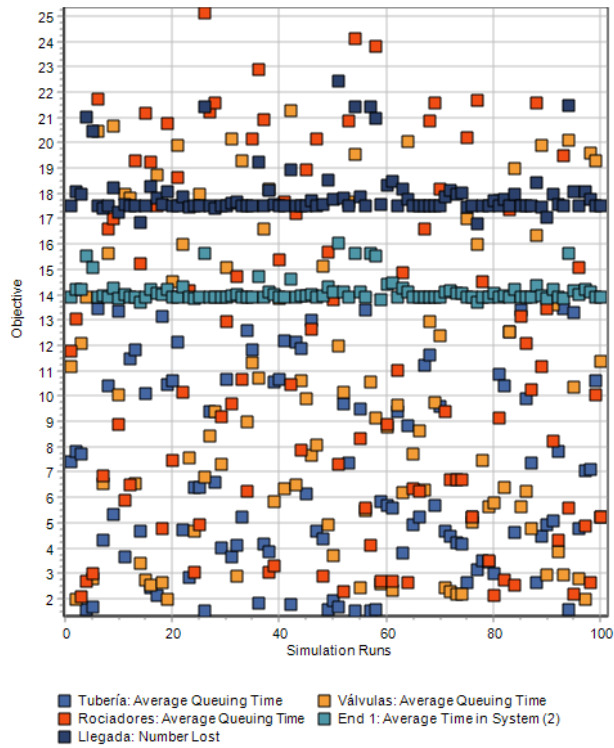


Figura 19: Funciones objetivo.

En el eje x se observan las corridas y en el eje y se grafican las 5 funciones objetivo de una corrida con 5 colores diferentes. De lo anterior se nota que las salidas más constantes son el tiempo promedio en el sistema y la cantidad de pedidos rechazados, mientras que los tiempos en inventario sí son mucho más variables al cambiar Q y R .

Para escoger el mejor resultado, le damos un valor muy alto al resultado cuando la cantidad de pedidos rechazados superó a los 20 y luego graficamos la función objetivo conjunta de los demás resultados, la cual se puede observar en la Figura 20:

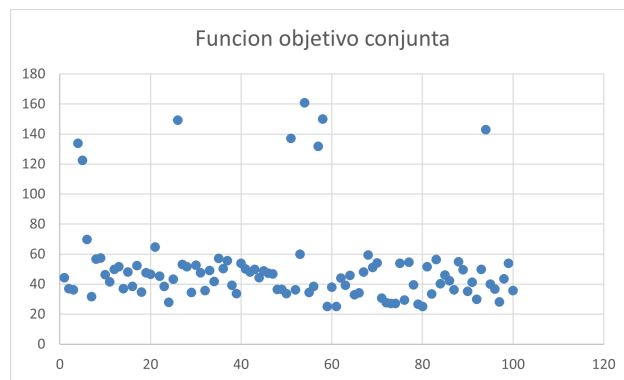


Figura 20: Funciones objetivo conjunta.

En el eje x se observan las corridas y en el eje y la función objetivo y los valores altos en la gráfica son las corridas que no cumplieron la restricción. El mejor valor lo obtuvo la corrida 80, la cual tomó valores para Q_1, Q_2, Q_3 de 97, 49, 26 respectivamente y valores para R_1, R_2, R_3 de 96, 48, 25 respectivamente. Las salidas de esta configuración se pueden observar en la Tabla 16.

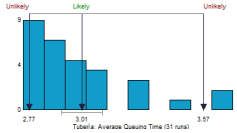
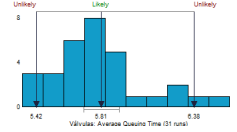
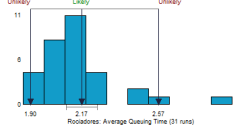
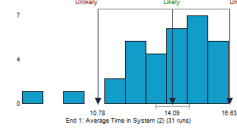
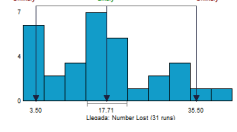
KPIs	Inf 95 %	Promedio	Sup 95 %	Riesgo
Tiempo Cola Tubería	2.92	3.01	3.10	
Tiempo Cola Válvulas	5.71	5.81	5.92	
Tiempo Cola Rociadores	2.09	2.17	2.25	
Tiempo Promedio Sistema (Tipo 2)	13.34	14.09	14.83	
Número Rechazados	13.79	17.71	21.63	

Tabla 16: Intervalos de confianza KPIs óptima.

Es interesante notar que si quitamos la restricción de que los pedidos rechazados sea menor a 20, la solución óptima es ahora la original, es decir utilizar los menores valores posibles para Q y R . En otras palabras, variar los valores de Q, R aumenta considerablemente el tiempo en inventario de los materiales, por lo que solo se deben utilizar valores diferentes a los menores cuando se quiere aumentar la cantidad de pedidos que procesa el sistema.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo pretende evaluar los puntos de reorden y cantidades a ordenar para las materias primas seleccionadas, buscando evaluar el impacto de estos en los tiempos promedio en el sistema para los pedidos. Luego de implementar el modelo mencionado anteriormente se obtuvo que al usar la gestión de inventario JIT, que es la manejada actualmente en la empresa y comparando con los resultados al aplicar la optimización, se encontraron mejores resultados para las salidas de interés. Esto representa una mejora en el comportamiento del sistema debido a que se reducen los tiempos de respuesta para la fabricación del suministro y hay una disminución en los productos rechazados.

Por otro lado, al evaluar la efectividad del modelo los análisis obtenidos muestran un comportamiento esperado como representación de la realidad, a pesar de la poca disponibilidad de datos que representó un

obstáculo para el desarrollo del proyecto. Sin embargo, otras de las limitaciones encontradas en cuanto al diseño del modelo se relacionan con las simplificaciones y supuestos planteados, por ejemplo la clasificación de los pedidos es una imprecisión con respecto a la realidad. Además, no se considera la periodicidad con la cual se revisan los materiales en bodega, a pesar de que es un factor clave para el correcto desarrollo en la gestión de inventarios. Por último, se podría considerar la introducción de costos para medir de manera más detallada la dinámica del sistema.

Finalmente, luego de desarrollar la simulación aplicada a este caso específico, se evidencia que es efectivo el uso de DES en este tipo de problemas. Donde pudimos explorar los objetivos que queríamos alcanzar y tenemos la posibilidad de mejorar el modelo considerando factores que por diversos motivos quedaron fuera del alcance en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Hillier, F. S., y Lieberman, G. J. (1995). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGrawHill, 9na edición, 805-873.
- Wang, Q., y Ingham, N. (2008). *Un enfoque de modelado de eventos discretos para simulación de la cadena de abastecimiento*. Recuperado de https://www.ijssimm.com/Full_Papers/Fulltext2008/text7-3_124-134.pdf
- AR Racking. (2024). *Método Just-in-Time (Justo a Tiempo) en almacén: ¿Qué es y cómo se usa?*. Recuperado de <https://www.ar-racking.com/co/blog/metodo-just-in-time-justo-a-tiempo-en-almacen-que-es-y-como-se-usa/>
- AR Racking. (2024). *Cadena de suministro o Supply Chain: ¿Qué es y características?*. Recuperado de <https://www.ar-racking.com/co/blog/cadena-de-suministro-o-supply-chain-que-es-y-caracteristicas/>
- Ybirma, L. (2017). *Área de diseño para calculo de sistemas de rociadores*. Recuperado de <https://www.contraincendio.com.ve/area-de-diseno-sistemas-de-rociadores/>
- Pulido, A., Ballestas, C., Del Castillo, K., Navarro, M., Fuentes, T., Pizarro, A., Rodríguez, Y. (2021) *Simulación de un Sistema de Inventarios para la Determinación de Niveles de Reposición y de Servicios: Un caso de estudio*. Recuperado de <https://www.iiis.org/CDs2022/CD2022Spring/papers/CB202EE.pdf>
- NFPA (2024). *Códigos y Normas NFPA*. Recuperado de <https://www.nfpa.org/es/for-professionals/codes-and-standards>
- NFPA (2024). *Lista de Códigos y Normas NFPA*. Recuperado de <https://www.nfpa.org/es/for-professionals/codes-and-standards/list-of-codes-and-standards#aq=%40culture%3D%22es>
- Drexmin (2024). *¿Qué es una red contra incendios y qué la conforma?*. Recuperado de <https://drexmin.es/que-es-una-red-contra-incendios-y-que-la-conforma/>
- NFPA (1996). *Norma para la Instalación de Sistemas de Rociadores*. Recuperado de https://www.academia.edu/40263299/NFPA_13_Norma_para_la_Instalaci%C3%B3n_de_Sistemas_de_Rociadores