



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**“OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN  
RESOLVIENDO EL PROBLEMA DE LOT-SIZING A TRAVÉS DEL USO DE  
AGENTES INTELIGENTES”**

POR

**Cristobal Alonso Andrades Balbontin**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía:

Carlos Herrera López, PhD.

Profesor Co-guía:

Patricio Sáez Bustos, PhD.

Marzo 2024

Concepción, Chile

© 2024 Cristobal Alonso Andrades Balbontin

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

## SUMARIO

En el panorama actual de la producción industrial, la optimización y eficiencia en los procesos resultan esenciales para que las organizaciones mantengan su competitividad y sostenibilidad. El "lot-sizing", o dimensionamiento de lotes, se destaca como una herramienta crucial en este contexto. Dicha técnica tiene como objetivo determinar la cantidad óptima de producción, equilibrando costos y asegurando que las demandas se satisfagan de manera adecuada. No obstante, en entornos dinámicos y cambiantes, la aplicación tradicional del "lot-sizing" puede enfrentar desafíos significativos. Es en este escenario donde el trabajo propone una solución innovadora: la integración de agentes inteligentes en el proceso de planificación. Estos agentes, capaces de simular el comportamiento de los distintos componentes de la cadena productiva, operan dentro de NetLogo, una plataforma de modelado y simulación multiagente reconocida por su versatilidad y capacidad para representar sistemas complejos.

El propósito principal de este trabajo es la creación y puesta en marcha de un modelo que utilice agentes inteligentes para optimizar la planificación de la producción utilizando modelos de lot-sizing optimizados a través de modelos multiagente. Para alcanzar este objetivo, se plantean dos metas específicas: diseñar un modelo matemático que sirva como base teórica y que esté centrado en el problema del "lot-sizing"; y implementar un algoritmo basado en agentes inteligentes a través de NetLogo, que permita una solución práctica y eficiente al desafío planteado. Al combinar el "lot-sizing" con la simulación multiagente, se espera obtener no solo una representación más precisa de las decisiones de producción, sino también soluciones más adaptativas y en tiempo real, que respondan a las necesidades cambiantes del mundo industrial.

A lo largo de la investigación, se desarrolló un proceso sistemático e iterativo que utiliza agentes inteligentes para abordar el lot-sizing. Este proceso, que comienza con la definición de variables y culmina con la asignación de lotes a recursos de producción, ha demostrado ser robusto y adaptable a diversos escenarios. Los resultados obtenidos indican que, mediante este enfoque, es posible mejorar significativamente la eficiencia en los procesos de producción. Además, la flexibilidad del modelo permite adaptarse a variaciones y cambios, ofreciendo soluciones optimizadas que responden a las necesidades actuales de la industria.

## SUMMARY

In the current landscape of industrial production, optimization and efficiency in processes are essential for organizations to maintain their competitiveness and sustainability. "Lot-sizing" stands out as a crucial tool in this context. This technique aims to determine the optimal production quantity, balancing costs and ensuring that demands are met adequately. However, in dynamic and changing environments, the traditional application of "lot-sizing" can face significant challenges. It is in this scenario that the work proposes an innovative solution: the integration of intelligent agents into the planning process. These agents, capable of simulating the behavior of the various components of the production chain, operate within NetLogo, a multi-agent modeling and simulation platform known for its versatility and ability to represent complex systems.

The primary purpose of this work is the creation and implementation of a model that uses intelligent agents to optimize production planning using lot-sizing models optimized through multi-agent models. To achieve this goal, two specific objectives are proposed: to design a mathematical model that serves as a theoretical basis and is centered on the "lot-sizing" problem; and to implement an algorithm based on intelligent agents through NetLogo, allowing a practical and efficient solution to the challenge posed. By combining "lot-sizing" with multi-agent simulation, it is expected to obtain not only a more accurate representation of production decisions but also more adaptive and real-time solutions that respond to the changing needs of the industrial world.

Throughout the research, a systematic and iterative process was developed using intelligent agents to address lot sizing. This process, starting with the definition of variables and culminating in the allocation of lots to production resources, has proven to be robust and adaptable to various scenarios. The results obtained indicate that, through this approach, it is possible to significantly improve efficiency in production processes. Additionally, the model's flexibility allows it to adapt to variations and changes, offering optimized solutions that meet the industry's current needs.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1 Motivación .....	10
1.2 Objetivo General .....	11
1.2.1    Objetivos Específicos .....	11
1.3    Justificación del tema .....	11
1.4    Estructura del informe .....	12
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>13</b>
2.1 Sistemas de producción y planificación de la producción.....	13
2.2 Modelación basada en agentes .....	14
2.3 Lot-sizing .....	16
2.4 NetLogo.....	17
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....</b>	<b>19</b>
3.1 Problema a desarrollar.....	19
3.2 Caso base.....	20
3.2.1    Supuestos.....	20
3.2.2    Formulación matemática .....	21
3.2.3    Función Objetivo.....	22
3.2.4    Restricciones .....	22
<b>CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
4.1 Diagrama de flujo.....	24
4.1.1    Diagrama propuesto para la creación del código .....	24
4.2    Programación en NetLogo.....	26
4.2.1    NetLogo.....	26
4.2.2    Modelo.....	27
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS .....</b>	<b>32</b>

5.1 Datos y procesamiento .....32

5.2 Resultados obtenidos .....35

5.3 Análisis de resultados .....37

**CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....40**

6.1 Conclusiones generales .....40

6.2 Trabajos futuros.....41

**CAPITULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....42**

**ANEXOS .....45**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Interacción de los agentes que contribuye al comportamiento emergente del sistema. ....	15
Figura 2.2 Lot-sizing y programación. ....	16
Figura 4.1 Diagrama de flujo. ....	25
Figura 4.2 Creación de los patches. ....	28
Figura 4.3 Creación de las tortugas. ....	29
Figura 4.4 Inputs de periodos y lotes. ....	29
Figura 4.5 Propiedades del agente 0. ....	30
Figura 4.6 Interfaz de usuario del modelo. ....	31
Figura 5.1 Costes totales promedio por tamaño de lote. ....	37
Figura 5.2 Costes promedio de inventario por tamaño de lote. ....	37
Figura 5.3 Costes totales por simulación. ....	38
Figura 5.4 Tiempos de proceso promedio por tamaño de lote. ....	39

## LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Tiempos de producción por producto.....	33
Tabla 5.2 Costos de inventario.....	33
Tabla 5.3 Costos de producto atrasado.....	33
Tabla 5.4 Demanda de los productos.....	34
Tabla 5.5 Costos de producción.....	34
Tabla 5.6 Resultados Lote 100.....	35
Tabla 5.7 Resultados Lote 50.....	35
Tabla 5.8 Resultados Lote 25.....	36
Tabla 5.9 Resultados Lote 10.....	36
Tabla 5.10 Resultados PEM.....	36

**ANEXOS**

Anexo 1: Resultados Lote 100 .....48

Anexo 2: Resultados Lote 50 .....51

Anexo 3: Resultados Lote 25 .....54

Anexo 4: Resultados Lote 10 .....58

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Esta memoria de título presenta una propuesta de optimización de la planificación de la producción mediante el uso de agentes inteligentes. Este capítulo introductorio hace una descripción general de esta propuesta, indicando los antecedentes bases para la mejor comprensión de los temas a tratar, seguido de la especificación de los objetivos general y específicos, la justificación del tema, y una explicación de la estructura del informe.

## 1.1 Motivación

Los sistemas de producción representan un componente esencial en la estructura económica global, adaptándose continuamente para satisfacer las crecientes y cambiantes demandas del mercado. Estos sistemas, complejos en su naturaleza, integran una variedad de operaciones, procesos y recursos que deben funcionar de manera sincronizada y eficiente. A lo largo de las décadas, y a medida que las industrias se han desarrollado y diversificado, la planificación de la producción ha emergido como una disciplina vital. Esta planificación no solo involucra la organización y coordinación de recursos, sino que también se centra en garantizar que la producción se realice de la manera más eficiente y rentable posible, a la vez que satisface las demandas del mercado.

En un sistema de producción, uno de los problemas más importantes en la planificación y control de producción es el dimensionamiento y programación de lotes, es decir, determinar las cantidades de producción, asignación de máquinas (en caso de múltiples máquinas) y secuencia de producción para satisfacer la demanda con los costos mínimos de producción e inventario (Rehman et al., 2019). Este enfoque, aunque parece simple en su esencia, encierra complejidades inherentes, especialmente cuando se consideran los múltiples factores que influyen en las decisiones de producción, tales como costos de preparación, almacenamiento de inventario, variabilidad de la demanda, entre otros. Dependiendo de las necesidades de cada empresa, la técnica de lot-sizing puede adaptarse, ya sea centrada en un solo producto o en una variedad de ellos, y puede responder a demandas y costos que permanecen constantes o que varían con el tiempo.

Dada la importancia estratégica del lot-sizing en el ámbito de la producción, no es sorprendente que su adecuada gestión pueda tener un impacto directo y significativo en la rentabilidad y competitividad de una organización. A lo largo de los años, se han desarrollado y perfeccionado numerosas metodologías para abordar este desafío. Sin embargo, con la evolución de los sistemas de producción y el surgimiento de mercados cada vez más dinámicos, se ha vuelto imperativo encontrar soluciones más innovadoras y adaptativas.

En este contexto, la integración de agentes inteligentes en la solución de problemas de lot-sizing representa una propuesta innovadora. Estos agentes, incorporados en sistemas más amplios denominados sistemas multi-agente, poseen características que les permiten adaptarse y responder a situaciones cambiantes con una eficiencia sin

precedentes. Utilizando plataformas como NetLogo, los agentes pueden simular con gran precisión los comportamientos y decisiones de distintos componentes en un sistema de producción, proporcionando soluciones en tiempo real a los desafíos que enfrentan las industrias modernas. Es particularmente adecuado para modelar sistemas complejos que se desarrollan a lo largo del tiempo. Los modelos de NetLogo se utilizan en una variedad de dominios como la economía, biología, física, química, psicología, dinámica de sistemas y muchas otras ciencias naturales y sociales (Babis & Magula, 2012).

A pesar de las enormes posibilidades que ofrecen estos agentes inteligentes, su aplicación práctica no está exenta de desafíos. Sin embargo, el potencial de combinar la planificación de la producción tradicional con las capacidades avanzadas de los sistemas multi-agente es inmenso. Esta investigación tiene como objetivo profundizar en esta intersección, explorando cómo los principios consolidados de la planificación de la producción pueden beneficiarse y evolucionar mediante la integración de tecnologías basadas en agentes.

## **1.2 Objetivo General**

Implementar un modelo que resuelva el problema de lot-sizing con agentes inteligentes para optimizar la planificación de la producción.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

1. Realizar una revisión de la literatura sobre el método de lot-sizing y el uso de agente inteligentes en la planificación de la producción.
2. Desarrollar un modelo para la planificación de la producción basado en el problema de lot-sizing.
3. Implementar un algoritmo de agentes inteligentes para resolver el problema de lot-sizing.
4. Comparar los resultados obtenidos con el modelo de programación entera mixta del problema de lot-sizing.

## **1.3 Justificación del tema**

La implementación de agentes inteligentes en la planificación de la producción mediante un modelo que optimice las problemáticas de lot-sizing tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia y la precisión del proceso de planificación, lo que puede resultar en una reducción significativa de los costos de producción y una mayor satisfacción del cliente. Además, este tema tiene un importante aporte tecnológico, ya que el uso de NetLogo para implementar los agentes inteligentes permite la simulación de múltiples escenarios y la evaluación de la efectividad de los modelos de planificación de la producción.

## **1.4 Estructura del informe**

La memoria de título es dividida en seis capítulos. El Capítulo 1, titulado "Introducción", aborda los antecedentes generales del problema de Lot-sizing y la implementación de Netlogo, estableciendo el objetivo general y los objetivos específicos del estudio. Además, se justifica el tema y se describe la metodología a ser utilizada en su desarrollo.

En el Capítulo 2, se plantea el "Estado del arte" donde se dan los antecedentes necesarios para entender, de una manera más efectiva los capítulos siguientes, dando información general de los antecedentes del tema.

En el Capítulo 3, denominado "Metodología", se desarrolla el problema en cuestión, presentando un caso base, estableciendo los supuestos y formulando matemáticamente el problema, definiendo la función objetivo y estableciendo las restricciones correspondientes.

El Capítulo 4 se centra en los "Materiales y métodos", donde se presenta un diagrama de flujo y se destaca su importancia, proponiendo un diagrama para la creación del código y detallando la programación en Netlogo.

En el Capítulo 5, denominado "Resultados", se exponen los datos y el procesamiento llevado a cabo durante el estudio, además del análisis de estos resultados.

En, el Capítulo 6, titulado "Conclusiones", presenta las conclusiones derivadas de la investigación realizada.

En el Capítulo 7, titulado "Bibliografía", se presentan las referencias utilizadas.

## **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE**

El objetivo de este capítulo es dar un contexto detallado sobre los temas antecedentes necesarios para entender el desarrollo del modelo de agentes, donde en la sección 2.1 se resume que son los sistemas y la planificación de la producción. La sección 2.2 muestra la modelación basada en agentes y sus beneficios en la industria. La sección 2.3 muestra el lot-sizing y su importancia. Finalmente, la sección 2.4 habla sobre el programa NetLogo y su implementación en los sistemas de producción.

### **2.1 Sistemas de producción y planificación de la producción**

Un sistema de producción se compone de diversos elementos interconectados y organizados, que incluyen desde maquinarias, personal, materiales, hasta procedimientos y métodos de gestión (Niegel & Freivalds, 2004). Estos componentes trabajan de manera conjunta para transformar las materias primas e información en productos o servicios finales, con el objetivo de obtener resultados que cumplan con estándares de calidad, coste y tiempo. Esencialmente, el sistema de producción establece un marco que facilita la descripción y realización de un proceso industrial. Los encargados de operaciones toman decisiones vinculadas a estas funciones y a los métodos de transformación utilizados en la organización. De igual forma, estos sistemas abarcan las actividades cotidianas relacionadas con la obtención y uso de recursos.

En este contexto, la planificación de la producción es fundamental para optimizar el desempeño global de los sistemas de manufactura, en particular cuando se operan en contextos con incertidumbres. Variaciones en la demanda de productos, cambios inesperados en los tiempos de procesamiento y desafíos en la calidad de los insumos son ejemplos de estas incertidumbres que pueden afectar los entornos productivos. Para asegurar un plan de producción sólido y adecuado, es vital incorporar y abordar estas variables inciertas. Si se pasan por alto, la eficacia en la producción y el rendimiento del sistema podrían verse afectados (Hua & Johnson, 2008).

Implementar un nuevo sistema de producción, desde su diseño hasta su puesta en marcha, involucra numerosos elementos y roles dentro de una organización. Estos elementos pueden tener un carácter estratégico, o bien estar relacionados con decisiones de índole técnico y económico. Además, hay factores vinculados a la dimensión ambiental y social del sistema productivo. Hay diversos métodos, modelos y estrategias para gestionar estos elementos, y las principales labores de ingeniería se categorizan en dos áreas:

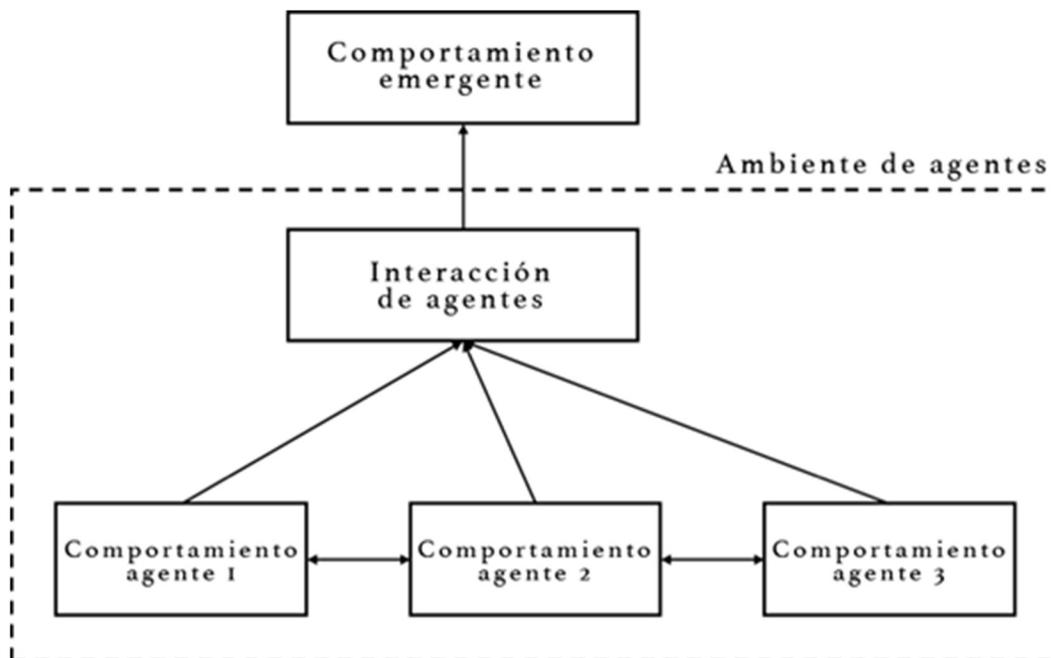
- La organización de la producción y los procesos, determinando cómo se fabricará el producto.
- La planificación de la transformación industrial y las acciones para diseñar o adaptar la producción.

La interacción entre estas dos actividades clave es fundamental. En ocasiones, ambas se fusionan en un único proyecto, aunque también pueden desarrollarse de manera independiente, donde el diseño del producto y la planificación productiva se abordan juntos, y el proyecto de transformación industrial se gestiona de forma paralela (Lindskog et al., 2015).

## **2.2 Modelación basada en agentes**

La simulación basada en agentes ha emergido como una técnica de vanguardia, ocupando un lugar destacado en el ámbito de la simulación computacional. Esta metodología destaca por su habilidad de diseñar espacios virtuales en los cuales agentes, concebidos como entes autónomos y con capacidades de decisión, interactúan en un escenario digital diseñado. En dicho espacio, los agentes llevan a cabo interacciones que buscan simular, con un alto grado de fidelidad, los fenómenos que observamos en la realidad, especialmente aquellos de naturaleza compleja y dinámica (Gilbert, 2008). Pero más allá de ser una mera representación, la simulación basada en agentes busca recrear la complejidad inherente de ciertos sistemas, en los que cada agente, al ser una entidad autónoma, posee su propio conjunto de atributos, decisiones y comportamientos. Al moverse y actuar dentro de este entorno virtual, los agentes están sujetos a un conjunto de reglas predefinidas que guían y condicionan sus acciones e interacciones (Macal & North, 2010).

La capacidad de la simulación basada en agentes para modelar con precisión la heterogeneidad inherente a muchos sistemas es, sin duda, uno de sus atributos más valiosos. A diferencia de modelos más convencionales, que a menudo presuponen uniformidad en las acciones y decisiones de los componentes, la modelación basada en agentes (MBA) reconoce y celebra la diversidad de comportamientos entre agentes. Esta diversidad, lejos de ser un obstáculo, es vista como un recurso valioso que permite la emergencia de patrones y comportamientos a nivel macro, resultantes de las múltiples interacciones a nivel micro. En este sentido, la MBA se erige no solo como una técnica alternativa, sino como un paradigma en sí mismo, con claras distinciones frente a otros métodos de simulación, como la simulación de eventos discretos (SED) o la dinámica de sistemas (DS). Es importante recalcar que, aunque la optimización puede ser una aplicación derivada de la MBA, su finalidad primordial es proporcionar insights y comprensiones profundas sobre cómo las interacciones a nivel local pueden generar comportamientos emergentes en sistemas complejos, permitiendo así un entendimiento más holístico y contextualizado (Macal & North, 2010). La Figura 2.1 ilustra cómo las acciones de los agentes conducen al comportamiento global del sistema.



**Figura 2.1 Interacción de los agentes que contribuye al comportamiento emergente del sistema.**

**Fuente: Araya (2020)**

En este panorama, los agentes digitales actúan como espejos de las entidades del mundo real, estableciendo un puente entre la realidad y el mundo virtual, lo que facilita no solo la construcción de modelos sino también su posterior análisis y comprensión (Gilbert, 2008). Es vital subrayar que mientras muchos modelos presuponen comportamientos uniformes entre actores, la realidad nos muestra una diversidad intrínseca en términos de objetivos, percepciones y capacidades. La MBA se destaca por su habilidad para capturar y representar esta diversidad, permitiendo que cada agente tenga sus propias características y comportamientos distintivos.

Al abordar sistemas de producción desde la perspectiva de la simulación basada en agentes, es esencial considerar tres pilares: un conjunto definido de reglas que orientan las acciones de los agentes; variables que reflejan el estado actual de estos agentes; y un mecanismo que interpreta y aplica dichas reglas en el contexto de la simulación (Nils, 1998). En este esquema, es fundamental que cada agente, basándose en su contexto y situación actual, pueda discernir y adoptar una regla de comportamiento del conjunto disponible. Estos elementos, en conjunto, ofrecen una representación detallada y profunda de los sistemas de producción, abriendo puertas a nuevos insights y estrategias de mejora.

## 2.3 Lot-sizing

Los sistemas de producción y gestión de operaciones han evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, y uno de los conceptos fundamentales que ha permanecido en el núcleo de estas operaciones es el de "Lot-size". Esta idea se refiere específicamente a la determinación de la cantidad precisa de un artículo que será adquirido a un proveedor o que será producido internamente para cubrir una demanda específica (Viale, 1996). Tal decisión, a simple vista, podría parecer trivial, pero en realidad, la técnica de "Lot-sizing" (Roy, 2005) es una estrategia crucial que tiene profundas ramificaciones en la eficiencia y economía de la producción. Sollish & Semanik (2007) la describen como una estrategia de pedido de inventario, esencialmente un método detallado y estudiado para decidir con precisión cuánto material se debe ordenar y cuándo debe ser entregado para optimizar la producción y minimizar los costos.

Para visualizar y comprender mejor cómo se interconecta el "lot-sizing" con otras facetas de la producción, la Figura 2.2 es ilustrativa. En esta representación, se muestra un escenario donde tres productos distintos, etiquetados como a, b y c, están programados para ser producidos en dos máquinas diferentes durante cuatro períodos. Este gráfico no solo destaca las cantidades de producto determinadas por el "lot-sizing", sino que también pone de relieve la importancia de la programación al considerar detalles más granulares, como las máquinas específicas utilizadas y la secuencia exacta de producción.

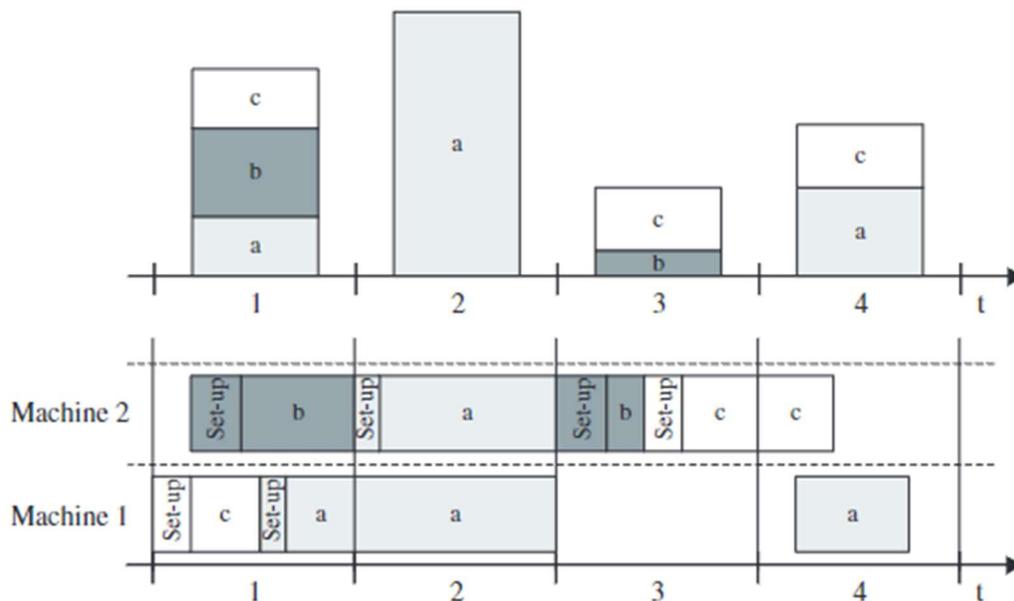


Figura 2.2 Lot-sizing y programación.

Fuente: Quadt & Kühn (2005)

Abordar el desafío del "lot-sizing" y la programación implica tener claridad sobre los objetivos que guían estas decisiones. En este estudio, se destacan principalmente dos objetivos:

- **Minimizar los costos totales:** Este representa el núcleo de las decisiones económicas en el proceso. En el contexto de la producción, los costos totales abarcan una amplia gama de elementos, desde el mantenimiento del inventario y los costos asociados a pedidos pendientes hasta los costos de configuración.
- **Optimizar el tiempo de flujo a través del sistema:** Mientras se busca acelerar el proceso productivo, se reconoce la importancia de garantizar que cada etapa del proceso sea eficiente y fluida.

Dentro de este marco, el tiempo de flujo de un trabajo se extiende desde el inicio de la producción hasta su conclusión. El objetivo es reducir al máximo las demoras y tiempos de espera, lo que tiene el efecto secundario beneficioso de minimizar el trabajo en proceso y los costos de inventario relacionados. Estos objetivos, cuando se persiguen en conjunto, buscan no solo una eficiencia económica sino también operacional, garantizando que la producción se lleve a cabo en el momento adecuado, utilizando la capacidad al máximo y cumpliendo con las fechas de entrega programadas. Esta intersección de economía y eficiencia es donde el "lot-sizing" y la programación demuestran su verdadero valor en la cadena de producción.

## 2.4 NetLogo

NetLogo es un lenguaje de programación multiagente y un entorno de modelado para simular fenómenos complejos. Está diseñado tanto para investigación como para educación y se utiliza en una amplia gama de disciplinas y niveles educativos (Chiacchio et al., 2014). Su versatilidad ha permitido que sea adoptada en una variedad de campos y disciplinas, desde la ecología y la biología hasta las ciencias sociales y, por supuesto, la ingeniería industrial. Su arquitectura y diseño, centrados en la facilidad de uso y la capacidad de representar agentes autónomos que interactúan entre sí, lo hacen ideal para abordar problemas como el de lot-sizing.

Dentro de NetLogo, la creación y manipulación de agentes inteligentes se vuelve una tarea intuitiva, permitiendo a los usuarios modelar con precisión comportamientos y decisiones específicas basadas en la información y el entorno del agente. Por ejemplo, aparte de representar máquinas de producción, los agentes también podrían personificar a proveedores, transportistas o incluso consumidores finales, cada uno con sus propias reglas y lógicas de operación, adaptándose dinámicamente a las circunstancias cambiantes del sistema.

Otra fortaleza de NetLogo radica en su capacidad para simular interacciones multi-agentes. Esta característica es especialmente valiosa al considerar cadenas de producción, donde la sinergia y el flujo adecuado entre los diferentes componentes pueden marcar la diferencia entre una operación eficiente y una ineficiente. A través de la simulación, es posible visualizar cómo las decisiones autónomas de los agentes individuales impactan en el sistema en su conjunto, y cómo ciertas estrategias o políticas pueden influir en el comportamiento global del sistema.

Con todo ello, queda claro que NetLogo tiene un gran potencial en el ámbito de la planificación de la producción y específicamente en problemas como el de lot-sizing. Sin embargo, como toda herramienta, su uso adecuado requiere de un entendimiento profundo tanto de sus capacidades como de sus limitaciones. Así, mientras que NetLogo abre nuevas puertas para la investigación y la optimización en la planificación de la producción, también invita a los investigadores a explorar, experimentar y, en última instancia, innovar en cómo abordamos y resolvemos estos desafíos en la era moderna.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

El objetivo de este capítulo es dar a conocer el problema a desarrollar y en caso base de estudio en el que se basara el modelo de NetLogo, además de definir la función objetivo, supuestos y sus restricciones.

### 3.1 Problema a desarrollar

Un problema de lot-sizing multiartículo con recursos paralelos, tiempos de preparación y costos es un problema de optimización complejo que se encuentra comúnmente en la planificación de la producción.

A continuación, se muestran las definiciones y una breve explicación del tipo de problema a estudiar:

- **Lot-sizing problem:** Este es un problema de decisión que implica determinar la cantidad de un producto que se debe producir (o comprar, en un contexto de adquisiciones) en un período de tiempo dado para minimizar los costos totales, que pueden incluir costos de producción, costos de almacenamiento y costos de configuración.
- **Capacitados:** Esto significa que hay una capacidad máxima que no puede ser excedida. En el contexto de la producción, esto podría referirse a la capacidad máxima de producción de una fábrica o máquina.
- **Multiartículo:** Esto significa que el problema implica más de un tipo de artículo o producto. Cada producto puede tener diferentes costos de producción, costos de almacenamiento, tiempos de preparación y demandas.
- **Recursos paralelos:** Esto significa que hay múltiples recursos (por ejemplo, máquinas o trabajadores) que pueden trabajar simultáneamente para producir los productos.
- **Tiempos de preparación:** Estos son los tiempos requeridos para preparar un recurso para la producción, como el tiempo necesario para configurar una máquina para producir un tipo específico de producto.
- **Costos:** Esto se refiere a los diferentes costos asociados con la producción, incluyendo costos de producción, costos de almacenamiento y costos de configuración.

Por tanto, este problema implica determinar la cantidad de cada producto a producir en cada período de tiempo, teniendo en cuenta las capacidades de producción, los tiempos de preparación y los costos, con el objetivo de minimizar el costo total.

## 3.2 Caso base

Esta investigación se basa en el trabajo de Maafa y Sari (2022) como referencia principal para realizar nuestro propio estudio y desarrollar una simulación en NetLogo. El estudio de caso presenta un algoritmo sistemático para abordar el desafiante problema de lot-sizing en la industria de fabricación. Este algoritmo tiene en cuenta factores como costos de producción, costos de almacenamiento y costos de configuración, y establece restricciones relacionadas con el equilibrio de material, capacidad de producción y satisfacción de la demanda total. Al utilizar este estudio como base, se busca comprender en profundidad el algoritmo propuesto y complementarlo en NetLogo. A partir de esta comprensión, se desarrolla un modelo en NetLogo que refleje fielmente las características y restricciones del algoritmo original, generando un algoritmo general en el cual se podrán cambiar los parámetros iniciales para ser usado en cualquier problema de este tipo. A través de pruebas y ajustes, se busca validar y mejorar el modelo de NetLogo para obtener resultados precisos en el presente estudio.

### 3.2.1 Supuestos

El modelo hace los siguientes supuestos:

1. El horizonte de planificación se divide en  $T$  períodos de la misma longitud.
2. La demanda de cada producto siempre debe ser satisfecha en cada período.
3. La demanda de cada período se conoce con anticipación.
4. La capacidad de almacenamiento es infinita.
5. La capacidad de cada estación de producción es limitada.
6. Cada estación de producción puede producir ciertos tipos de productos.
7. Cada estación de producción tiene una velocidad por producto, lo que significa que un producto puede ser producido con diferentes tiempos de producción en diferentes estaciones de producción.
8. Cada producto tiene un tiempo y costo de configuración, y un tiempo y costo de producción dependientes de la estación de producción donde se fabrica.
9. Cada estación de producción tiene un costo de lanzamiento.
10. Una estación de producción se lanza con la primera configuración de producto en ella y permanece encendida hasta el final del horizonte de planificación.

### 3.2.2 Formulación matemática

Los parámetros utilizados en este modelo son:

- $i$ : Índice del artículo (de 1 a  $I$ ).
- $m$ : Índice de la estación de producción (de 1 a  $M$ ).
- $p$ : Índice de los períodos (de 1 a  $P$ ).
- $K_{im}$ : Un booleano que toma 1 si el producto  $i$  puede ser producido en la estación de producción  $m$ , de lo contrario 0.
- $PC_{imp}$ : El costo de producir el artículo  $i$  en la estación de producción  $m$  en el período  $p$ .
- $HC_i$ : El costo de mantenimiento del artículo  $i$ .
- $LC_m$ : Costo de lanzamiento de la estación de producción  $m$ .
- $SC_i$ : Costo de configuración del artículo  $i$ .
- $D_{ip}$ : Demanda del artículo  $i$  en el período  $p$ .
- $ST_i$ : Tiempo de configuración del artículo  $i$ .
- $PT_{im}$ : Tiempo de producción del artículo  $i$  en la estación de producción  $m$ .
- $C_{mp}$ : Capacidad de producción de la estación  $m$  en el período  $p$ .

Las variables de decisión utilizadas en el modelo son:

- $q_{imp}$ : Cantidad de producción del artículo  $i$  en la estación de producción  $m$  en el período  $p$ .
- $x_{imp}$ : Una variable binaria que toma 1 si el artículo  $i$  se produce en la estación de producción  $m$  en el período  $p$ , de lo contrario 0.
- $s_{ip}$ : El nivel de inventario del artículo  $i$  al final del período  $p$ .
- $lc_{mp}$ : Una variable binaria que toma 1 si la estación de producción  $m$  se lanza en el período  $p$ , de lo contrario 0.

Las variables de decisión  $x_{imp}$  y  $lc_{mp}$  son binarias, mientras que  $q_{imp}$  y  $s_{ip}$  son variables de decisión enteras positivas.

### 3.2.3 Función Objetivo

La función objetivo se formula para minimizar el costo total de producción, que incluye los costos de producción, los costos de lanzamiento de las estaciones de producción, los costos de configuración de los artículos y los costos de almacenamiento. Esto se logra satisfaciendo todas las demandas y respetando las restricciones de capacidad. La función objetivo se formula según la Ecuación (1).

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P PC_{imp} q_{imp} K_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P LC_m lc_{mp} + \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P SC_i x_{imp} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P HC_i s_{ip} \quad (1)$$

### 3.2.4 Restricciones

$$s_{ip} = s_{ip-1} + \sum_{m=1}^M q_{imp} - D_{ip} \quad \forall i, p \quad (2)$$

$$s_{i1} = \sum_{m=1}^M q_{im1} - D_{i1} \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I (q_{imp} PT_{im} + x_{imp} ST)_i \leq C_{mp} \quad \forall m, p \quad (4)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M q_{imp} = \sum_{p=1}^P D_{ip} \quad \forall i \quad (5)$$

$$q_{imp} \leq K_{im} x_{imp} \sum_{p=1}^P D_{ip} \quad \forall i, m, p \quad (6)$$

$$lc_{m1} \geq \max x_{im1} \quad \forall m \quad (7)$$

$$lc_{mp} \geq \max x_{imp} - \sum_{t=2}^p lc_{mt-1} \quad \forall m, p > 1 \quad \forall i \quad (8)$$

$$q_{imp} \geq 0 \quad \forall i, m, p \quad (9)$$

$$s_{ip} \geq 0 \quad \forall i, p \quad (10)$$

$$x_{imp} \in \{0, 1\} \quad \forall i, m, p \quad (11)$$

$$lc_{mp} \in \{0, 1\} \quad \forall m, p \quad (12)$$

Las restricciones (2) y (3) son restricciones de balance de material que garantizan que la demanda puede ser satisfecha ya sea por la producción en el mismo período o por el stock del período anterior. Las restricciones (4) es una restricción de capacidad de producción para cada estación de producción y por período. Las restricciones (5) asegura la satisfacción de la demanda total a lo largo del horizonte de planificación. Las restricciones (6) presenta la relación entre la cantidad producida para el artículo  $i$  en la estación de producción  $m$  en el período  $p$  y la configuración de este artículo en esta estación de producción y en este período. Las restricciones (7) obliga al lanzamiento de la estación de producción  $m$  en el primer período si se configura al menos un artículo, si este es el caso y si hay una producción en un período anterior, la estación de producción no se lanza una segunda vez. Esto puede ser formulado por la ecuación general (8) para cada estación de producción  $m$  y en cada período  $p$ . Las restricciones (9) y (10) declaran la no negatividad de las variables y las restricciones (11) y (12) expresan el carácter binario de las variables. Estas restricciones son fundamentales para garantizar que el modelo funcione correctamente y produzca resultados útiles y aplicables. La violación de cualquiera de estas restricciones podría resultar en un plan de producción que no sea factible o que no cumpla con los requisitos de demanda y capacidad.

## **CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS**

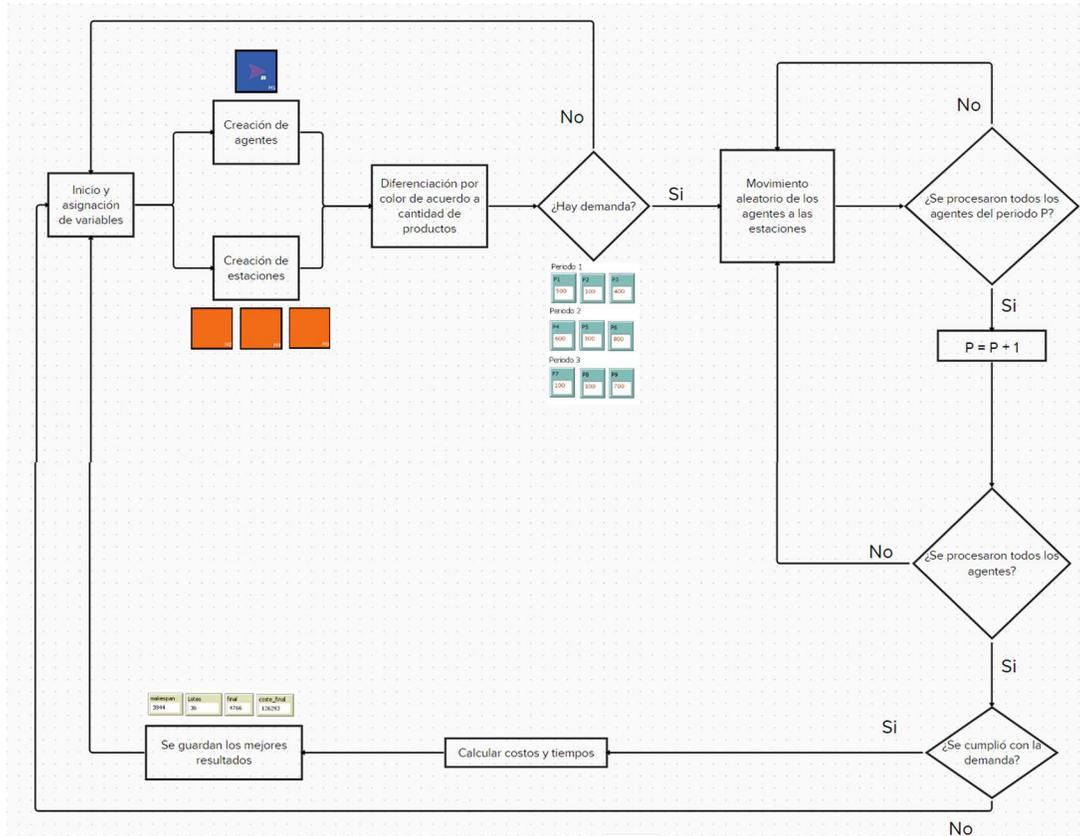
El objetivo de este capítulo es el dar a conocer los diagramas y programas, creados y utilizados en la creación del modelo que resuelve el problema de lot-sizing. En la sección 4.1 se detalla el diagrama de flujo creado, donde se explican los pasos a seguir del modelo, y luego en la sección 4.2 se entrega una descripción del programa NetLogo y el funcionamiento del modelo.

### **4.1 Diagrama de flujo**

#### **4.1.1 Diagrama propuesto para la creación del código**

La Figura 4.1 representa el diagrama de flujo propuesto para la solución de un problema de lot-sizing utilizando agentes inteligentes. Este diagrama de flujo es una representación visual de los pasos que se siguen para resolver el problema.

Se inicia con la asignación de los valores iniciales a las variables, para posteriormente crear los agentes y estaciones correspondientes. Después los agentes son diferenciados por color de acuerdo a la cantidad de tipos de productos que se crearon con anterioridad. Se verifica si hay demanda, si no hay se vuelve al inicio, en caso contrario se avanza al movimiento de los agentes a las estaciones, se verifica si todos los agentes del periodo  $p$  se procesaron y avanza un periodo sumándole una unidad al periodo, al finalizar se verifica si se cumple la demanda y se calculan tiempos y costos asociados a la simulación, para finalizar guardando los mejores resultados.



**Figura 4.1 Diagrama de flujo.**

**Fuente: Elaboración propia**

En el marco de esta investigación, se presenta un enfoque metódico y altamente eficiente para abordar el desafío del lot-sizing en entornos de producción mediante la aplicación de agentes inteligentes. El proceso se inicia con la definición de variables globales fundamentales, como la demanda total estimada y el número de períodos de tiempo a considerar. Estas variables proporcionan el fundamento inicial esencial para la simulación y toma de decisiones dentro del proceso de producción. Posteriormente, se procede a la creación de estaciones de trabajo y agentes, que representan lotes individuales de producción. Cada agente se distingue por medio de colores, lo que simplifica su identificación y seguimiento a lo largo de los múltiples períodos de tiempo. Esta característica de identificación visual es crucial para comprender y analizar cómo se asignan los lotes a las estaciones de trabajo en función de la demanda actual y los recursos disponibles.

Una vez establecido este marco inicial, se lleva a cabo la asignación de lotes a las estaciones de trabajo, lo que refleja la asignación dinámica de recursos de producción en función de la demanda y las condiciones operativas. Si existe demanda durante el período actual, los agentes se desplazan aleatoriamente hacia las estaciones de trabajo disponibles en ese momento, representando una estrategia de asignación adaptable para garantizar la eficiencia de la producción. Cuando todos los agentes correspondientes al período actual han sido procesados, se incrementa el contador del

período y el proceso continúa hasta que todos los lotes hayan sido asignados y producidos. Si la demanda se cumple en todos los períodos, los resultados se registran como una solución viable, y se inicia una nueva iteración del proceso para explorar configuraciones adicionales. En resumen, este enfoque sistemático, apoyado por la inteligencia de agentes, proporciona un marco sólido y versátil para resolver el problema de lot-sizing, permitiendo adaptarse a diversos escenarios y condiciones operativas, con el objetivo de encontrar soluciones óptimas que puedan mejorar significativamente la eficiencia y la capacidad de respuesta de los procesos de producción en entornos industriales en constante evolución.

## 4.2 Programación en NetLogo

### 4.2.1 NetLogo

Dentro del dominio de la modelización y simulación multiagente, NetLogo ha surgido como una herramienta destacada desde su concepción propuesta por Wilensky (1999) en el Centro de Conexiones CCL de la Northwestern University. Su reconocimiento en campos investigativos y académicos se debe a su habilidad para representar fenómenos complejos basados en agentes.

Con NetLogo, es posible observar en tiempo real las interacciones y comportamientos de los agentes dentro de un entorno determinado, lo que se denomina "Visualización Dinámica". Además, la plataforma ofrece la posibilidad de personalizar cada agente definiendo reglas y comportamientos específicos, lo que facilita la modelización de sistemas complejos. Una de las fortalezas adicionales de NetLogo es su vasta biblioteca de modelos preestablecidos, que abarcan áreas tan diversas como la biología y las ciencias sociales.

Esta plataforma, ofrece un espacio ideal para investigar y comprender una variedad de fenómenos, desde comportamientos en la naturaleza hasta procesos complejos en la industria. Al explorar cómo funciona NetLogo, se encontró un entorno donde los elementos básicos, como los agentes y su entorno, se combinan para crear interacciones detalladas. Esto ayuda a comprender mejor los sistemas que pueden parecer muy complicados a simple vista. En la siguiente sección, se detallarán las características clave de NetLogo.

- **Agentes (Turtles):** Representan individuos o entidades que interactúan en el sistema.
- **Parches (Patches):** Forman el entorno donde los agentes operan, cada uno con sus propias características.
- **Variables:**
  1. **Globales:** Controlan condiciones o parámetros generales del modelo.

2. **Locales:** Pertenecen a agentes individuales o patches.

- **Tiempo y Ticks:** Unidades de tiempo para avanzar la simulación.

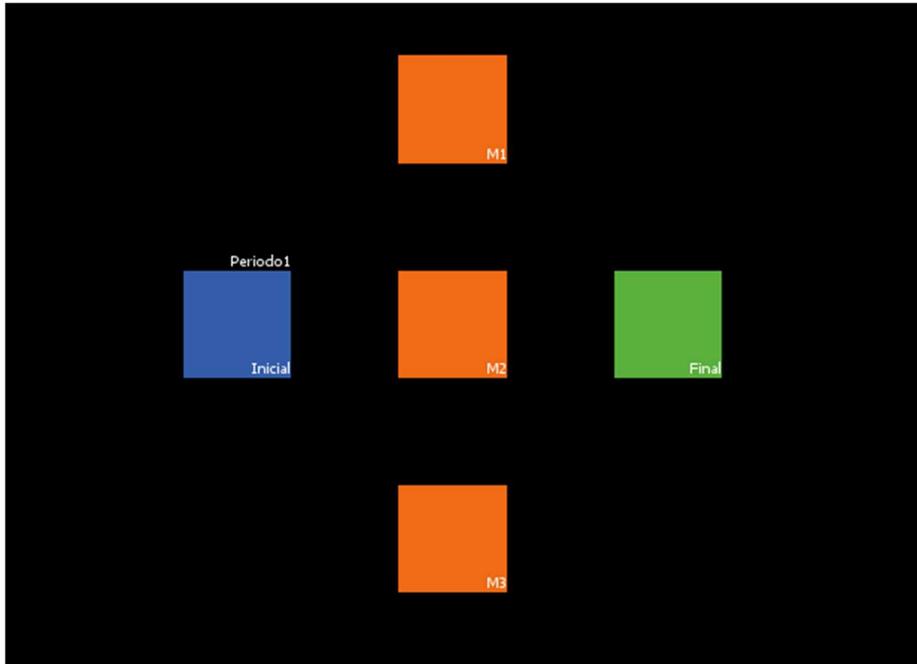
Bajo este contexto se ha desarrollado un modelo en NetLogo basado en el estudio de caso. Este modelo, que refleja fielmente las características y restricciones del algoritmo original y representa un avance significativo en la resolución del problema de lot-sizing en la industria de fabricación. Se ha demostrado que, a través de un proceso sistemático y detallado de programación y pruebas, es posible adaptar y el algoritmo original para su implementación en NetLogo. Este enfoque permite cambiar los parámetros iniciales y aplicar el algoritmo a una variedad de problemas de lot-sizing, lo que demuestra la flexibilidad y la eficacia de NetLogo como herramienta de modelado y simulación.

#### 4.2.2 Modelo

El modelo comienza con la creación de los “Patches”, estos son estáticos y tienen sus propias propiedades. Para este trabajo, se generan patches de color azul, naranja y verde, azul para los lugares que definen el inicio del proceso, naranja para las maquinas que en este caso son “M1”, “M2” y “M3” y por último patches verdes los cuales marcan el final del proceso. Los patches creados son diferenciados por color, tiempos de proceso, coordenadas, periodo y nombre.

- **Patch de color azul:** Indican el inicio del modelo, los agentes se inician en “Inicial”.
- **Patch de color naranja:** Son las maquinas en donde cuales los agentes se procesan de acuerdo a sus tiempos de proceso.
- **Patch de color Verde:** Indica el final del modelo.

La Figura 4.2 nos muestra la interfaz de un periodo en NetLogo.



**Figura 4.2 Creación de los parches.**

**Fuente: Elaboración propia en Netlogo**

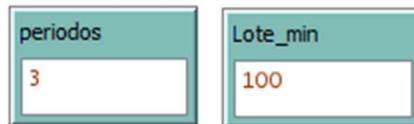
En la segunda etapa del proceso se crean los agentes o “tortugas”, estos agentes son capaces de desplazarse por cualquier espacio del mundo (sobre parches o sobre otros agentes). En nuestro caso cada agente representa un lote de producto, el cual puede ser variable dependiendo el valor inicial que se le dé, los agentes se mueven a las máquinas representadas en color naranja, cada lote de agentes tiene un color distinto para ser representados mejor de forma visual. En la Figura 4.3 se muestran los agentes creados, diferenciados por su color.



**Figura 4.3 Creación de las tortugas.**

**Fuente: Elaboración propia en Netlogo**

Además, como se muestra en la Figura 4.4 se tienen unos “Inputs” en la interfaz del modelo, los cuales nos permiten modificar el número de periodos y el lote mínimo de los agentes.



**Figura 4.4 Inputs de periodos y lotes.**

**Fuente: Elaboración propia en Netlogo**

Cada agente tiene sus propiedades asignadas al inicio después de la configuración, las mas importantes son sus coordenadas (X, Y), color, su tamaño, el periodo al que pertenece, el tipo de producto y el tiempo de proceso como se muestra en la Figura 4.5. El tamaño se asigna de acuerdo a la demanda y al lote mínimo establecidos al inicio de la simulación y es lo que se utiliza para calcular el inventario, costes y tiempos de procesos.

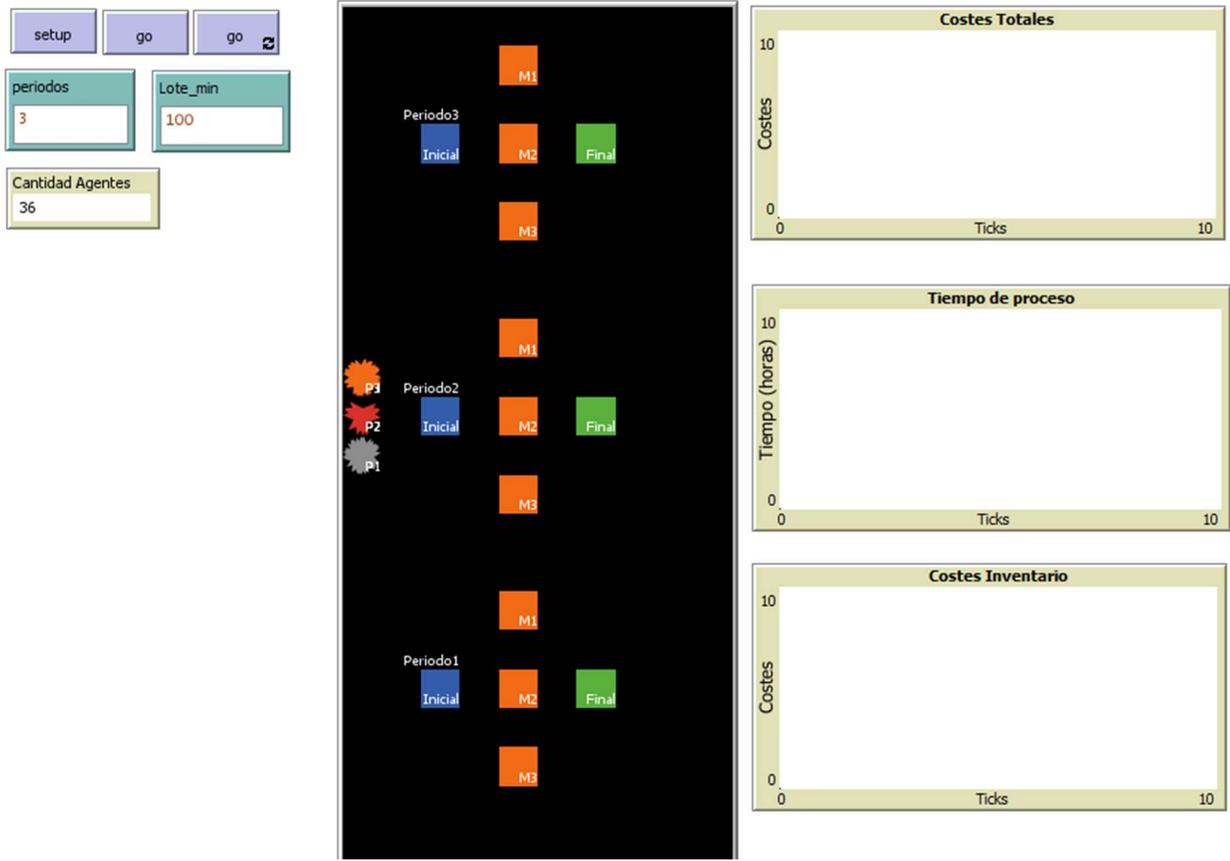
▼ Properties	
who	0
color	5
heading	319
xcor	-4
ycor	4
shape	"default"
label	"P1"
label-color	9.9
breed	walkers
hidden?	false
size	1
pen-size	1
pen-mode	"up"
tamaño	100
periodowalker	1
tipo	1
tp	0

**Figura 4.5** Propiedades del agente 0.

**Fuente:** Elaboración propia en Netlogo

Para usar el modelo es necesario presionar los siguientes botones que se muestran en la Figura 4.6.

- Setup: Crea el diagrama y los agentes correspondientes asignando los valores iniciales.
- Go: Al presionar este botón sucederá un tick, moviendo en primera instancia los agentes a los patches iniciales y posteriormente a las máquinas para que sean procesados y den resultados.
- Go (continuo): Misma función que el botón “Go” pero generara una cantidad indefinida de ticks.



**Figura 4.6** Interfaz de usuario del modelo.

**Fuente:** Elaboración propia en Netlogo

Como se muestra en la Figura 4.6 la interfaz de usuario se muestra de una manera amigable al usuario, pudiendo entender de una manera visualmente sencilla como la simulación se lleva a cabo, siendo una ventaja en comparación a otras maneras de resolver el problema de lot-sizing.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS**

En este capítulo se presenta y se discuten los principales resultados obtenidos en el modelo creado en NetLogo. El experimento computacional fue ejecutado tomando como base el caso de estudio de Maafa y Sari (2022) cual consiste en un modelo que minimiza el coste total usando diferentes tamaños de lote. En la sección 5.1 están los datos empleados, la sección 5.2 muestra los resultados obtenidos en el modelo, y finalmente, en la sección 5.3 se analizan los resultados obtenidos.

### **5.1 Datos y procesamiento**

La simulación y análisis utiliza datos extraídos directamente del trabajo de Maafa y Sari (2022), donde se proporciona información valiosa y detallada relevante para este estudio. La riqueza de estos datos, que abarcan una variedad de parámetros y variables, incluyendo tiempos de producción por producto, costos y tiempos de ensamblaje, costos de almacenamiento de inventario, proyecciones de demanda para distintos periodos y costos generales de producción, ha permitido replicar de forma precisa las condiciones y desafíos que se presentan en contextos reales de producción, brindando un escenario fidedigno y adecuado para la evaluación del modelo propuesto.

Una vez que los datos tabulados se incorporaron al código de NetLogo, se llevaron a cabo múltiples simulaciones, explorando una variedad de escenarios y resultados basados en los parámetros previamente definidos.

Con las simulaciones completadas, el análisis detallado de los resultados emergió como el paso final y crucial en el estudio. Este análisis no solo buscó el identificar costos y tiempos óptimos, sino también comprender en profundidad las dinámicas y patrones revelados por las simulaciones. El análisis tiene como objetivo fundamental extraer insights valiosos que permitieran discernir las estrategias y decisiones más rentables y eficientes en el contexto de la planificación de la producción. Las conclusiones y hallazgos derivados de este proceso de simulación y evaluación son presentados y discutidos en las secciones siguientes de este trabajo.

A continuación, se presentarán una serie de resultados que contienen los datos específicos utilizados en este estudio. Estos resultados proporcionan una visión detallada de los parámetros y variables que se han considerado en el modelo de simulación. Entre estos datos se incluyen los tiempos de producción para cada producto en cada estación, el costo de producción, el costo de inventario de los productos, el costo por producto atrasado y la demanda de estos para los tres periodos.

La Tabla 5.1 nos indica los tiempos de producción de cada producto en su respectiva estación (máquina).

<b>Tiempos de producción (Horas)</b>			
<b>Item</b>	<b>Estación 1</b>	<b>Estación 2</b>	<b>Estación 3</b>
Producto 1	0.218	0.191	0
Producto 2	0.411	0.224	0.62
Producto 3	0.470	0.460	0.560

**Tabla 5.1 Tiempos de producción por producto.**

**Fuente: Elaboración propia**

La Tabla 5.2 nos indica el costo de inventario de los productos.

<b>Costo de inventario de los productos (CLP)</b>	<b>Producto 1</b>	<b>Producto 2</b>	<b>Producto 3</b>
Costo	661	1746	904

**Tabla 5.2 Costos de inventario.**

**Fuente: Elaboración propia**

La Tabla 5.3 muestra el costo por producto atrasado.

<b>Costo de producto atrasado (CLP)</b>	<b>Producto 1</b>	<b>Producto 2</b>	<b>Producto 3</b>
Costo	904	661	1746

**Tabla 5.3 Costos de producto atrasado.**

**Fuente: Elaboración propia**

La Tabla 5.4 nos indica la demanda usada en el modelo, esta dividida por semana y producto.

<b>Demanda</b>			
<b>Item</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>
Producto 1	500	600	100
Producto 2	100	300	100
Producto 3	400	800	700

**Tabla 5.4 Demanda de los productos.**

**Fuente: Elaboración propia**

Finalmente, la Tabla 5.5 nos muestra los costes de producción de los productos en sus estaciones correspondientes.

<b>Costes de producción (CLP)</b>			
<b>Item</b>	<b>Estación 1</b>	<b>Estación 2</b>	<b>Estación 3</b>
Producto 1	2964	3079	0
Producto 2	7838	7738	7710
Producto 3	4136	4118	4155

**Tabla 5.5 Costos de producción.**

**Fuente: Elaboración propia**

Se agregaron costos por producto atrasado, ya que el no utilizar la restricción de tener que cumplir la demanda en cada periodo obligatoriamente el modelo podría hacer simulaciones en casos donde no se pueda llegar a esta demanda, reflejando un escenario más realista de lo que sucede en las industrias. Esto se debe a que el modelo está diseñado para que gracias a la interacción entre agentes estos tengan un comportamiento mucho más realista, llegando a un resultado factible, siendo comparado con un modelo de programación entera mixta (PEM) que nos entrega el óptimo.

Cabe destacar que las condiciones de ejecución de los métodos fueron:

- Google Colab: Cuenta con guardado automático en la nube y compatibilidad con Google drive, proporciona 12,68 GB de RAM.

- Netlogo: Las pruebas en este software se llevaron a cabo en un computador de escritorio con las siguientes características relevantes: Procesador Ryzen 5 5600x 3700 MHz – 4600 MHz, 32,0 GB de RAM, Sistema operativo de 64 bits, procesador x64, Windows 11 Pro 21H2.

## 5.2 Resultados obtenidos

Las Tablas y Figuras a continuación presentan los resultados promedios obtenidos por los métodos anteriormente seleccionados (PEM y Modelo Netlogo), los resultados completos están en anexos. La cantidad de simulaciones que se hizo para cada lote fue de 100.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados promedios de costes y tiempo de proceso para la simulación con lote mínimo de 100 unidades de producto.

<b>Cantidad de Simulaciones (100)</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.550.213,00</b>	<b>1.069.451,40</b>	<b>15.480.761,60</b>	<b>1.411,07</b>

**Tabla 5.6 Resultados Lote 100.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados promedios de costes y tiempo de proceso para la simulación con lote mínimo de 50 unidades de producto.

<b>Cantidad de Simulaciones (100)</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.457.079,40</b>	<b>889.676,70</b>	<b>15.567.402,70</b>	<b>1.407,83</b>

**Tabla 5.7 Resultados Lote 50.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados promedios de costes y tiempo de proceso para la simulación con lote mínimo de 25 unidades de producto.

<b>Cantidad de Simulaciones (100)</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.394.602,10</b>	<b>815.109,00</b>	<b>15.579.493,10</b>	<b>1.409,57</b>

**Tabla 5.8 Resultados Lote 25.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados promedios de costes y tiempo de proceso para la simulación con lote mínimo de 10 unidades de producto.

<b>Cantidad de Simulaciones (100)</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.368.756,70</b>	<b>776.786,60</b>	<b>15.591.970,10</b>	<b>1.408,41</b>

**Tabla 5.9 Resultados Lote 10.**

**Fuente: Elaboración propia**

Finalmente, en la Tabla 5.10 se muestra el óptimo obtenido por la PEM, este representa el coste más bajo al que se puede llegar.

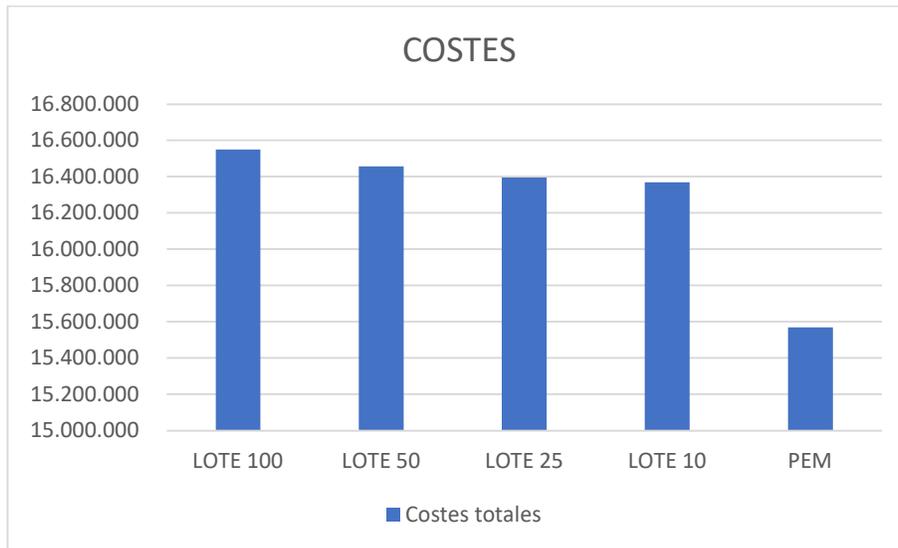
<b>Programación Entera Mixta</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>15.569.340,00</b>

**Tabla 5.10 Resultados PEM.**

**Fuente: Elaboración propia**

### 5.3 Análisis de resultados

Con respecto al coste total de las simulaciones tomando en cuenta el cambio de tamaño de lote se puede observar que en promedio cada vez que se disminuye el tamaño de lote, el costo total también baja. Esto se puede observar en la Figura 5.1 la cual se ve de manera clara la disminución del coste total.



**Figura 5.1 Costes totales promedio por tamaño de lote.**

**Fuente: Elaboración propia**

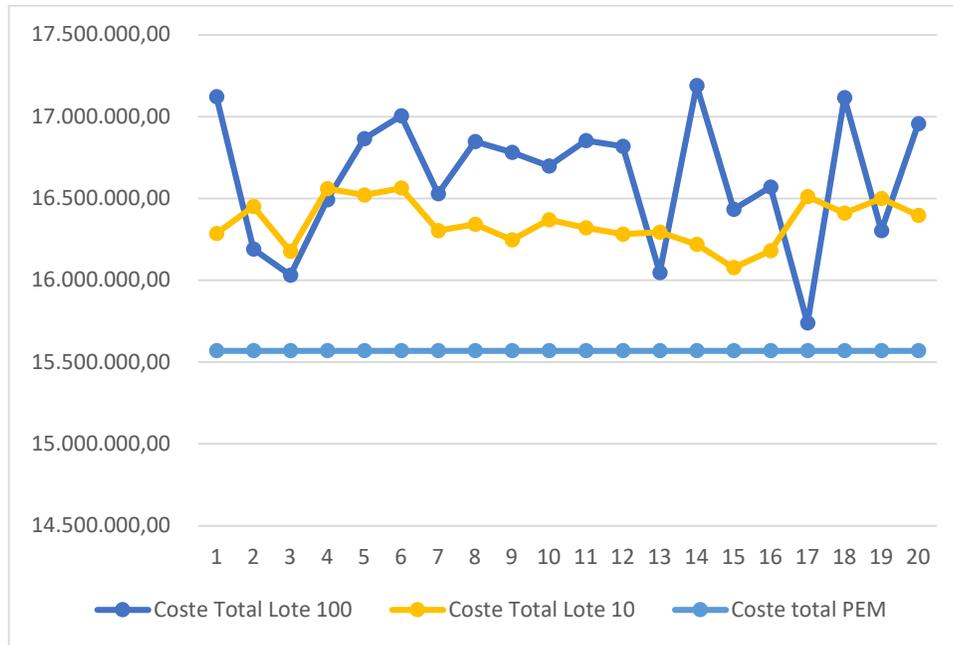
Además, los costos de inventario promedio también disminuyen a medida que el tamaño de lote es mas pequeño como se muestra en la Figura 5.2.



**Figura 5.2 Costes promedio de inventario por tamaño de lote.**

**Fuente: Elaboración propia**

Cabe destacar que ninguna simulación en Netlogo pudo igualar el coste de la PEM (15.569.340 CLP), pero si acercarse mucho como se muestra en la Figura 5.3.

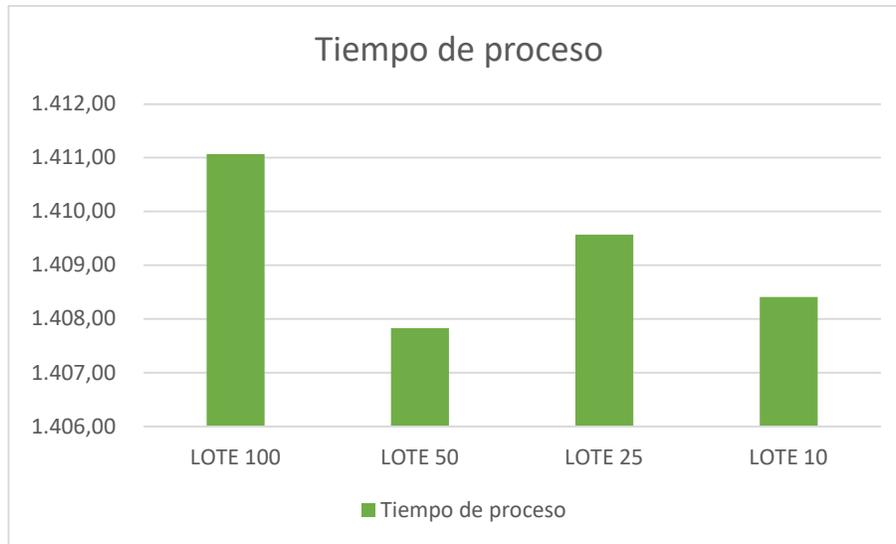


**Figura 5.3 Costes totales por simulación.**

**Fuente: Elaboración propia**

Se puede observar que a un menor tamaño de lote los resultados tienden a tener menos fluctuaciones, esto se debe porque al disminuir el tamaño de lote la cantidad de agentes en la simulación aumenta, al aumentar la cantidad de agentes las instancias en la que estos pueden interactuar entre ellos para tomar decisiones son mucho mayor.

Por el contrario, se puede observar que en cuanto al tiempo de proceso promedio de las simulaciones no tiene correlación con el tamaño de lote, dando resultados similares en todos los casos variando por unos segundos, tal como se muestra en la Figura 5.4.



**Figura 5.4 Tiempos de proceso promedio por tamaño de lote.**

**Fuente: Elaboración propia**

Tomando todo esto en consideración el modelo creado en Netlogo a pesar de llegar a resultados factibles, estos no son óptimos, siendo en este caso la PEM una mejor alternativa. Cabe destacar que el modelo tiene dos ventajas sobre la PEM, el cual es el tiempo de ejecución, el cual la PEM se demoró 12 segundos en procesar y el modelo en Netlogo en ese tiempo hace en promedio 3000 simulaciones, además de la posibilidad de tener una interfaz visual, ayudando a comprender mejor como se resuelve el problema del lot-sizing. Bajo este contexto usar programas como NetLogo nos permite visualizar estos problemas desde otra perspectiva, la cual ayuda a la toma de decisiones. Además, si se aumentan la cantidad de máquinas, periodos y productos el programa de Netlogo se presenta como una mejor alternativa ya que su gasto computacional es mucho más bajo.

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

### **6.1 Conclusiones generales**

La implementación de agentes inteligentes en la resolución del problema de lot-sizing en la planificación de la producción es una estrategia altamente efectiva. Esta estrategia, implementada a través de la plataforma de modelado y simulación multiagente NetLogo, permite simular el comportamiento de los diferentes componentes de la cadena de producción y tomar decisiones autónomas en tiempo real, lo que resulta en una optimización significativa de los procesos de producción.

El estudio propone un proceso sistemático y bien estructurado para abordar el problema de lot-sizing. Este proceso comienza con la asignación de variables globales que se utilizarán a lo largo de la simulación. A continuación, se procede a la creación de las estaciones de trabajo y los agentes que serán procesados. Cada agente representa un lote de producción y cada estación de trabajo representa un recurso de producción.

El proceso es iterativo, con cada iteración representando un período de producción. En cada período, se verifica la demanda y, si existe, los agentes se mueven hacia las estaciones de trabajo disponibles. Este movimiento representa el proceso de asignación de lotes a los recursos de producción. Una vez que todos los agentes correspondientes al período actual han sido procesados, se incrementa el contador del período y se continúa con el proceso hasta que todos los agentes hayan sido procesados.

Este proceso iterativo, apoyado por el uso de agentes inteligentes, proporciona un marco robusto y flexible para abordar el problema de lot-sizing. Permite adaptarse a diferentes escenarios y condiciones, y ofrece la posibilidad de encontrar soluciones optimizadas que pueden mejorar significativamente la eficiencia de los procesos de producción.

En conclusión, el uso de agentes inteligentes para resolver problemas de lot-sizing puede ser una estrategia efectiva para resolver una problemática en la planificación de la producción, si bien no llega a un óptimo este se le acerca lo suficiente para ser un método efectivo. Los agentes inteligentes proporcionan una forma flexible y adaptable de abordar estos problemas, lo que puede resultar en soluciones más eficientes y optimizadas. Este enfoque podría tener implicaciones significativas para la industria donde la optimización de la producción es crítica. La implementación de esta estrategia podría conducir a mejoras en la eficiencia y la productividad, lo que a su vez podría tener un impacto positivo en la rentabilidad y la competitividad de las empresas.

## 6.2 Trabajos futuros

- **Modelado de Epidemias y Salud Pública:** La capacidad de simular la propagación de enfermedades infecciosas y la efectividad de intervenciones sanitarias es esencial para planificar respuestas adecuadas a crisis de salud pública. Esta aplicación se basa en el trabajo de Epstein y Axtell (1996), quienes demostraron la efectividad de los modelos basados en agentes en la simulación de dinámicas sociales y epidemiológicas.
- **Estudios de Impacto Ambiental y Sostenibilidad:** Modelos multi-agente pueden simular interacciones entre humanos, fauna y ecosistemas, como lo describen Janssen y Ostrom (2006). Estos modelos son fundamentales para el desarrollo de políticas y prácticas de gestión ambiental sostenible.
- **Análisis de Sistemas Económicos y Mercados Financieros:** Los modelos basados en agentes pueden representar comportamientos y transacciones económicas, proporcionando insights en fenómenos como burbujas financieras y crisis económicas, como se ve en el trabajo de Arthur (1999).

## CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

- Araya, F. (2020). Modelación basada en agentes: *Revista De Ingeniería De Construcción*, 35(2), 111–118. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732020000200111>
- Arthur, W. B. (1999). Complexity and the economy. *Science*, 284(5411), 107–109. <https://doi.org/10.1126/science.284.5411.107>
- Babis, & Magula. (2012). *NetLogo — An alternative way of simulating mobile ad hoc networks*. IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6416163>
- Chiacchio, F., Pennisi, M., Russo, G., Motta, S., & Pappalardo, F. (2014). Agent-Based Modeling of the immune System: NetLogo, a promising framework. *BioMed Research International*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/907171>
- Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). Growing artificial societies: Social science from the bottom up. *MIT Press*. [https://books.google.cl/books/about/Growing\\_Artificial\\_Societies.html?id=xXvelSs2caQC&redir\\_esc=y](https://books.google.cl/books/about/Growing_Artificial_Societies.html?id=xXvelSs2caQC&redir_esc=y)
- Gilbert, N. (2008). Agent-Based models. In *SAGE Publications, Inc. eBooks*. <https://doi.org/10.4135/9781412983259>
- Hua, S. Y., & Johnson, D. J. (2008). Research issues on factors influencing the choice of kitting versus line stocking. *International Journal of Production Research*, 48(3), 779–800. <https://doi.org/10.1080/00207540802456802>
- Janssen, M. A., & Ostrom, E. (2006). Empirically Based, Agent-based models. *Ecology and Society*, 11(2). <https://www.jstor.org/stable/26265994>

- Lindskog, E., Vallhagen, J., Berglund, J., & Johansson, B. (2016). Improving lean design of production systems by visualization support. *Procedia CIRP*, 41, 602–607.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.004>
- Maafa, & Sari. (2022). *Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem with Parallel Resources, Setup times and costs: A case study*. IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9738253>
- Macal, C. M., & North, M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Niebel, B., & Freivalds, A. (2004). *Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo*. Google Books.  
[https://books.google.cl/books/about/INGENIER%C3%8DA\\_INDUSTRIAL\\_11a.html?id=3A-fRAAACAAJ&source=kp\\_book\\_description&redir\\_esc=y](https://books.google.cl/books/about/INGENIER%C3%8DA_INDUSTRIAL_11a.html?id=3A-fRAAACAAJ&source=kp_book_description&redir_esc=y)
- Nils, Nilsson. (1998). *Artificial Intelligence: A New Synthesis*.  
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-27773-7>
- Quadt, D., & Kühn, H. (2005). Conceptual framework for lot-sizing and scheduling of flexible flow lines. *International Journal of Production Research*, 43(11), 2291–2308.  
<https://doi.org/10.1080/00207540500066762>
- Rehman, H., Wan, G., & Zhan, Y. (2019). Multi-level, multi-stage lot-sizing and scheduling in the flexible flow shop with demand information updating. *International Transactions in Operational Research*, 28(4), 2191–2217. <https://doi.org/10.1111/itor.12645>

Roy, R.N. (2005). A Modern Approach to Operations Management

*New Age International Publishers.*

[https://ftp.idu.ac.id/wp-](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20OPERASI/MOderN%20Operation%20Management.pdf)

[content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20OPERASI/MOderN%20Operation%20Management.pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20OPERASI/MOderN%20Operation%20Management.pdf)

Sollish, F. and Semanik, J. (2007). The Procurement and Supply Manager's Desk Reference.

*Wiley.*

[https://books.google.cl/books/about/The\\_Procurement\\_and\\_Supply\\_Manager\\_s\\_Des.html?id=7c9qY9J6qWYC&redir\\_esc=y](https://books.google.cl/books/about/The_Procurement_and_Supply_Manager_s_Des.html?id=7c9qY9J6qWYC&redir_esc=y)

Viale, David (1996). Inventory Management: From Warehouse to Distribution Center

[https://books.google.cl/books/about/Inventory\\_Management.html?id=v2VlvgAACAAJ](https://books.google.cl/books/about/Inventory_Management.html?id=v2VlvgAACAAJ)

Wilensky, U. (1999). NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling.

Northwestern University, Evanston. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

## ANEXOS

<b>Cantidad de Simulaciones</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
1	17.121.360,00	1.533.560,00	15.587.800,00	1.413,90
2	16.190.640,00	885.400,00	15.305.240,00	1.435,33
3	16.031.260,00	730.720,00	15.300.540,00	1.465,93
4	16.490.900,00	891.600,00	15.599.300,00	1.411,20
5	16.865.340,00	1.614.800,00	15.250.540,00	1.444,33
6	17.005.360,00	1.369.220,00	15.636.140,00	1.384,83
7	16.528.640,00	1.235.100,00	15.293.540,00	1.392,82
8	16.847.960,00	1.256.660,00	15.591.300,00	1.462,20
9	16.781.520,00	1.513.320,00	15.268.200,00	1.468,30
10	16.697.150,00	1.087.850,00	15.609.300,00	1.412,40
11	16.853.100,00	1.225.660,00	15.627.440,00	1.381,33
12	16.818.130,00	1.236.830,00	15.581.300,00	1.443,50
13	16.046.800,00	452.000,00	15.594.800,00	1.403,50
14	17.190.240,00	1.855.500,00	15.334.740,00	1.400,33
15	16.433.500,00	1.150.400,00	15.283.100,00	1.414,90
16	16.570.100,00	1.295.000,00	15.275.100,00	1.483,30
17	15.738.900,00	439.600,00	15.299.300,00	1.363,90
18	17.115.340,00	1.500.100,00	15.615.240,00	1.400,32
19	16.303.900,00	710.800,00	15.593.100,00	1.464,90
20	16.956.650,00	1.377.150,00	15.579.500,00	1.409,10
21	16.405.670,00	1.080.330,00	15.325.340,00	1.379,72
22	17.703.340,00	2.042.500,00	15.660.840,00	1.413,13
23	16.294.700,00	963.900,00	15.330.800,00	1.416,30
24	16.245.300,00	936.860,00	15.308.440,00	1.325,12
25	16.570.870,00	965.630,00	15.605.240,00	1.368,02
26	16.701.530,00	1.080.330,00	15.621.200,00	1.459,30
27	16.830.940,00	1.524.400,00	15.306.540,00	1.417,13
28	16.496.070,00	862.830,00	15.633.240,00	1.368,02

29	16.329.940,00	728.300,00	15.601.640,00	1.342,82
30	16.014.170,00	718.730,00	15.295.440,00	1.382,62
31	16.424.550,00	821.750,00	15.602.800,00	1.459,50
32	16.725.360,00	1.437.460,00	15.287.900,00	1.462,40
33	16.929.400,00	1.288.800,00	15.640.600,00	1.395,90
34	17.220.140,00	1.644.700,00	15.575.440,00	1.359,12
35	16.537.960,00	936.860,00	15.601.100,00	1.418,00
36	16.574.270,00	1.261.130,00	15.313.140,00	1.378,03
37	17.119.520,00	1.544.320,00	15.575.200,00	1.474,10
38	16.338.800,00	1.054.300,00	15.284.500,00	1.388,70
39	16.432.770,00	809.130,00	15.623.640,00	1.461,53
40	16.140.570,00	1.261.130,00	14.879.440,00	1.401,53
41	16.562.530,00	1.687.100,00	14.875.430,00	1.441,60
42	16.971.900,00	568.020,00	16.403.880,00	1.444,50
43	15.854.560,00	708.060,00	15.146.500,00	1.397,43
44	16.348.660,00	537.930,00	15.810.730,00	1.395,90
45	15.795.270,00	393.420,00	15.401.850,00	1.388,72
46	16.038.160,00	1.195.030,00	14.843.130,00	1.386,93
47	16.836.130,00	1.072.400,00	15.763.730,00	1.432,80
48	16.318.540,00	596.100,00	15.722.440,00	1.448,92
49	16.191.240,00	1.278.820,00	14.912.420,00	1.455,93
50	16.585.660,00	1.054.300,00	15.531.360,00	1.392,82
51	16.682.140,00	1.646.620,00	15.035.520,00	1.401,53
52	17.245.460,00	945.800,00	16.299.660,00	1.384,12
53	16.568.740,00	1.413.160,00	15.155.580,00	1.391,33
54	16.979.760,00	1.072.400,00	15.907.360,00	1.461,20
55	16.672.940,00	660.150,00	16.012.790,00	1.428,22
56	15.950.890,00	549.920,00	15.400.970,00	1.414,92
57	16.144.960,00	1.343.600,00	14.801.360,00	1.399,52
58	16.630.740,00	1.178.160,00	15.452.580,00	1.377,82
59	16.794.900,00	1.512.000,00	15.282.900,00	1.377,22
60	17.088.740,00	1.188.420,00	15.900.320,00	1.374,32
61	16.531.560,00	503.650,00	16.027.910,00	1.385,72

62	15.797.090,00	1.327.230,00	14.469.860,00	1.398,23
63	16.618.130,00	1.393.330,00	15.224.800,00	1.384,50
64	16.970.130,00	923.830,00	16.046.300,00	1.441,60
65	16.589.030,00	930.850,00	15.658.180,00	1.431,50
66	16.495.650,00	664.620,00	15.831.030,00	1.419,30
67	15.965.920,00	568.020,00	15.397.900,00	1.435,30
68	16.216.820,00	1.021.750,00	15.195.070,00	1.413,60
69	16.610.590,00	1.351.530,00	15.259.060,00	1.363,72
70	16.998.470,00	678.250,00	16.320.220,00	1.418,22
71	16.304.150,00	465.630,00	15.838.520,00	1.409,50
72	16.096.070,00	1.298.460,00	14.797.610,00	1.407,62
73	16.934.900,00	1.292.950,00	15.641.950,00	1.357,12
74	16.921.190,00	1.423.420,00	15.497.770,00	1.442,13
75	16.727.060,00	407.050,00	16.320.010,00	1.418,02
76	15.995.890,00	1.013.820,00	14.982.070,00	1.447,23
77	16.620.460,00	1.692.800,00	14.927.660,00	1.369,72
78	17.330.100,00	1.008.030,00	16.322.070,00	1.416,30
79	16.300.170,00	870.760,00	15.429.410,00	1.403,02
80	16.144.060,00	1.080.330,00	15.063.730,00	1.448,90
81	16.741.570,00	900.850,00	15.840.720,00	1.354,42
82	16.569.990,00	935.820,00	15.634.170,00	1.396,43
83	16.545.120,00	537.930,00	16.007.190,00	1.429,90
84	15.817.730,00	483.820,00	15.333.910,00	1.419,30
85	16.049.960,00	1.478.220,00	14.571.740,00	1.428,32
86	16.772.320,00	1.346.650,00	15.425.670,00	1.377,00
87	16.637.090,00	921.000,00	15.716.090,00	1.374,92
88	16.512.100,00	1.337.400,00	15.174.700,00	1.393,50
89	16.929.440,00	875.230,00	16.054.210,00	1.427,83
90	16.169.730,00	1.243.850,00	14.925.880,00	1.407,40
91	16.550.890,00	1.081.560,00	15.469.330,00	1.438,03
92	16.673.900,00	664.620,00	16.009.280,00	1.400,12
93	16.306.560,00	1.351.530,00	14.955.030,00	1.403,22
94	16.976.670,00	1.674.700,00	15.301.970,00	1.428,23

95	16.981.640,00	833.020,00	16.148.620,00	1.397,62
96	16.441.460,00	939.600,00	15.501.860,00	1.382,13
97	16.258.140,00	652.630,00	15.605.510,00	1.435,33
98	16.292.070,00	644.100,00	15.647.970,00	1.364,43
99	16.230.300,00	1.222.700,00	15.007.600,00	1.452,20
100	16.512.600,00	977.530,00	15.535.070,00	1.462,00
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.550.213,00</b>	<b>1.069.451,40</b>	<b>15.480.761,60</b>	<b>1.411,07</b>

**Anexo 1: Resultados Lote 100.**

**Fuente: Elaboración propia**

<b>Cantidad de Simulaciones</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
1	16.374.090,00	774.050,00	15.600.040,00	1388,22
2	16.162.490,00	701.750,00	15.460.740,00	1425,73
3	16.740.800,00	1.145.360,00	15.595.440,00	1417,22
4	16.042.700,00	449.010,00	15.593.690,00	1401,07
5	16.205.310,00	602.410,00	15.602.900,00	1417,2
6	16.338.800,00	897.800,00	15.441.000,00	1384,3
7	16.972.670,00	1.372.430,00	15.600.240,00	1435,43
8	16.205.310,00	771.610,00	15.433.700,00	1430,2
9	16.342.190,00	743.850,00	15.598.340,00	1387,63
10	16.482.510,00	1.023.120,00	15.459.390,00	1400,32
11	17.088.860,00	1.472.020,00	15.616.840,00	1398,87
12	16.011.770,00	381.430,00	15.630.340,00	1402,88
13	16.473.140,00	867.300,00	15.605.840,00	1380,42
14	16.360.340,00	765.800,00	15.594.540,00	1406,27
15	16.606.210,00	1.037.570,00	15.568.640,00	1377,42
16	16.272.640,00	804.300,00	15.468.340,00	1389,77
17	16.476.900,00	865.250,00	15.611.650,00	1380,08
18	16.205.660,00	571.120,00	15.634.540,00	1400,58
19	16.167.600,00	575.450,00	15.592.150,00	1410,05

20	16.860.790,00	1.228.650,00	15.632.140,00	1431,03
21	16.057.460,00	616.320,00	15.441.140,00	1378,27
22	16.195.630,00	597.830,00	15.597.800,00	1427
23	16.790.120,00	1.191.630,00	15.598.490,00	1387,22
24	16.475.390,00	873.750,00	15.601.640,00	1420,73
25	16.427.380,00	809.130,00	15.618.250,00	1404,15
26	16.351.700,00	735.460,00	15.616.240,00	1374,48
27	16.661.620,00	1.056.030,00	15.605.590,00	1403,73
28	16.295.850,00	698.900,00	15.596.950,00	1406,25
29	17.020.550,00	1.415.400,00	15.605.150,00	1415,1
30	16.121.790,00	681.350,00	15.440.440,00	1383,37
31	16.177.980,00	739.930,00	15.438.050,00	1440,65
32	16.161.560,00	528.470,00	15.633.090,00	1425,08
33	16.318.390,00	710.800,00	15.607.590,00	1404,57
34	16.240.660,00	771.610,00	15.469.050,00	1420,2
35	16.703.940,00	1.099.500,00	15.604.440,00	1409,07
36	16.427.570,00	842.180,00	15.585.390,00	1394,52
37	16.302.220,00	727.620,00	15.574.600,00	1427,65
38	16.425.560,00	839.220,00	15.586.340,00	1398,17
39	16.681.010,00	1.075.860,00	15.605.150,00	1421,9
40	16.461.650,00	853.100,00	15.608.550,00	1423,63
41	16.373.240,00	765.800,00	15.607.440,00	1375,82
42	16.628.350,00	1.037.000,00	15.591.350,00	1431,68
43	16.689.290,00	1.108.550,00	15.580.740,00	1428,27
44	16.379.220,00	788.070,00	15.591.150,00	1427,85
45	16.422.790,00	967.640,00	15.455.150,00	1397,4
46	16.301.780,00	724.680,00	15.577.100,00	1449,1
47	16.894.850,00	1.292.950,00	15.601.900,00	1444,7
48	17.379.890,00	1.778.000,00	15.601.890,00	1409,17
49	16.382.940,00	776.900,00	15.606.040,00	1396,47
50	16.203.900,00	590.810,00	15.613.090,00	1423,63
51	16.306.160,00	703.620,00	15.602.540,00	1439,68
52	16.768.920,00	1.327.230,00	15.441.690,00	1343,67

53	16.443.840,00	870.400,00	15.573.440,00	1412,03
54	16.520.410,00	907.210,00	15.613.200,00	1410
55	16.687.240,00	1.072.400,00	15.614.840,00	1394,28
56	16.313.440,00	868.350,00	15.445.090,00	1348,77
57	16.692.560,00	1.093.360,00	15.599.200,00	1401,25
58	16.627.390,00	988.700,00	15.638.690,00	1394,98
59	16.112.940,00	544.950,00	15.567.990,00	1386,52
60	16.064.920,00	649.370,00	15.415.550,00	1442,45
61	16.288.250,00	717.000,00	15.571.250,00	1407,25
62	16.381.140,00	783.600,00	15.597.540,00	1421,48
63	16.298.160,00	723.310,00	15.574.850,00	1445,25
64	16.407.500,00	792.650,00	15.614.850,00	1399,8
65	16.508.490,00	904.000,00	15.604.490,00	1395,47
66	16.582.650,00	973.310,00	15.609.340,00	1369,27
67	16.276.400,00	849.860,00	15.426.540,00	1425,37
68	16.783.560,00	1.178.410,00	15.605.150,00	1421,9
69	16.317.210,00	845.420,00	15.471.790,00	1406,87
70	16.814.090,00	1.178.550,00	15.635.540,00	1351,02
71	16.433.210,00	797.120,00	15.636.090,00	1400,68
72	16.342.710,00	742.870,00	15.599.840,00	1403,03
73	16.557.590,00	963.900,00	15.593.690,00	1386,27
74	16.234.890,00	605.900,00	15.628.990,00	1417,08
75	16.355.200,00	900.850,00	15.454.350,00	1431,25
76	16.585.510,00	1.003.560,00	15.581.950,00	1412,1
77	15.967.120,00	362.780,00	15.604.340,00	1419,37
78	16.838.490,00	1.382.600,00	15.455.890,00	1444,28
79	16.384.860,00	760.670,00	15.624.190,00	1386,12
80	16.211.340,00	566.650,00	15.644.690,00	1382,07
81	16.447.310,00	956.720,00	15.490.590,00	1424,23
82	16.819.150,00	1.208.000,00	15.611.150,00	1430,15
83	16.703.710,00	1.095.170,00	15.608.540,00	1409,92
84	16.384.350,00	936.800,00	15.447.550,00	1403,35
85	16.347.990,00	756.000,00	15.591.990,00	1410,02

86	16.961.100,00	1.359.350,00	15.601.750,00	1394,88
87	16.386.450,00	958.360,00	15.428.090,00	1433,47
88	16.057.410,00	619.420,00	15.437.990,00	1427,42
89	15.993.110,00	405.270,00	15.587.840,00	1412,72
90	16.587.990,00	976.300,00	15.611.690,00	1443,43
91	16.888.340,00	1.418.750,00	15.469.590,00	1379,98
92	16.598.410,00	997.610,00	15.600.800,00	1402,6
93	16.368.840,00	753.650,00	15.615.190,00	1409,07
94	16.386.760,00	780.660,00	15.606.100,00	1413,33
95	16.443.010,00	985.460,00	15.457.550,00	1439,6
96	16.400.600,00	771.610,00	15.628.990,00	1417,08
97	16.487.630,00	898.980,00	15.588.650,00	1414,4
98	16.286.610,00	828.960,00	15.457.650,00	1411,7
99	16.888.970,00	1.249.120,00	15.639.850,00	1401,85
100	16.818.950,00	1.208.110,00	15.610.840,00	1389,77
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.457.079,40</b>	<b>889.676,70</b>	<b>15.567.402,70</b>	<b>1.407,83</b>

**Anexo 2: Resultados Lote 50.**

**Fuente: Elaboración propia**

<b>Cantidad de Simulaciones</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
1	16.173.960,00	642.235,00	15.531.725,00	1.413,40
2	16.172.200,00	574.285,00	15.597.915,00	1.425,45
3	16.100.085,00	501.895,00	15.598.190,00	1.414,38
4	16.604.710,00	1.083.420,00	15.521.290,00	1.427,31
5	16.345.115,00	835.025,00	15.510.090,00	1.414,25
6	16.344.440,00	805.975,00	15.538.465,00	1.399,68
7	16.771.765,00	1.162.650,00	15.609.115,00	1.426,01
8	16.843.485,00	1.255.045,00	15.588.440,00	1.415,91
9	16.199.860,00	660.310,00	15.539.550,00	1.404,90

10	16.308.690,00	708.175,00	15.600.515,00	1.421,23
11	16.328.190,00	805.850,00	15.522.340,00	1.404,60
12	16.247.160,00	645.060,00	15.602.100,00	1.390,43
13	16.651.365,00	1.128.025,00	15.523.340,00	1.404,98
14	16.358.565,00	835.800,00	15.522.765,00	1.416,42
15	16.352.970,00	765.470,00	15.587.500,00	1.445,03
16	16.436.775,00	826.900,00	15.609.875,00	1.394,48
17	16.200.715,00	593.925,00	15.606.790,00	1.404,07
18	16.788.915,00	1.183.975,00	15.604.940,00	1.425,53
19	16.339.165,00	797.300,00	15.541.865,00	1.414,05
20	16.506.725,00	908.250,00	15.598.475,00	1.417,10
21	16.300.485,00	694.570,00	15.605.915,00	1.385,47
22	16.372.970,00	741.330,00	15.631.640,00	1.422,07
23	16.451.420,00	866.480,00	15.584.940,00	1.415,22
24	16.540.340,00	914.325,00	15.626.015,00	1.438,48
25	16.225.165,00	635.475,00	15.589.690,00	1.429,61
26	16.416.075,00	907.085,00	15.508.990,00	1.440,66
27	16.768.735,00	1.181.170,00	15.587.565,00	1.428,67
28	16.291.090,00	677.725,00	15.613.365,00	1.393,65
29	15.964.345,00	443.155,00	15.521.190,00	1.409,45
30	16.205.175,00	586.435,00	15.618.740,00	1.397,65
31	16.387.960,00	800.220,00	15.587.740,00	1.381,86
32	16.303.640,00	682.600,00	15.621.040,00	1.417,13
33	16.389.960,00	792.595,00	15.597.365,00	1.413,20
34	16.242.020,00	647.945,00	15.594.075,00	1.433,20
35	16.510.740,00	906.825,00	15.603.915,00	1.404,75
36	16.569.125,00	964.550,00	15.604.575,00	1.404,85
37	16.274.965,00	682.900,00	15.592.065,00	1.423,57
38	16.699.065,00	1.101.200,00	15.597.865,00	1.414,13
39	16.159.910,00	583.335,00	15.576.575,00	1.415,50
40	16.462.465,00	859.025,00	15.603.440,00	1.404,32
41	16.567.225,00	1.036.875,00	15.530.350,00	1.402,30
42	16.318.120,00	700.505,00	15.617.615,00	1.399,70

43	16.108.345,00	604.295,00	15.504.050,00	1.418,10
44	16.639.190,00	1.090.600,00	15.548.590,00	1.375,20
45	16.594.440,00	983.925,00	15.610.515,00	1.391,52
46	16.279.850,00	688.825,00	15.591.025,00	1.412,26
47	16.410.540,00	879.850,00	15.530.690,00	1.394,23
48	16.171.435,00	595.120,00	15.576.315,00	1.397,44
49	16.305.265,00	711.575,00	15.593.690,00	1.416,17
50	16.338.350,00	737.900,00	15.600.450,00	1.404,18
51	16.691.000,00	1.177.125,00	15.513.875,00	1.392,43
52	16.594.135,00	976.495,00	15.617.640,00	1.421,92
53	16.059.150,00	455.210,00	15.603.940,00	1.402,40
54	16.508.915,00	910.175,00	15.598.740,00	1.426,21
55	16.058.055,00	474.505,00	15.583.550,00	1.414,90
56	16.552.300,00	1.033.750,00	15.518.550,00	1.406,75
57	16.249.985,00	726.345,00	15.523.640,00	1.416,01
58	16.532.415,00	923.875,00	15.608.540,00	1.404,78
59	16.251.485,00	647.945,00	15.603.540,00	1.414,90
60	16.157.100,00	567.675,00	15.589.425,00	1.421,33
61	16.444.155,00	832.040,00	15.612.115,00	1.386,92
62	16.429.675,00	825.975,00	15.603.700,00	1.396,78
63	16.316.225,00	709.885,00	15.606.340,00	1.392,50
64	16.192.325,00	587.325,00	15.605.000,00	1.416,25
65	16.446.725,00	938.725,00	15.508.000,00	1.393,77
66	16.236.220,00	595.280,00	15.640.940,00	1.387,26
67	16.361.110,00	813.520,00	15.547.590,00	1.388,76
68	16.661.560,00	1.128.470,00	15.533.090,00	1.416,57
69	16.448.350,00	849.500,00	15.598.850,00	1.407,77
70	16.374.945,00	861.820,00	15.513.125,00	1.411,90
71	16.344.625,00	815.375,00	15.529.250,00	1.429,13
72	16.256.800,00	668.550,00	15.588.250,00	1.428,95
73	16.238.320,00	640.480,00	15.597.840,00	1.411,07
74	16.318.225,00	723.735,00	15.594.490,00	1.413,87
75	16.387.925,00	788.135,00	15.599.790,00	1.400,52

76	16.387.615,00	777.300,00	15.610.315,00	1.429,53
77	16.610.500,00	1.017.375,00	15.593.125,00	1.410,75
78	16.400.690,00	884.100,00	15.516.590,00	1.409,92
79	16.364.545,00	775.920,00	15.588.625,00	1.414,83
80	16.672.165,00	1.060.375,00	15.611.790,00	1.387,10
81	16.291.250,00	675.285,00	15.615.965,00	1.407,35
82	16.783.915,00	1.251.650,00	15.532.265,00	1.396,41
83	16.685.045,00	1.086.270,00	15.598.775,00	1.393,83
84	16.316.020,00	795.545,00	15.520.475,00	1.405,95
85	16.368.190,00	757.675,00	15.610.515,00	1.395,95
86	16.733.000,00	1.195.075,00	15.537.925,00	1.412,30
87	16.414.840,00	879.700,00	15.535.140,00	1.400,53
88	16.287.515,00	687.275,00	15.600.240,00	1.408,15
89	16.607.110,00	995.995,00	15.611.115,00	1.420,95
90	16.078.850,00	468.750,00	15.610.100,00	1.411,88
91	16.068.970,00	486.530,00	15.582.440,00	1.409,15
92	16.722.470,00	1.119.445,00	15.603.025,00	1.399,45
93	16.206.250,00	682.910,00	15.523.340,00	1.431,73
94	16.775.615,00	1.239.625,00	15.535.990,00	1.409,12
95	16.461.565,00	862.900,00	15.598.665,00	1.411,83
96	16.095.850,00	496.035,00	15.599.815,00	1.405,12
97	16.291.465,00	668.550,00	15.622.915,00	1.396,03
98	16.501.565,00	893.150,00	15.608.415,00	1.401,47
99	16.677.185,00	1.066.895,00	15.610.290,00	1.426,05
100	16.203.035,00	596.670,00	15.606.365,00	1.394,50
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.394.602,10</b>	<b>815.109,00</b>	<b>15.579.493,10</b>	<b>1.409,57</b>

**Anexo 3: Resultados Lote 25.**

**Fuente: Elaboración propia**

<b>Cantidad de Simulaciones</b>	<b>Coste Total (CLP)</b>	<b>Coste Inventario (CLP)</b>	<b>Coste Proceso (CLP)</b>	<b>Tiempo de proceso (horas)</b>
1	16.286.130,00	697.660,00	15.588.470,00	1.409,94
2	16.450.880,00	845.930,00	15.604.950,00	1.405,88
3	16.177.370,00	610.320,00	15.567.050,00	1.395,30
4	16.559.980,00	966.390,00	15.593.590,00	1.405,48
5	16.520.410,00	923.050,00	15.597.360,00	1.412,86
6	16.563.090,00	955.430,00	15.607.660,00	1.409,61
7	16.302.420,00	728.450,00	15.573.970,00	1.408,07
8	16.341.180,00	770.050,00	15.571.130,00	1.393,60
9	16.246.510,00	669.410,00	15.577.100,00	1.406,09
10	16.369.870,00	774.850,00	15.595.020,00	1.399,66
11	16.320.690,00	747.040,00	15.573.650,00	1.408,67
12	16.282.300,00	705.410,00	15.576.890,00	1.387,80
13	16.292.900,00	727.720,00	15.565.180,00	1.388,15
14	16.219.730,00	620.030,00	15.599.700,00	1.413,76
15	16.076.960,00	499.910,00	15.577.050,00	1.412,07
16	16.181.530,00	584.260,00	15.597.270,00	1.414,43
17	16.510.140,00	912.820,00	15.597.320,00	1.428,97
18	16.410.150,00	804.900,00	15.605.250,00	1.399,84
19	16.500.200,00	886.770,00	15.613.430,00	1.412,81
20	16.395.490,00	826.530,00	15.568.960,00	1.394,41
21	16.457.270,00	852.490,00	15.604.780,00	1.401,71
22	16.352.690,00	738.170,00	15.614.520,00	1.401,04
23	16.232.840,00	628.350,00	15.604.490,00	1.409,57
24	16.327.480,00	742.180,00	15.585.300,00	1.393,45
25	16.381.770,00	803.210,00	15.578.560,00	1.404,60
26	16.321.290,00	713.990,00	15.607.300,00	1.396,24
27	16.196.130,00	590.380,00	15.605.750,00	1.399,42
28	16.373.210,00	759.140,00	15.614.070,00	1.411,14
29	16.531.160,00	937.520,00	15.593.640,00	1.418,25
30	16.391.380,00	794.670,00	15.596.710,00	1.403,02

31	16.156.060,00	559.640,00	15.596.420,00	1.408,10
32	16.457.560,00	889.880,00	15.567.680,00	1.396,33
33	16.494.780,00	927.900,00	15.566.880,00	1.403,35
34	16.570.860,00	986.160,00	15.584.700,00	1.409,20
35	16.344.980,00	747.670,00	15.597.310,00	1.418,83
36	16.432.970,00	841.010,00	15.591.960,00	1.408,74
37	16.255.140,00	654.270,00	15.600.870,00	1.409,16
38	16.442.290,00	833.840,00	15.608.450,00	1.394,20
39	16.125.700,00	522.790,00	15.602.910,00	1.419,45
40	16.402.270,00	791.010,00	15.611.260,00	1.416,81
41	16.515.930,00	917.060,00	15.598.870,00	1.413,11
42	16.598.830,00	997.120,00	15.601.710,00	1.417,80
43	16.324.350,00	706.140,00	15.618.210,00	1.410,41
44	16.292.590,00	696.370,00	15.596.220,00	1.408,70
45	16.329.510,00	759.810,00	15.569.700,00	1.389,31
46	16.688.270,00	1.089.960,00	15.598.310,00	1.421,07
47	16.303.120,00	728.400,00	15.574.720,00	1.429,12
48	16.290.660,00	677.830,00	15.612.830,00	1.424,39
49	16.115.230,00	552.920,00	15.562.310,00	1.406,61
50	16.341.800,00	736.660,00	15.605.140,00	1.418,60
51	16.459.780,00	858.010,00	15.601.770,00	1.402,44
52	16.530.520,00	937.570,00	15.592.950,00	1.416,46
53	16.394.450,00	786.260,00	15.608.190,00	1.405,88
54	16.354.050,00	780.260,00	15.573.790,00	1.412,32
55	16.245.980,00	675.280,00	15.570.700,00	1.404,88
56	16.268.860,00	668.680,00	15.600.180,00	1.410,51
57	16.284.690,00	681.850,00	15.602.840,00	1.399,30
58	16.537.930,00	930.330,00	15.607.600,00	1.402,04
59	16.476.600,00	884.520,00	15.592.080,00	1.424,23
60	16.273.890,00	698.230,00	15.575.660,00	1.407,36
61	16.249.010,00	642.860,00	15.606.150,00	1.419,81
62	16.480.980,00	889.830,00	15.591.150,00	1.422,51
63	16.468.280,00	896.540,00	15.571.740,00	1.394,30

64	16.397.980,00	788.070,00	15.609.910,00	1.402,61
65	16.519.210,00	912.770,00	15.606.440,00	1.406,20
66	16.442.210,00	839.360,00	15.602.850,00	1.402,93
67	16.137.780,00	539.240,00	15.598.540,00	1.414,05
68	16.453.050,00	886.990,00	15.566.060,00	1.411,81
69	16.282.150,00	686.190,00	15.595.960,00	1.408,96
70	16.179.680,00	601.210,00	15.578.470,00	1.403,42
71	16.273.360,00	663.250,00	15.610.110,00	1.407,07
72	16.369.440,00	783.760,00	15.585.680,00	1.428,63
73	16.463.390,00	862.760,00	15.600.630,00	1.410,81
74	16.250.730,00	677.160,00	15.573.570,00	1.411,00
75	16.332.180,00	747.670,00	15.584.510,00	1.404,85
76	16.270.170,00	677.150,00	15.593.020,00	1.410,42
77	16.348.350,00	771.220,00	15.577.130,00	1.426,75
78	16.554.060,00	994.180,00	15.559.880,00	1.408,41
79	16.245.520,00	674.160,00	15.571.360,00	1.396,81
80	16.482.920,00	881.920,00	15.601.000,00	1.399,46
81	16.322.110,00	726.530,00	15.595.580,00	1.401,56
82	16.393.980,00	823.100,00	15.570.880,00	1.390,43
83	16.368.170,00	769.870,00	15.598.300,00	1.415,03
84	16.625.890,00	1.025.370,00	15.600.520,00	1.404,33
85	16.667.910,00	1.059.840,00	15.608.070,00	1.399,18
86	16.245.220,00	665.860,00	15.579.360,00	1.417,98
87	16.412.810,00	810.280,00	15.602.530,00	1.409,25
88	16.426.460,00	819.870,00	15.606.590,00	1.408,82
89	16.262.480,00	687.500,00	15.574.980,00	1.413,37
90	16.546.450,00	982.040,00	15.564.410,00	1.423,25
91	16.499.560,00	886.380,00	15.613.180,00	1.413,21
92	16.304.170,00	748.350,00	15.555.820,00	1.404,27
93	16.148.080,00	536.180,00	15.611.900,00	1.413,74
94	16.302.560,00	695.180,00	15.607.380,00	1.425,93
95	16.261.940,00	664.610,00	15.597.330,00	1.418,52
96	16.242.580,00	650.090,00	15.592.490,00	1.394,12

97	16.492.130,00	891.630,00	15.600.500,00	1.405,03
98	16.481.830,00	880.170,00	15.601.660,00	1.414,57
99	16.268.980,00	695.300,00	15.573.680,00	1.394,15
100	16.519.110,00	909.760,00	15.609.350,00	1.428,74
<b>PROMEDIO</b>	<b>16.368.756,70</b>	<b>776.786,60</b>	<b>15.591.970,10</b>	<b>1.408,41</b>

**Anexo 4: Resultados Lote 10.**

**Fuente: Elaboración propia**

**Anexo: Resumen FI**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERÍA  
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

**Departamento:** Departamento de Ingeniería Industrial

**Carrera:** Ingeniería Civil Industrial

**Nombre del memorista:** Cristóbal Alonso Andrades Balbontin

**Título de la memoria:** OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN RESOLVIENDO EL PROBLEMA DE LOT-SIZING A TRAVÉS DEL USO DE AGENTES INTELIGENTES

**Fecha de la presentación oral:** 22 de marzo del 2024

**Profesor(es) Guía:** Carlos Enrique Herrera López

Patricio Antonio Saez Bustos

**Profesor(es) Revisor(es):** Carlos Emilio Contreras Bolton

**Concepto:**

**Calificación:**

**Resumen**

En el ámbito de la producción industrial, la optimización de procesos es clave para mantener la competitividad y sostenibilidad. El "lot-sizing" es esencial en este contexto, buscando equilibrar costos y satisfacer demandas. Sin embargo, su aplicación en entornos cambiantes presenta desafíos. Este trabajo propone la integración de agentes inteligentes en la planificación de la producción, usando NetLogo, una plataforma para modelar sistemas complejos. El objetivo es crear un modelo que resuelva el problema de "lot-sizing" a través de agentes inteligentes. Se establecen dos metas: diseñar un modelo matemático enfocado en el "lot-sizing" y desarrollar un algoritmo basado en agentes inteligentes con NetLogo. Esto combina la simulación multiagente con el "lot-sizing" para ofrecer soluciones adaptativas y en tiempo real.

El estudio incluyó un proceso sistemático e iterativo usando agentes inteligentes para el "lot-sizing", desde la definición de variables hasta la asignación de lotes. Los resultados muestran la flexibilidad del modelo el cual se adapta a variaciones, ofreciendo soluciones factibles para la industria actual.