



MEDICIÓN DE LA NERVIOSIDAD EN UN PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN MEDIANTE EL USO DE SISTEMA MULTI AGENTES

por

Matías Nicolás Castillo Orellana

Memoria de título presentada a la facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título de Ingeniero civil Industrial

Profesor guía:

Carlos Enrique Herrera López

Profesor co-guía:

Patricio Antonio Sáez Bustos

Enero, 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Matías Nicolás Castillo Orellana

© 2024 Matías Nicolás Castillo Orellana

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

La fluctuación en la demanda y la incertidumbre ante posibles cambios en el entorno suelen constituir los principales problemas dentro de cualquier industria, obligando a actualizar temporalmente las decisiones operativas. La planificación de la producción trabaja en base a información histórica y actual para asignar tiempo y recursos, con el propósito de generar un pronóstico adecuado, sin embargo, la variabilidad en la producción plantea un desafío significativo para las industrias. Dadas las exigencias de los sistemas de manufactura es necesario implementar nuevos enfoques a los sistemas de producción, agregando mejoras y autonomía a los procesos. Los sistemas multi agentes y sistemas controlados por el producto han ampliado su desarrollo en los últimos años. En la presenta memoria de título, se propone una medida para evaluar la nerviosidad en un plan maestro de producción, teniendo como objetivo diseñar una estrategia que permita disminuir este indicador y por consecuencia proporcionar mayor estabilidad a la planificación. Los resultados demuestran que la nerviosidad del sistema disminuiría en 40,172% en la simulación con mejores resultados, ósea, el plan sería más estable con respecto al plan inicial y se aumentarían en 12,062% los costos con relación a los valores resultantes del MPS, generando una posible mejora significativa en la estabilidad del sistema en relación con el bajo aumento en los costos que implican estas variaciones en la producción.

Palabras claves: Planificación de la producción, nerviosidad en sistemas productivos, sistemas multi agentes, sistemas controlados por el producto.

Abstract

Fluctuation in demand and uncertainty regarding possible changes in the environment usually constitute the main problems within any industry, forcing operational decisions to be temporarily updated. Production planning works based on historical and current information to allocate time and resources, with the purpose of generating an adequate forecast, however, variability in production poses a significant challenge for industries.

Given the demands of manufacturing systems, it is necessary to implement new approaches to production systems, adding improvements and autonomy to processes. Multi-agent systems and product-controlled systems have expanded their development in recent years. In this title report, a measure is proposed to evaluate nervousness in a master production plan, with the objective of designing a strategy that allows reducing this indicator and consequently providing greater stability to the planning. The results show that the nervousness of the system would decrease by 40.172% in the simulation with better results, that is, the plan would be more stable with respect to the initial plan and the costs would increase by 12.062% in relation to the values resulting from the MPS, generating a possible significant improvement in the stability of the system in relation to the low increase in costs implied by these variations in production.

Keywords: Production planning, nervousness in production systems, multi-agent systems, product-controlled systems.

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 9 |
| 1.1 Antecedentes generales..... | 9 |
| 1.2 Justificación de la investigación | 12 |
| 1.3 Objetivos..... | 12 |
| 1.3.1 Hipótesis de investigación | 12 |
| 1.3.2 Objetivo general..... | 13 |
| 1.3.3 Objetivos específicos | 13 |
| 1.4 Limitaciones del estudio..... | 13 |
| 2. Marco teórico | 13 |
| 2.1 Sistemas de producción | 13 |
| 2.2 Planificación y control de la producción | 14 |
| 2.3 Estabilidad en un plan maestro de producción | 15 |
| 2.4 Estudios para definir métrica de nerviosidad | 15 |
| 2.5 Estrategias para aumentar la estabilidad en un plan maestro convencional | 16 |
| 2.6. Productos inteligentes..... | 18 |
| 2.7 PDS y sistemas multi agentes..... | 20 |
| 3. Materiales y métodos | 22 |
| 3.1. Arquitectura y descripción del sistema..... | 22 |
| 3.2 Simulación de datos..... | 25 |
| 3.3 Implementación de modelo de programación lineal..... | 27 |
| 3.4 Definición de medida para nerviosidad en la programación | 29 |
| 3.5 Desarrollo del sistema basado en agentes..... | 30 |
| 3.5.1 Diseño de código en NetLogo..... | 37 |
| 3.6 Diseño de experimentos..... | 39 |
| 4. Resultados y análisis | 40 |
| 4.1 Resultados..... | 40 |
| 4.1.1 Resultados caso 1 | 40 |
| 4.1.2 Resultados caso 2 | 46 |
| 4.2 Análisis de resultados | 51 |
| 5. Conclusiones | 53 |

Referencias 55

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Definición modelo MPS..... | 27 |
| Tabla 3.2: Extracto diseño experimental | 30 |
| Tabla 4.1: Resultados instancias caso 1..... | 41 |
| Tabla 4.2: Relación valores base y sistemas caso 1 | 41 |
| Tabla 4.3: Indicadores porcentuales caso 1 | 42 |
| Tabla 4.4: Resultados instancias caso 2..... | 46 |
| Tabla 4.5: Relación valores base y sistemas caso 2 | 46 |
| Tabla 4.6: Indicadores porcentuales caso 2..... | 47 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Ejemplo de enfoque de producto inteligente | 19 |
| Figura 2.2: Relación de agentes en arquitecturas de modelos MAS | 21 |
| Figura 3.1: Dinámica de comunicación de modelo propuesto | 23 |
| Figura 3.2: Diagrama de secuencia modelo | 24 |
| Figura 3.3: Pseudocódigo de diseño experimental BD | 26 |
| Figura 3.4: Esquema general del modelo | 31 |
| Figura 3.5: Patch y raza de agentes | 33 |
| Figura 3.6: Propiedades de agentes | 33 |
| Figura 3.7: Interfaz de software NetLogo | 34 |
| Figura 3.8: Diagrama de flujo modelo basado en agentes | 35 |
| Figura 4.1: Costo base vs costo sistema S1 caso 1 | 42 |
| Figura 4.2: Costo base vs costo sistema S2 caso 1 | 43 |
| Figura 4.3: Costo base vs costo sistema S3 caso 1 | 43 |
| Figura 4.4: Costo base vs costo sistema S4 caso 1 | 43 |
| Figura 4.5: Costo base vs costo sistema S5 caso 1 | 44 |
| Figura 4.6: Costo base vs costo sistema S6 caso 1 | 44 |
| Figura 4.7: Costo base vs costo sistema S7 caso 1 | 44 |
| Figura 4.8: Comparación costo base y costo sistema por instancia caso 1 | 45 |
| Figura 4.9: Comparación nerviosidad base y nerviosidad sistema por instancia caso 1 | 45 |
| Figura 4.10: Costo base vs costo sistema S1 caso 2 | 47 |
| Figura 4.11: Costo base vs costo sistema S2 caso 2 | 48 |
| Figura 4.12: Costo base vs costo sistema S3 caso 2 | 48 |
| Figura 4.13: Costo base vs costo sistema S4 caso 2 | 48 |
| Figura 4.14: Costo base vs costo sistema S5 caso 2 | 49 |
| Figura 4.15: Costo base vs costo sistema S6 caso 2 | 49 |
| Figura 4.16: Costo base vs costo sistema S7 caso 2 | 49 |
| Figura 4.17: Comparación costo base y costo sistema caso 2 | 50 |
| Figura 4.18: Comparación nerviosidad base y nerviosidad sistema caso 2 | 50 |
| Figura 4.19: Comparación de costos entre casos y base | 52 |
| Figura 4.20: Comparación de nerviosidad entre casos y base | 52 |

1. Introducción

1.1 Antecedentes generales

La principal función de prácticamente todas las organizaciones es crear productos o servicios mediante una serie de procesos. Para que logren ser efectivas y eficientes en su producción, es deseable que los directivos comprendan y apliquen algunos principios fundamentales en la planificación de productos y el control de los procesos involucrados. Uno de los desafíos más importantes de numerosas industrias es la incertidumbre en la estabilidad de la planificación de la producción, como consecuencia de las variaciones en la demanda. Estas fluctuaciones provocan perturbaciones en el sistema con impacto negativo en el rendimiento de la programación de la producción y con consecuencias perjudiciales para cualquier empresa (Chapman, 2006, Salazar, 2021).

La planificación y control de la producción es una función compleja en la industria, por el gran número de elementos y variables interrelacionadas en la combinación de unidades fabricadas y periodos, logrando así la satisfacción de clientes y simultáneamente optimizar los recursos disponibles (Sáez & Herrera, 2021). Para resultados positivos en términos de programación, es necesario conocer las características de la industria, y una proyección acertada de acuerdo con los objetivos de la empresa.

Es necesario destacar que las redes de producción, definidas como estructuras complejas e integrales serían eficientes dentro de un entorno estable, sin embargo, son susceptibles y vulnerables en un contexto complejo y dinámico. Es fundamental, reconocer que los cambios externos recurrentes no permiten llevar a cabo la planificación predictiva con precisión, por lo tanto, la planificación es utilizada como un plan de referencia en el que las desviaciones se producen con frecuencia (Herrera, C., Belmokhtar-Berraf, S., Thomas, A., & Parada, V. 2016).

Según los modelos revisados que permiten la planificación y control de la producción, se genera debate para definir estrategias de producción orientadas en entornos dinámicos. El enfoque está en la estabilidad en un plan maestro de producción con capacidad de responder a efectos adversos por variabilidad de la demanda y otras condiciones en los escenarios posibles. (Sáez, Herrera & Pezoa, 2022).

Para una planificación de producción adecuada se aplica la programación maestra de producción, que busca establecer un plan alcanzable y realista que cumpla con las exigencias de la compañía. La combinación de características del mercado permite adecuar la programación, alineándose a las capacidades y recursos disponibles por la empresa, sin embargo, existe un margen de incertidumbre que impide garantizar la estabilidad de una planificación, siendo relevante considerar el comportamiento de una métrica a usar en un entorno dinámico.

La literatura especializada considera con especial impacto el nerviosismo del plan de producción y la relación con la estabilidad de la producción. La inestabilidad también es una causa del nerviosismo, considerando ambos conceptos interdependientes, al aumentar el nerviosismo en un sistema, aumenta la inestabilidad del plan de producción. (Sáez, Herrera & Parada, 2023). Aunque algunos estudios experimentales y modelos cuantitativos recientes han abordado el nerviosismo en los sistemas de producción, no hay claridad para definir cuál es el enfoque más eficaz para mitigar el nerviosismo.

La búsqueda de respuestas para mejorar los problemas de una planificación en un entorno dinámico surgiría de la definición de los sistemas inteligentes de manufactura (*Intelligent Manufacturing Systems, IMS*). Estos sistemas constituyen una red integrada de recursos distribuidos y capaces de combinar simultáneamente el conocimiento y el procesamiento de materiales y mantener operaciones eficaces y eficientes con mínimo tiempo de inactividad en la reconfiguración, replanificación y reprogramación de las operaciones.

La inteligencia en la fabricación ha sido definida por múltiples autores a lo largo del tiempo (Saridis, 1988; Albus, 1991; Eicker, 1995; Hunt, 1995; Meystel & Messina; 2000), donde algunas características y atributos comúnmente aceptados son los siguientes:

- i. Capacidad de un sistema para actuar adecuadamente en un entorno incierto.
- ii. Realizar tareas con una interacción mínima con un operador humano.
- iii. Capacidad de sentir y razonar sobre objetos físicos.
- iv. Utilizar y combinar modelos de inteligencia por parte del sistema.
- v. Capacidad de adquirir y aplicar conocimientos.
- vi. Autonomía; auto mantenimiento, aprendizaje y reproducción.

El diseño de este sistema de fabricación inteligente se define para obtener soluciones configurables y flexibles, considerando que la gestión convencional de la fabricación evoluciona de forma constante

a la implementación de nuevas tecnologías. Los principales resultados se manifiestan en nuevos modelos que reaccionan dinámicamente durante el periodo de producción.

Por otra parte, junto con el desarrollo de tecnologías, la inteligencia artificial, el diseño y análisis de sistemas utilizando metodologías orientadas a objetos e interfaces, emergen los sistemas de producción controlados por productos (*Product Driven Systems, PDS*). Permiten incluir de forma natural el fenómeno denominado como nerviosismo. Un PDS es un sistema distribuido diseñado para apoyar la toma de decisiones operativas, su estructura es facilitada por la inclusión del paradigma holónico, es un enfoque para diseñar y operar módulos de fabricación autónomos y flexibles, encapsulando tanto elementos físicos como de software en el entorno de fabricación. Estos sistemas, definen a los productos como entidades inteligentes y artificiales que ejecutan y coordinan el proceso de control. (McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J. L., Wong, C., & Ashton, K, 2003)

El concepto de producto inteligente es crucial en el diseño de un PDS y ha sido definido de diversas formas en la literatura. Las características de estos productos consideran el enfoque de la producción controlada por el producto, con considerables mejoras en la calidad y rendimiento de la planificación, por la autonomía de los procesos internos para obtener resultados positivos en comparación con los sistemas convencionales, en términos de eficiencia y eficacia de la producción.

Adicionalmente, se define el concepto de sistemas multi agentes MAS, donde los agentes son solucionadores de problemas con razonamiento autónomo basado en reglas y respuestas tanto al entorno externo como interno. Por lo tanto, un MAS representa y modela agentes que razonan de forma autónoma, interactúan con otros agentes, se adaptan a los cambios y buscan ventajas de manera racional. En resumen: los agentes operan sin la intervención directa de humanos u otras personas que tengan control total de sus acciones y objetivos. Los agentes poseen capacidades para resolver problemas (Bond y Gasser, 1988).

1.2 Justificación de la investigación

El estudio de la nerviosidad es un tema crítico dentro de la planificación de la producción, permite identificar que estrategia implementar para minimizar los costos de operación en la industria y satisfacer las necesidades de los clientes. En el origen de la estabilidad de un sistema de producción existirían varias causas, algunas relacionadas con la estructura de costos, materias primas, el nivel de incertidumbre de la demanda y las reglas para definir el tamaño de lotes.

El principal factor que incide en el rendimiento de la programación maestra de la producción es la variabilidad de la demanda, obliga a actualizar frecuentemente las decisiones, provocando nerviosidad en el sistema. Como consecuencia, el costo global se deteriora y la productividad disminuye (Herrera, C., Belmokhtar-Berraf, S., Thomas, A., & Parada, V. 2016).

En el contexto de la industria moderna, es crucial que la planificación de la producción responda eficazmente a condiciones del mercado y mitigue los efectos adversos de la inestabilidad de la producción, comúnmente conocidos como nerviosismo. La integración de un sistema impulsado por el producto (PDS) con un enfoque holónico y su implementación utilizando un sistema multi agente (MAS) puede generar tiempos computacionales no viables en tiempo real, considerando que la toma de decisiones es descentralizada y podría entregar soluciones factibles para reducir el nerviosismo durante periodos específicos. (Sáez, Herrera & Parada 2023).

En este documento, se propone una metodología para medir la nerviosidad, respaldada por las investigaciones de Sridharan, Berry y Udayabhanu (1988) y C. Herrera, S. Belmokhtar-Berraf, A. Thomas y V. Parada (2016). Aplicada a un plan maestro de producción implementando una simulación en la plataforma NetLogo versión 6.3 y reducir la nerviosidad en distintos escenarios de prueba.

1.3 Objetivos

1.3.1 Hipótesis de investigación

El uso de un modelo PDS implementado con un sistema multi agente (MAS) permitiría disminuir la nerviosidad de la planificación de la producción.

1.3.2 Objetivo general

Diseñar un PDS mediante un sistema multi agentes que reduzca la nerviosidad en un plan de producción.

1.3.3 Objetivos específicos

- I. Definir métrica para medir nerviosidad en plan maestro de producción.
- II. Realizar la revisión de literatura acerca de la estabilidad en plan maestro de producción.
- III. Estudiar métodos de aplicación para resolver problemas de nerviosidad.
- IV. Diseñar simulación con agentes inteligentes que permitan reflejar escenario propuesto para medición de nerviosidad en NetLogo.
- V. Comparar resultados con plan maestro de producción y resultados de modelo de optimización con sistema basado en agentes inteligentes que considere heurística de reducción de nerviosidad.

1.4 Limitaciones del estudio

Esta investigación considera un entorno de producción de 5 productos en un horizonte temporal de planificación de producción de 1 año, dividido en 52 semanas con un periodo móvil de 8 semanas para cada iteración realizada. Los datos y modelos utilizados son experimentales, simulando un escenario lo más cercano a la realidad. El estudio se caracteriza lo más posible en representar un escenario real, sin embargo, los valores utilizados son obtenidos de manera aleatoria.

2. Marco teórico

2.1 Sistemas de producción

Se define un sistema de producción de una organización como el responsable de la producción de bienes y/o servicios. Su función es transformar en forma sistemática y planificada un conjunto de insumos en un producto deseado, por medio del proceso de transformación. La gestión eficiente de los recursos productivos y el proceso de transformación son un factor de gran impacto en la mejora de productividad y competitividad, utilizan herramientas virtuales que permiten evaluar y analizar los

sistemas antes de realizar implementaciones en el mundo real (Erik Lindskog, Johan Vallhagen & Björn Johansson, 2017).

Han surgido nuevas perspectivas que han despertado un creciente interés en la industria al introducir elementos de agilidad, adaptabilidad, autonomía y flexibilidad en los sistemas de producción, a través de una toma de decisiones descentralizada y distribuida. El desarrollo de sistemas inteligentes permite responder dinámicamente al reto computacional que plantea la programación de los sistemas de producción.

Tradicionalmente, el término programación en los sistemas de producción se refiere a la secuenciación de operaciones para asegurar el cumplimiento de una serie de restricciones establecidas en el proceso y la optimización de alguna medida de rendimiento de interés.

2.2 Planificación y control de la producción

La planificación es una actividad a priori y se debe desarrollar antes de ejecutar cualquier tarea, evitando errores y riesgos de no conseguir los objetivos pretendidos. Es necesaria, porque precede a la definición de presupuestos, entendiendo un presupuesto como la materialización económica de las actividades programadas (Terrazas P. 2011).

En el contexto de la planificación de la producción, se dispone de un plan maestro, que permite desagregar las líneas de productos en unidades y en que periodos deben ser producidos, con orden temporal en la secuencia productiva de cada lote de producto.

Para una planificación y control efectiva, un programa maestro de producción debe ajustarse periódicamente en función de la demanda. Como consecuencia a este ajuste continuo se generaría un fenómeno conocido como nerviosismo con inestabilidad en la programación. El nerviosismo es una característica de un sistema de planificación, cuando pequeños cambios en los registros de nivel superior o en el programa maestro provocan alteraciones significativas en el calendario o en la cantidad de programas y pedidos de nivel inferior (Herrera, C., Belmokhtar-Berraf, S., Thomas, A., & Parada, V. 2016).

Los sistemas convencionales de planificación y control de la producción consideran jerarquías entre distintos niveles de agregación de producto, generando una programación de la producción monótona y estática. Sin embargo, la industria exige que los sistemas de fabricación sean flexibles, dinámicos y

capaces de reaccionar de inmediato ante las perturbaciones. Estos aspectos son críticos durante la fase de diseño, es necesario integrar las ventajas del modelo tradicional. Estos modelos son la base del sistema de control del proceso de fabricación y consideran implementar los datos históricos con datos del sistema en tiempo real, generando decisiones dinámicas para alcanzar un estado estacionario de optimalidad, sin embargo, el sistema de control debe proporcionar soluciones dinámicas y casi óptimas en un tiempo de cálculo acotado (Sáez, P., Herrera, C., & Pezoa, J. E. 2022).

2.3 Estabilidad en un plan maestro de producción

Se define la estabilidad de los sistemas de fabricación, como un atributo que ante un determinado nivel de variación en las cantidades a producir y/o irrupciones en la línea de producción no existan cambios significativos en la planificación, buscando que las condiciones del sistema se mantengan sin grandes alteraciones (Sáez, P.; Herrera, C.; Parada, V 2023).

Preservar la estabilidad de un plan maestro de producción en relación con los cambios en las necesidades de los clientes y la volatilidad de la demanda, ajustes en las previsiones de ventas y problemas imprevistos con los proveedores o la producción, es difícil para muchas empresas especialmente en las que el servicio al cliente es un factor competitivo importante (Sridharan, S. V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. 1988).

Dado el desafío de muchas empresas industriales, la solución propuesta para evitar el nerviosismo permitiría a dichas empresas programar sus producciones con menor incertidumbre y conocer el comportamiento de la nerviosidad en la planificación. El interés principal se centra en aquellas empresas con un alto nivel de estabilidad en relación a las programaciones computadas por conveniencia práctica (Sáez, P., Herrera, C., & Pezoa, J. E. 2022).

2.4 Estudios para definir métrica de nerviosidad

La nerviosidad en el plan de producción es definida como un atributo que genera dificultades para conseguir un sistema de producción estable y mantener supervisión constante y por consecuencia una desconfianza e incertidumbre en la planificación.

La introducción de una medida de nerviosidad permite comparar el rendimiento de diferentes procedimientos y gestionar el plan maestro de producción (MPS) en una variedad de condiciones operativas. Al construir un indicador de la estabilidad dentro de una programación de la producción, es más sencillo medir el nerviosismo del plan. Blackburn, Kroop y Millen et. al (1986) sugirieron la inestabilidad del programa como el número de pedidos no planificados realizados en el periodo actual en un entorno de horizonte móvil. Registraron la frecuencia con que se alteraron los pedidos planificados en el periodo actual, sin embargo, un problema de esta medida es la enumeración y puede acercarse rápidamente al valor deseado cero a medida que aumenta el horizonte de planificación. Además, considerando la congelación del MPS, no es adecuado considerar cambios solo en el periodo actual, ya que estas variaciones pueden ocurrir en cualquier periodo (Sridharan, S. V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. 1988).

Se usan diferentes medidas para evaluar numéricamente la inestabilidad (Sridharan, Berry, y Udayabhanu 1988; Kimms 1998; Pujawan 2004; Kabak y Ornek 2009). Con un horizonte de planificación renovable n con una periodicidad específica t que se refiere a los ciclos. La reprogramación es útil para planificar la entrega de materias primas y ajustar la demanda a la capacidad de los recursos. La inestabilidad es las diferencias entre las cantidades programadas por el MPS en diferentes ciclos (Sáez, P., Herrera, C., & Pezoa, J. E. 2022).

En el estudio de C. Herrera, S. Belmokhtar-Berraf, A. Thomas y V. Parada (2016), se propone una medida de inestabilidad global sin diferencias entre los periodos de planificación, considerando que las decisiones más tempranas ya se han reprogramado, con mayor peso a desviación de los valores precedentes. Además, las cantidades potenciales generan compromisos como pedidos de materias primas. De este modo, la medida propuesta pondera todos los periodos del horizonte de planificación con el mismo peso e informar las diferencias de los planes anteriores a la demanda, obteniendo el producto más inestable para considerar el peor caso entre todo el grupo de productos.

2.5 Estrategias para aumentar la estabilidad en un plan maestro convencional

En la literatura se han sugerido varias formas de mitigar el nerviosismo en la programación de la producción, se destacan el congelamiento del MPS, utilizar vallas de planificación y utilizar procedimientos de dimensionamientos de lotes de forma selectiva (Sridharan, S. V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. 1988).

El congelamiento del plan maestro de producción implica establecer un plan fijo sin realizar modificaciones considerando los cambios en la demanda u otros eventos externos que puedan influir. Los principales aspectos negativos de ésta se resumen en falta de flexibilidad y adaptabilidad ante cambios, generando posibles problemas en la producción como la falta de productos disponibles o bien la acumulación de inventario. Esta alternativa puede ser viable cuando se genera un escenario con demanda predecible y estable, pero es complejo de conseguir en la práctica. Además, existe el riesgo de obsolescencia de productos fabricados con ciclos de vida limitados y un periodo extenso de congelamiento de la producción, pueden ser declarados obsoletos al momento en venta.

Sobre las vallas de planificación, buscan minimizar las interrupciones existentes en la cadena de suministro y con foco en la optimización del flujo productivo, actuando como puntos intermedios ubicados de manera estratégica para gestionar de mejor forma las etapas del proceso. Una de las ventajas de esta medida es la amortiguación entre diferentes etapas, permitiendo mayor control y equilibrio en el flujo de entrada y salida de materiales y productos.

El dimensionamiento selectivo de lotes resulta significativo en la planificación de la producción para encontrar el tamaño óptimo de lotes a fabricar en un periodo determinado. Una característica de esta estrategia es la adaptación de los lotes, no necesariamente se producen lotes de tamaño homogéneo dentro de todo el periodo de producción, adaptándose a las necesidades y recursos disponibles en cada periodo.

El objetivo de las estrategias mencionadas es reducir la nerviosidad en un plan maestro de producción, no obstante, el fondo de cada una es obtener minimización del costo total de la producción y maximizar la eficiencia del plan. La capacidad de respuesta ante irrupciones impredecibles en el pronóstico preliminar de cualquier tipo de producción es una variable fundamental en el futuro de las industrias, ya que, un sistema de producción adecuado dentro de un entorno dinámico y complejo es apto para escenarios inesperados con fluctuaciones del entorno, obteniendo una ventaja competitiva respecto a los demás en el mercado, ósea, es muy necesario obtener una métrica que permita conocer el comportamiento.

2.6. Productos inteligentes

El concepto de producto inteligente es fundamental en el diseño de los PDS (*Product Driven Systems*), y su definición varía en la literatura, cada una de éstas se centran en determinados aspectos de productos inteligentes y sus áreas de aplicación. McFarlane & Wong et al. (2002) definen un producto inteligente como una representación física y basada en información de un producto con las siguientes propiedades:

1. Posee identificación única.
2. Habilidad para comunicarse eficazmente con su entorno.
3. Puede retener o almacenar datos sobre sí mismo.
4. Despliega un lenguaje para mostrar sus características, requisitos de producción, etc.
5. Es capaz de participar o tomar decisiones relevantes para su propio destino.

Wong (2002) plantea una clasificación de la inteligencia en dos niveles. Cuando el producto cubre los puntos 1-3 se considera orientado a la información y se denomina producto con inteligencia de nivel 1, mientras que si cubre todos los puntos se dice que es orientado a la toma de decisiones con inteligencia de nivel 2.

Karkkainen et. al (2003) define como idea principal de un producto inteligente, el control de “adentro hacia afuera” de los pedidos de la cadena de suministro y de los productos durante su ciclo de vida. Es decir, los propios individuos del producto en la cadena de suministro controlan hacia donde van y como deben ser tratados. Para pasar al control de los productos desde dentro hacia afuera deben poseer las siguientes características:

1. Código de identificación único a nivel mundial.
2. Enlaces a fuentes de información sobre el producto más allá de las fronteras de la organización, incluidos en el propio código de identificación o accesibles mediante algún mecanismo.
3. Puede comunicar lo que hay que hacer con ellos a sistemas de información y usuarios cuando sea necesario.

Venta et. al (2007) se refiere por inteligencia a productos y sistemas aquellos que cumplan con:

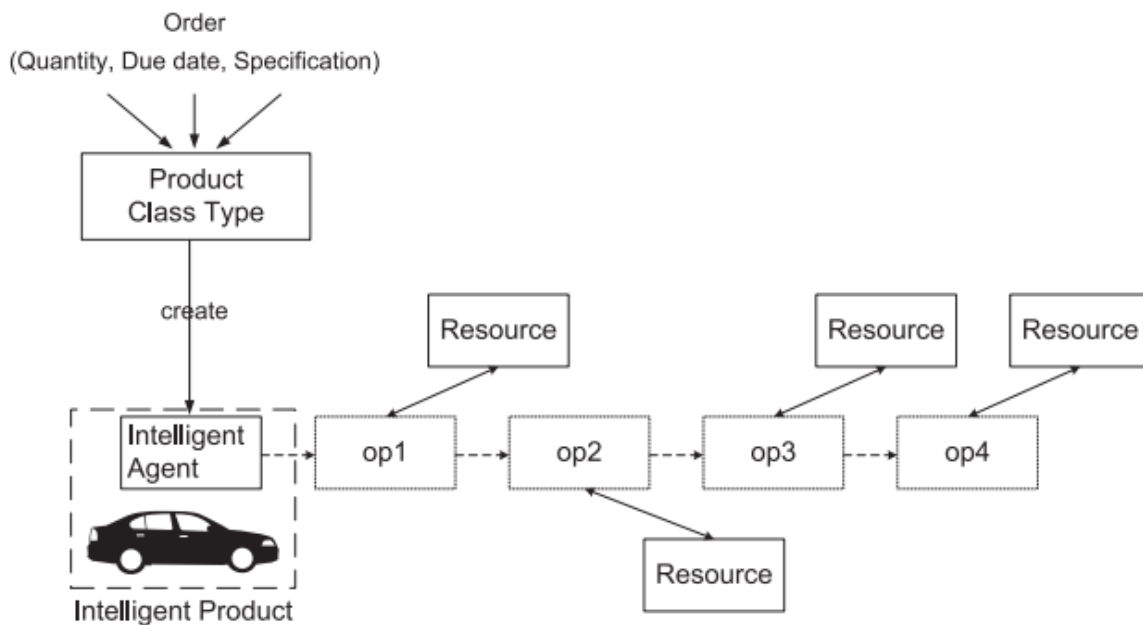
1. Controlar continuamente su estado y entorno
2. Reaccionan y se adaptan a las condiciones.

3. Mantienen un rendimiento adecuado en circunstancias variables, incluso en casos excepcionales.
4. Se comunican activamente con el usuario, entorno o con otros productos y sistemas.

Esta definición amplía aspectos específicos de otras definiciones, considerando que se centra más en los productos con suficiente potencia informática integrada para comunicarse directamente con otros sistemas de información.

Se destaca que el producto más inteligente es aquel que puede autogestionarse su existencia y es capaz de tomar las decisiones relevantes por sí mismo, sin intervenciones externas, alineado con el concepto de control de productos desde “dentro hacia afuera” en la definición de Karkkainen. Dentro de este estudio, se utiliza la definición dada por McFarlane & Wong (2002) para un producto inteligente.

Figura 2.1: Ejemplo de enfoque de producto inteligente



Fuente: Chim & McFarlane (2000)

En figura 2.1 se representa un enfoque de producto inteligente, donde se describe la vinculación de un pedido físico o producto con la información y reglas que rigen como se pretende almacenar, fabricar o transportar el producto. En esta figura se crea un agente de software inteligente que acompaña a un automóvil a través de su producción, donde el producto inteligente negocia una ruta de montaje con diferentes recursos de producción. (Chim & McFarlane, 2000).

2.7 PDS y sistemas multi agentes

Los sistemas de producción impulsados por productos (PDS) han adoptado mayor relevancia con el transcurso del tiempo, aportando valor a la manufactura en términos de eficacia y eficiencia. Estos sistemas son modelos que consideran los productos como entidades inteligentes y artificiales capaces de ejecutar y coordinar procesos de control en la planificación, permitiendo que se genere una reconfiguración dinámica de los recursos. Esta capacidad agrega a los sistemas agilidad ante los cambios posibles ocasionados por nerviosismos en el plan de producción. La implementación beneficiosa de un PDS se permite por el uso de un sistema multi agente. (Sáez, Herrera & Parada, 2023).

Un sistema multi agente MAS, es un sistema compuesto por múltiples entidades que conviven en un ambiente e interactúan entre sí para cumplir con los objetivos individuales. Cada entidad o agente, es un componente que reside en un ambiente y opera en respuesta a algún estímulo o instrucción específica. En la literatura, se entiende por un enfoque de desarrollo basado en la distribución, autonomía y cooperación de las entidades virtuales, que razonan interactuando con otros buscando ventajas de manera racional y tienen la capacidad necesaria para organizarse de forma autónoma y combinar el mundo virtual y físico.

Los sistemas MAS sustituyen el control centralizado por una funcionalidad distribuida entre los agentes que conduce a la aparición de un comportamiento global inteligente. Durante el desarrollo de nuevas arquitecturas de sistemas de control, estos sistemas han tomado gran importancia, permiten alcanzar estándares positivos en términos operacionales y económicos (Allwood & Lee, 2005, Montecinos Matamala, 2016).

Dentro de los sistemas MAS, se identifican diferentes tipos de agentes con distintos grados de capacidades de resolución de problemas en los dominios específicos del sistema. Las arquitecturas MAS varían según la complejidad, o sea: la cantidad de agentes, diseño del sistema, número de variables que determinan el comportamiento de toma de decisiones de los agentes, entre otros puntos (Lee, 2008).

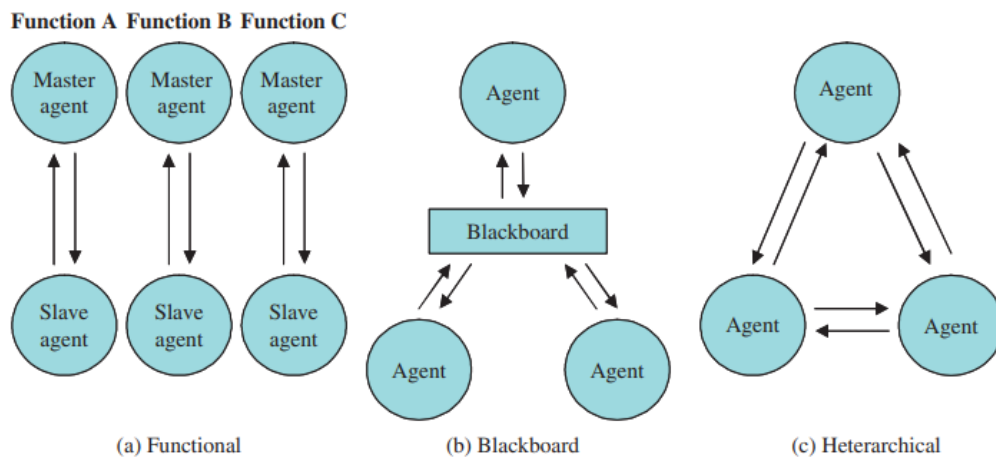
Moulin y Chaibdraa et. al (1996) distinguen tres categorías de agentes cooperativos: reactivos, intencionales y sociales. Los reactivos responden principalmente a cambios mentales o mensajes de otros agentes. Los agentes intencionales actúan de forma aparentemente autónoma y racional, ideando

y ejecutando planes de acción basados en la actualización de información y, por último, los agentes sociales poseen ciertas propiedades de ambos tipos al formular y ejecutar planes de acción. La taxonomía arquitectónica de estos autores tiene relación con el nivel de autonomía y racionalidad de los agentes.

Baker et al. (1998) plantean tres arquitecturas de modelado MAS centradas en la estructura de gobernanza, denominadas arquitecturas funcionales, de pizarra y heterárquicas. La arquitectura funcional organiza cada función de un proceso total como un agente único, se relacionan y comunican entre sí. Las arquitecturas de pizarra son un sistema más distribuido de toma de decisiones, donde las funciones del proceso se comparten entre agentes, teniendo en cuenta, que cada entidad puede tener experiencia en áreas específicas. Cuando las soluciones a un problema sean parciales, los agentes involucrados en la ejecución de las funciones publican el trabajo pendiente en un tablero central, es por ello, la definición del término arquitectura de pizarra.

La arquitectura, denominada heterárquica, contiene una combinación de las dos primeras arquitecturas definidas, al presentar agentes heterogéneos que cooperan en relaciones jerárquicas. Estas relaciones, a diferencia de la arquitectura funcional no son predeterminadas, sino que surgen de la necesidad de los agentes para responder a los requerimientos del sistema en determinado momento. Esta arquitectura ofrece una mayor variedad de rutas de proceso, incorporando en el sistema mayor flexibilidad considerando la disponibilidad de rutas alternativas gracias al comportamiento descentralizado de los agentes. En la figura 2.2 se presenta un diagrama que interpreta las diferencias en las relaciones de los agentes entre cada una de las arquitecturas descritas.

Figura 2.2: Relación de agentes en arquitecturas de modelos MAS



Fuente: Lee (2008)

Aunque las arquitecturas heterárquicas han sido empleadas en plantas de producción en diferentes entornos de aplicación, las configuraciones mixtas de arquitectura ofrecen un mayor grado de realismo en la simulación de situaciones reales. En la fabricación, se ha desarrollado el enfoque holónico, en el que las jerarquías de agentes y funciones no se relacionan entre sí según ninguna forma convencional de organización. (Lee, 2008).

Esta integración entre un PDS con un sistema holónico, seguida por la implementación de un sistema multi agente puede brindar la capacidad de abordar eventos reales a nivel de sistemas de manufactura de manera robusta.

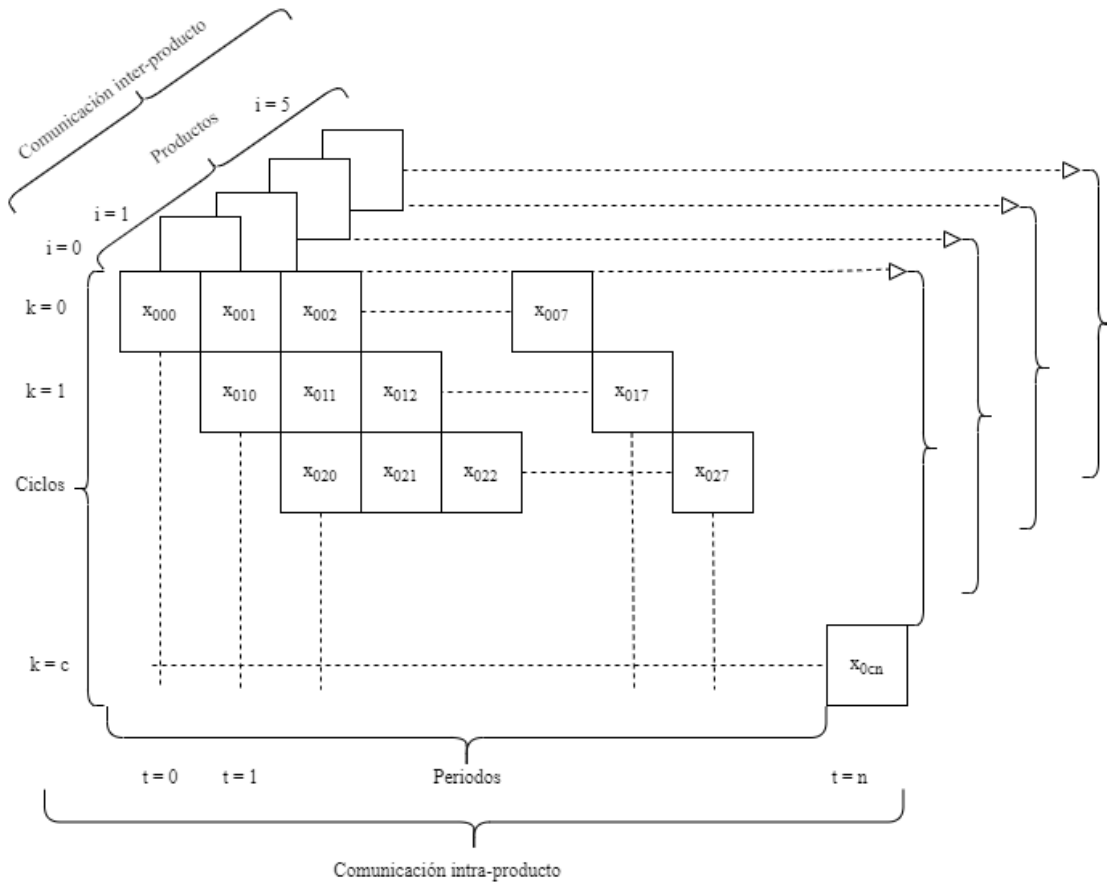
Las aplicaciones industriales más exitosas de la literatura respecto a los sistemas multi agentes, usan sistemas piloto basados en simulación que permiten validar las arquitecturas presentadas como propuesta frente a los diseños convencionales evaluando los rendimientos. Las aplicaciones de sistemas MAS sugieren que una nueva organización de los procesos de toma de decisiones de los agentes puede conducir a la mejora u optimización del desempeño en la gestión de la variabilidad del sistema, considerando en este contexto, la estabilidad de la planificación como el atributo clave a mejorar.

3. Materiales y métodos

3.1. Arquitectura y descripción del sistema

El sistema definido en la presente investigación comprende 5 productos con una planificación para 52 semanas, equivalente a un año de producción con un periodo móvil de 8 semanas. Estos valores son reflejados en la matriz almacenada en cada iteración realizada durante el proceso de simulación de datos. Se implementa un diseño experimental con datos simulados y posteriormente ejecutados en un modelo MPS con restricciones asociadas a condiciones para el inventario, capacidad y producción dentro de la planificación. En la figura 3.1 se presenta la dinámica de la comunicación existente en el proceso. Además, se considera que cada variable forma un vector en cada periodo y ciclo, ya que son 5 productos en cada periodo de producción.

Figura 3.1: Dinámica de comunicación de modelo propuesto



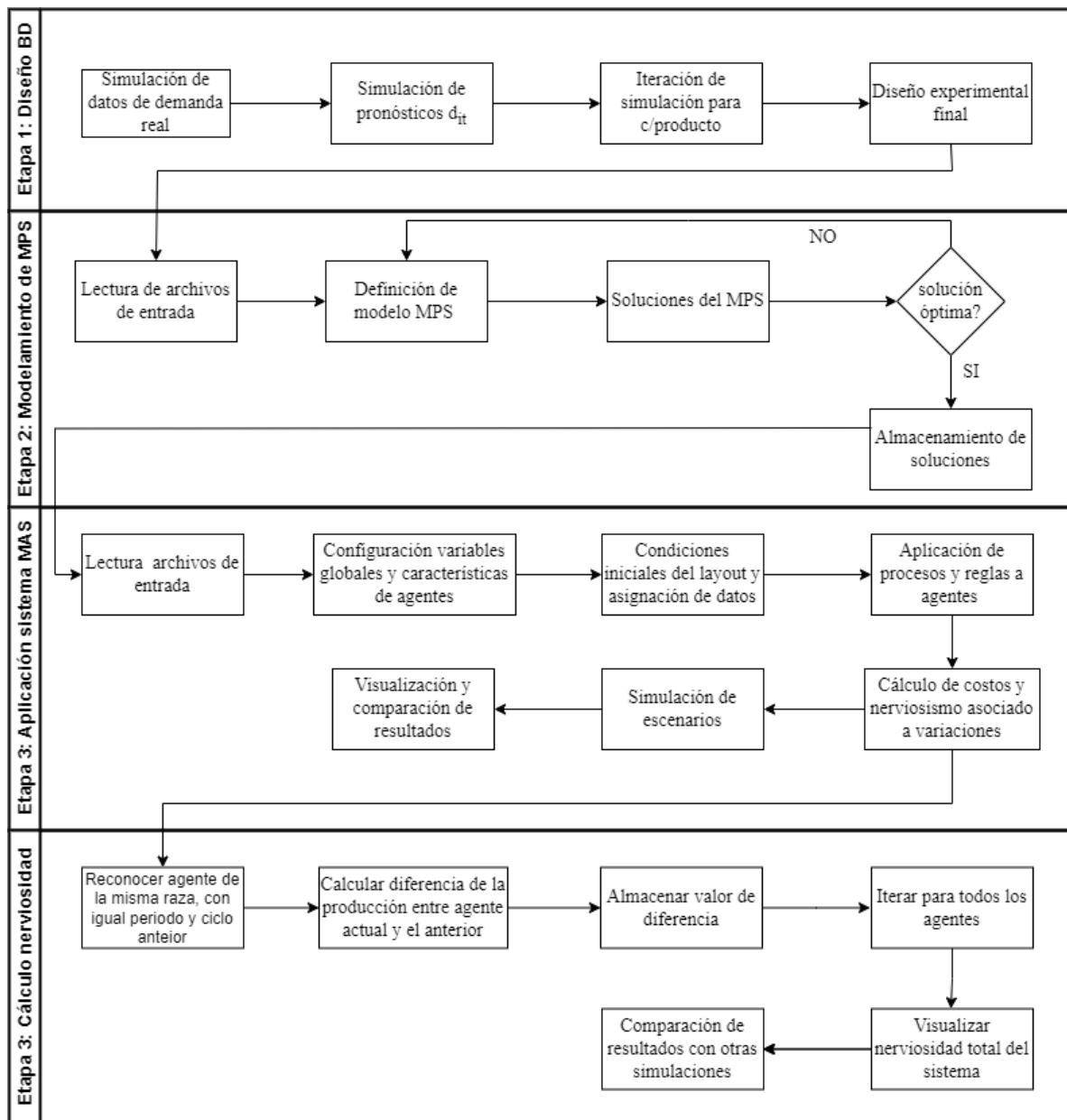
Fuente: Elaboración propia a partir de Sáez, Herrera & Parada et. al (2023)

En la figura 3.2 se presenta un diagrama de secuencia del modelo siguiendo la estructura propuesta. En la etapa 1 se desarrolla la simulación de datos para obtener un caso experimental buscando la mayor cantidad de similitudes a un caso práctico real. A continuación, en la etapa 2, se resuelve el algoritmo y se genera la solución óptima para el MPS propuesto, cargando las soluciones en archivos de texto. En la tercera etapa, los resultados obtenidos de la etapa 2 son ingresados como datos de entrada a la plataforma NetLogo y posteriormente se ejecuta el código que organiza los datos de forma temporal, asignando cada columna a un periodo y cada fila a un ciclo, para luego aplicar las funciones definidas que permiten obtener resultados.

El cálculo de la nerviosidad del plan se evidencia en la etapa 4, donde los agentes interactúan generando un traspaso de información entre ellos y calcular la nerviosidad en cada simulación. Esta etapa responde principalmente a la comunicación que se genera entre los agentes considerando la evaluación permanente de la producción siguiendo las reglas definidas en las funciones en NetLogo.

Los agentes se comunican con otros agentes del mismo producto en el ciclo y periodo correspondiente para la evaluación de la cantidad de producción y de manera simultánea se relacionan con agentes de otra familia de producto para evitar superar la capacidad de producción total asignada para la producción y lograr alcanzar la demanda del sistema. (Sáez, Herrera, Parada, 2023).

Figura 3.2: Diagrama de secuencia modelo



Fuente: Elaboración propia

3.2 Simulación de datos

Para obtener un diseño experimental con el cual trabajar y analizar se desarrolla una simulación en base a la generación de valores aleatorios, donde el principal objetivo es obtener un diseño para ejecutar el modelo y obtener datos para la demanda de productos durante el horizonte de planificación definido. El proceso para llevar a cabo esta simulación en lenguaje de programación Python, se resume en los siguientes pasos:

1. Importar bibliotecas para ejecución del entorno.
2. Configuración de parámetros iniciales: número de productos, horizonte de planificación y periodo.
3. Crear lista vacía ‘matrices’ que almacena las matrices generadas.
4. Generar datos para cada producto, obteniendo diferentes matrices en cada iteración.
 - 4.1. Inicializar matriz llena con ceros y dimensiones especificadas por el horizonte de planificación.
 - 4.2. Generar valores aleatorios mediante distribución utilizados como la demanda real de cada producto, ajustando estos para que sean números enteros y almacenarlos en una lista.
 - 4.3. Completar la matriz con valores aleatorios de acuerdo con una distribución normal, recorriendo fila por fila moviéndose diagonalmente hacia la derecha.
5. Almacenar matrices.
6. Escritura y exportación de datos en archivos de texto.
7. Creación de DataFrames a partir de las matrices para obtener mayor orden de los datos.
8. Visualización de datos en consola.

La demanda “real” de cada producto se simula obedeciendo a una distribución uniforme con valor 1000 para el parámetro que representa el valor mínimo y 1200 para el valor máximo, $d \sim (1000,1200)$. Los valores de producción d_{kt} para cada periodo y ciclo correspondiente, son obtenidos utilizando una distribución normal $d_{kt} \sim (\mu, \sigma)$, donde la media μ está dada por la demanda real del producto i en el periodo t y una desviación $\sigma = 2,5\%$ con respecto a la media. El valor de σ , es obtenido considerando una desviación de 20% dentro del periodo móvil completo por cada ciclo (igual a 8) y se divide la desviación total entre cada uno de los periodos de forma equitativa alcanzando el valor utilizado. El proceso de simulación de datos es realizado mediante un código implementado en lenguaje de programación Python, la Figura 3.3 con pseudocódigo del proceso.

Figura 3.3: Pseudocódigo de diseño experimental BD

Algorithm 1 Simulación de datos: Diseño experimental

```

n ← 59
num-valores-fila ← 8
iteraciones ← 5
matrices ← []
for i in range iteraciones do
    matriz-superior ← matriz de ceros tamaño nxn
    demanda real ← lista que almacena n valores aleatorios uniformes
    entre (1000, 1200)
    demanda-real-enteros ← lista con valores enteros de demanda-real
    for fila in range n do
        for columna in range num-valores-fila do
            if fila + col < n then
                media ← demanda-real-enteros[col]
                desv-std = 0.025 * media
                valor ← generar valor aleatorio normal con media y desv-std
                matriz-superior [fila, fila + col] ← valor convertido en entero
            end if
        end for
    end for
    matrices ← agregar matriz-superior
    Guardar matriz-superior en archivo txt
end for

```

Fuente: Elaboración propia

Definir parámetros iniciales, los cuales son: n que se refiere al número de periodos, num-valores-fila que representa el valor del periodo móvil e iteraciones que es la cantidad de productos. El bucle principal del proceso permite realizar la simulación de datos por cada producto, obteniendo una matriz con los datos requeridos para cada uno, considerando en las iteraciones que los valores aleatorios siguen los patrones establecidos en el código y que, por cada ciclo, el periodo se desplaza hacia la derecha moviéndose un espacio (1 semana por ciclo).

Como salida del código se obtienen archivos de texto con cada una de las matrices de demanda por producto, que son posteriormente utilizadas para ejecutar el modelo de programación lineal.

3.3 Implementación de modelo de programación lineal

La planificación de la producción se obtiene mediante un problema de optimización que determina las cantidades óptimas a producir para cada producto en cada periodo. El modelo matemático planteado considera la minimización de costos en función a la cantidad a producir en determinado momento. El modelo define variables dependientes al periodo “ t ” y al producto “ i ” en el ciclo de producción k , las cuales son la cantidad de producción x_{it} , la cantidad de producto en inventario s_{it} , cantidad de pedidos pendientes r_{it} y la variable de preparación o setup y_{it} . El modelo considera parámetros como datos de entrada para la ejecución, como la demanda d_{it} , costo de producción p_{it} , costo de nivel de inventario h_{it} , costo de pedidos pendientes b_{it} , costos de preparación q_{it} y la capacidad del sistema C_t . Por lo tanto, de acuerdo con lo mencionado, el modelo queda como sigue:

Tabla 3.1: Definición modelo MPS

| Parámetros | |
|-----------------------|---|
| d_{it} | Demanda de producto i en periodo t |
| p_{it} | Costo de producción producto i en el periodo t |
| h_{it} | Costo de inventario producto i en el periodo t |
| b_{it} | Costo de pedidos pendientes producto i en el periodo t . |
| q_{it} | Costo de preparación producto i en el periodo t |
| C_t | Capacidad de producción en periodo t . |
| M | Parámetro suficientemente grande. |
| Variables de decisión | |
| x_{it} | Cantidad de producción de producto i en el periodo t |
| s_{it} | Cantidad de inventario de producto i en el periodo t |
| r_{it} | Cantidad de pedidos pendientes de producto i en el periodo t |
| y_{it} | Preparación de producto i en el periodo t en ciclo k . $y_{it} = 1 \leftrightarrow x_{it} > 0 \forall i, \forall t$ |

Las ecuaciones matemáticas se presentan a continuación:

$$\text{mín } f: \sum_{i=1}^n \sum_{t=k}^t (p_{it}x_{it} + h_{it}s_{it} + b_{it}r_{it} + q_{it}y_{it}) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$s_{i0}^0 = s_{ini}^0, r_{i0}^0 = r_{ini}^0, i \in [1, \dots, n] \quad (2)$$

$$s_{i(t-1)} - r_{i(t-1)} + x_{it} = d_{it} + s_{it} - r_{it}, i \in [1, \dots, n], t \in [k, \dots, t'] \quad (3)$$

$$x_{it} \leq M y_{it}, i \in [1, \dots, n], t \in [k, \dots, t'] \quad (4)$$

$$\sum_i^n x_{it} \leq C_t, t \in [k, \dots, t'] \quad (5)$$

$$x_{it}, s_{it}, r_{it} \geq 0, \quad y_{it} \in \{0,1\}, \quad t' = k + n - 1$$

Fuente: Elaboración propia a partir de Sáez, Herrera, Parada (2023)

Las ecuaciones permiten obtener una planificación de producción donde se minimicen los costos en cada ciclo. La ecuación 1, representa la función objetivo de este modelo, la que tiene como propósito minimizar los costos que inciden en el plan maestro de producción gestionando el inventario y los pedidos pendientes de forma factible.

La ecuación (2) establece una condición inicial específica para el inventario y los pedidos pendientes, mientras que la restricción (3) se encarga de garantizar condiciones del equilibrio que se genera entre el inventario y los pedidos pendientes, considerando la producción y la demanda en determinados instantes de producción. Por último, la ecuación (4), permite establecer una relación entre la producción y el setup que requiere producir en ese instante, considerando que $y_{it} = 1$ cuando hay producción y la ecuación (5) valida que la producción está limitada a una capacidad finita definida en el plan.

Este problema de optimización considera cada ciclo k en relación con los programas de ciclo precedentes, considerando la función objetivo entre las cantidades a producir y la correspondiente al ciclo $k - 1$.

La implementación del modelo se realiza usando un lenguaje de programación Python en la plataforma Google Colab, buscando obtener los valores de las variables definidas gracias a una solución óptima que minimice los costos del plan de producción.

El diseño del código comienza con importar las bibliotecas necesarias para la ejecución del modelo, en este caso, numpy y Pulp. Luego, se leen archivos de texto provenientes de la simulación de datos, almacenándolos en una lista para ejecutar las celdas del código, considerando la definición de parámetros, variables y restricciones del modelo. Los valores de los costos y capacidad de la producción son definidos como parámetros fijos en el modelo.

Se resuelve el problema de optimización, encontrando la solución óptima que cumple con las restricciones, entregando los resultados para la cantidad de producción, inventario, pedidos pendientes y la asignación de setup para cada semana.

Los datos resultantes en esta etapa se utilizan como el plan de producción base para el desarrollo de la investigación, implementando estos valores como los iniciales en la plataforma de simulación NetLogo.

3.4 Definición de medida para nerviosidad en la programación

De acuerdo con la investigación de P. Sáez, C. Herrera y V. Parada (2023) se presenta una medida de la nerviosidad del sistema en la planificación maestra de la producción, con un enfoque sistemático que incorpora estrategias orientadas al producto. Este indicador se utiliza bajo la lógica que, a medida que disminuye la nerviosidad, aumenta la estabilidad del plan de producción.

La métrica utilizada se presenta como la diferencia en la cantidad de producto i que se producirá en el periodo t durante el ciclo de producción k , en comparación con la producción en el ciclo anterior. La nerviosidad del sistema se puede obtener definiendo la siguiente ecuación que representa lo mencionado:

$$N_{pti} = \sum_{k=1}^p \left| X_{it}^k - X_{it}^{(k-1)} \right|, \forall k, \forall i, \forall t \quad (6)$$

Donde X_{it}^k representa la cantidad programada del producto final i para el periodo t en el ciclo k y p es el horizonte de planificación utilizado en este caso, equivalente a la cantidad de periodos. En la tabla 3.2 se presenta un extracto de la matriz resultante para calcular la nerviosidad en este diseño experimental. Por ejemplo, la nerviosidad para el periodo 8 está dada por la suma de las diferencias de los valores $x_{08}^1, x_{08}^2, x_{08}^3, x_{08}^4, x_{08}^5, x_{08}^6, x_{08}^7$ y x_{08}^8 .

Tabla 3.2: Extracto diseño experimental

| k/t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | x_{00}^0 | x_{01}^0 | x_{02}^0 | x_{03}^0 | x_{04}^0 | x_{05}^0 | x_{06}^0 | x_{07}^0 | | | | | | | | |
| 1 | | x_{01}^1 | x_{02}^1 | x_{03}^1 | x_{04}^1 | x_{05}^1 | x_{06}^1 | x_{07}^1 | x_{08}^1 | | | | | | | |
| 2 | | | x_{02}^2 | x_{03}^2 | x_{04}^2 | x_{05}^2 | x_{06}^2 | x_{07}^2 | x_{08}^2 | x_{09}^2 | | | | | | |
| 3 | | | | x_{03}^3 | x_{04}^3 | x_{05}^3 | x_{06}^3 | x_{07}^3 | x_{08}^3 | x_{06}^3 | x_{010}^3 | | | | | |
| 4 | | | | | x_{04}^4 | x_{05}^4 | x_{06}^4 | x_{07}^4 | x_{08}^4 | x_{09}^4 | x_{010}^4 | x_{011}^4 | | | | |
| 5 | | | | | | x_{05}^5 | x_{06}^5 | x_{07}^5 | x_{08}^5 | x_{09}^5 | x_{010}^5 | x_{011}^5 | x_{012}^5 | | | |
| 6 | | | | | | | x_{06}^6 | x_{07}^6 | x_{08}^6 | x_{09}^6 | x_{010}^6 | x_{011}^6 | x_{012}^6 | x_{013}^6 | | |
| 7 | | | | | | | | x_{07}^7 | x_{08}^7 | x_{09}^7 | x_{010}^7 | x_{011}^7 | x_{012}^7 | x_{013}^7 | x_{014}^7 | |
| 8 | | | | | | | | | x_{08}^8 | x_{09}^8 | x_{010}^8 | x_{011}^8 | x_{012}^8 | x_{013}^8 | x_{014}^8 | x_{015}^8 |

Fuente: Elaboración propia

Una de las consideraciones relevantes, es definir que la diferencia se considera hasta los términos iniciales de cada ciclo, es decir, la última operación realizada al momento de calcular la nerviosidad debe ser entre valores hasta la diagonal principal de la matriz. En el caso de la nerviosidad en el periodo 8, la diferencia entre x_{08}^7 y x_{08}^8 son los últimos términos utilizados. Esto con el propósito de evitar obtener valores significativamente grandes considerando la diferencia entre valores iniciales de cada ciclo y un valor igual a cero que corresponde al siguiente valor en la matriz con respecto al ciclo y a la vez un término que es considerado cero por la definición de periodo móvil inicial para la planificación. De este modo, se excluye esa operación que, al incluirse, altera una visualización adecuada de la nerviosidad.

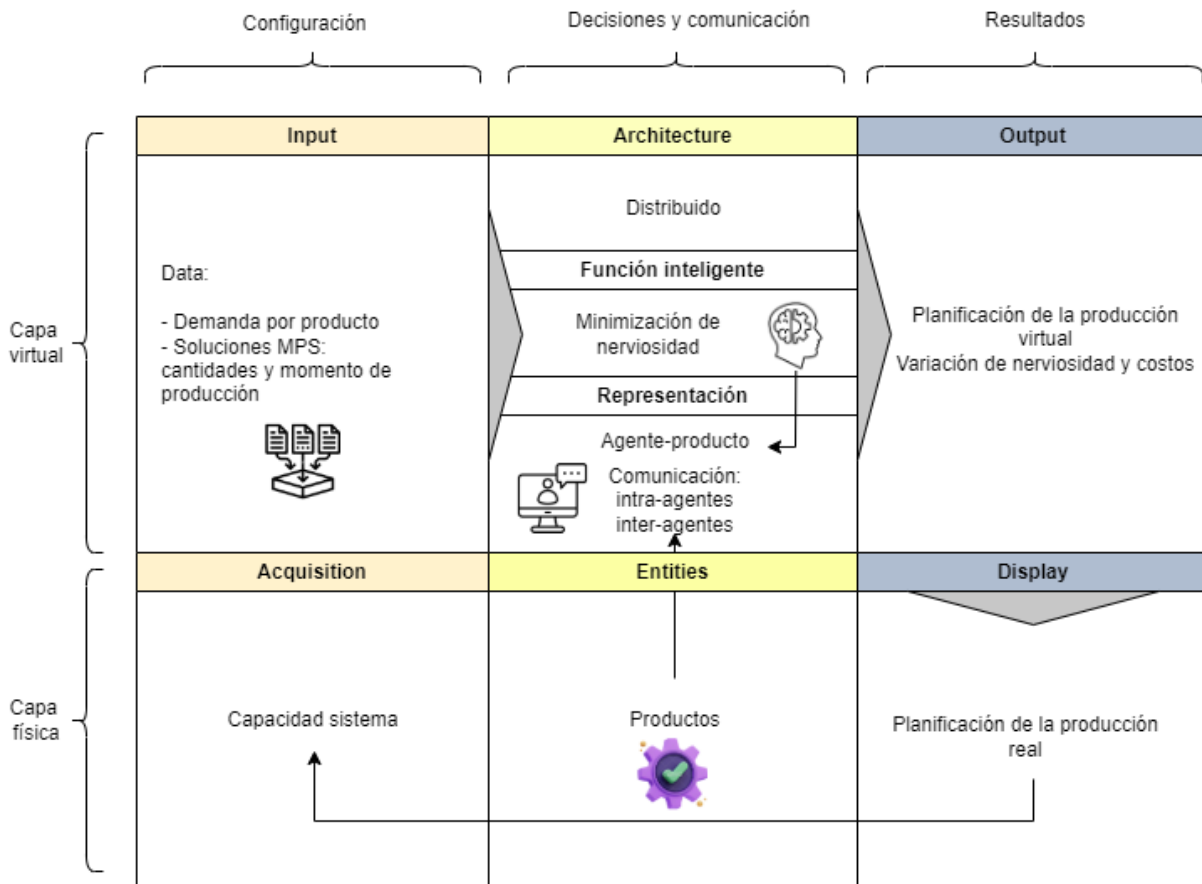
3.5 Desarrollo del sistema basado en agentes

El uso de software y plataformas que permiten contribuir a la disminución del trabajo computacional que genera un modelo matemático, es de gran utilidad para el desarrollo de este tipo de estudios, aportando gran ayuda en la disminución de los tiempos de proceso y mejora de la eficiencia para visualizar resultados.

La herramienta utilizada en este estudio es una tecnología basada en agentes que consiste en un software especializado que provee funciones que permiten instaurar una representación de los productos como entidades inteligentes que tienen capacidades para alcanzar el cumplimiento de

objetivos y garantizar la administración de la información, de tal manera que puedan relacionarse entre sí y con el entorno.

Figura 3.4: Esquema general del modelo



Fuente: Elaboración propia a partir de Sáez, Herrera & Parada (2023)

La figura 3.4, representa una caracterización del modelo evidenciando que se distribuye en un mundo virtual y físico. En la capa virtual se lleva a cabo la función de inteligencia que busca minimizar la nerviosidad en el plan de producción, lo que a su vez conduce a una mayor estabilidad. Además, se integra la comunicación entre los agentes, donde se traspasa información acerca de las variables del modelo.

En cuanto a la programación, se trabaja en un código en la plataforma de simulación NetLogo, que incorpora variables y características a los agentes, los cuales representan a los pedidos o lotes de producto. El código, en términos generales, opera en base a entidades en un ambiente donde se produce constante interacción y comunicación entre los elementos de este mundo, quienes son

definidos como “turtles” y “patches”. Para cada uno de ellos es posible ingresar variables globales con valores únicos.

Se define como datos de entrada al modelo, la demanda total desagregada en cada periodo, la capacidad de producción y la planificación obtenida del MPS con valores de producción, inventario y atrasos, que son utilizados como valores base sobre los cuales implementar el desarrollo del sistema multi agente.

Definir las variables globales que adopta cada agente dentro del proceso y se agrega los tipos de productos o raza de agentes, que se refieren a los cinco productos utilizados en la planificación. A continuación, se formula la configuración inicial del sistema, que se realiza con el proceso “setup”, que crea los agentes en el espacio, conforme a la cantidad de datos de entrada y diseño planeado. Dentro de esta misma etapa, se asignan los valores de demanda para cada periodo y ciclo, además de establecer el valor del costo inicial obtenido de la función objetivo del modelo MPS.

Posteriormente, se almacenan las condiciones iniciales para la producción, inventario y los pedidos pendientes en cada uno de los agentes según corresponda de acuerdo con la raza, periodo y ciclo respectivo. En este punto, cada agente posee información significativa acerca de la planificación, con lo cual puede relacionarse con el entorno permitiendo evaluar los valores de sus propiedades con respecto a los demás.

Al momento de crear los agentes denominados “turtles” dentro del entorno de NetLogo, cada uno de estos se refiere a un tipo de producto en un determinado ciclo y periodo del horizonte de planificación. Por lo tanto, se generan tantas turtles para cada producto según sea la cantidad de productos totales necesarios para completar todo el plan maestro de producción.

Figura 3.5: Patch y raza de agentes

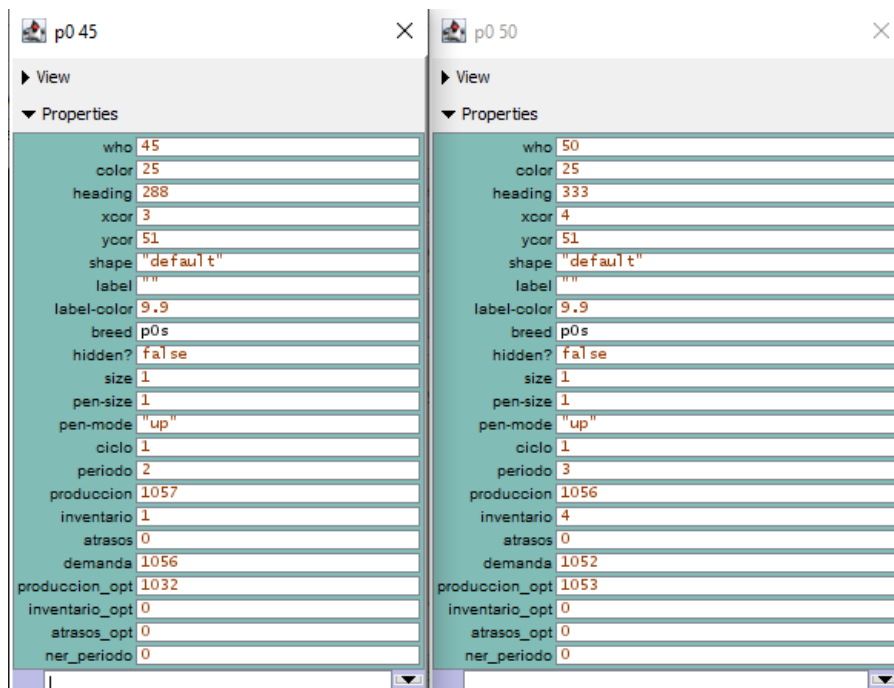


Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.5 se presenta un “patch” del plan, donde existen 5 agentes y cada uno de ellos corresponde a distinta raza o tipo de producto (p0, p1, p2, p3 y p4). De este modo, se planifica para todos los productos en simultáneo, pero cada uno con sus valores correspondientes.

Cada uno de los agentes, cuenta con características de valores únicos, algunos de ellos asignados por los datos de entrada y otros que dan a los agentes atributos de identificación o variables globales usadas en los procesos implementados en el código. En la figura 3.6 se extrae de la plataforma la visualización de dos turtles del mismo producto, pero diferente periodo, con las propiedades que contiene cada uno.

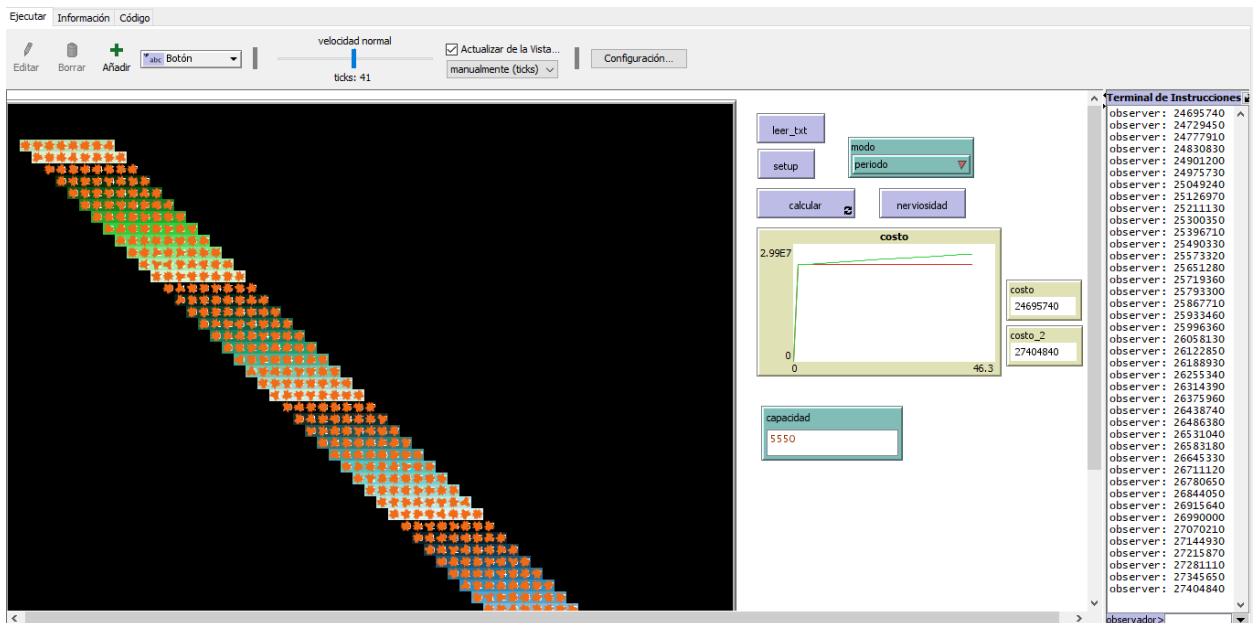
Figura 3.6: Propiedades de agentes



Fuente: Elaboración propia

Para ejecutar el modelo en NetLogo es necesario presionar los botones de “leer_txt”, “setup” y “calcular”, en ese orden respectivamente. En la figura 3.7 se presenta la interfaz final de la plataforma para llevar a cabo el proceso.

Figura 3.7: Interfaz de software NetLogo



Fuente: Elaboración propia

Los botones disponibles en la interfaz ejecutan lo siguiente:

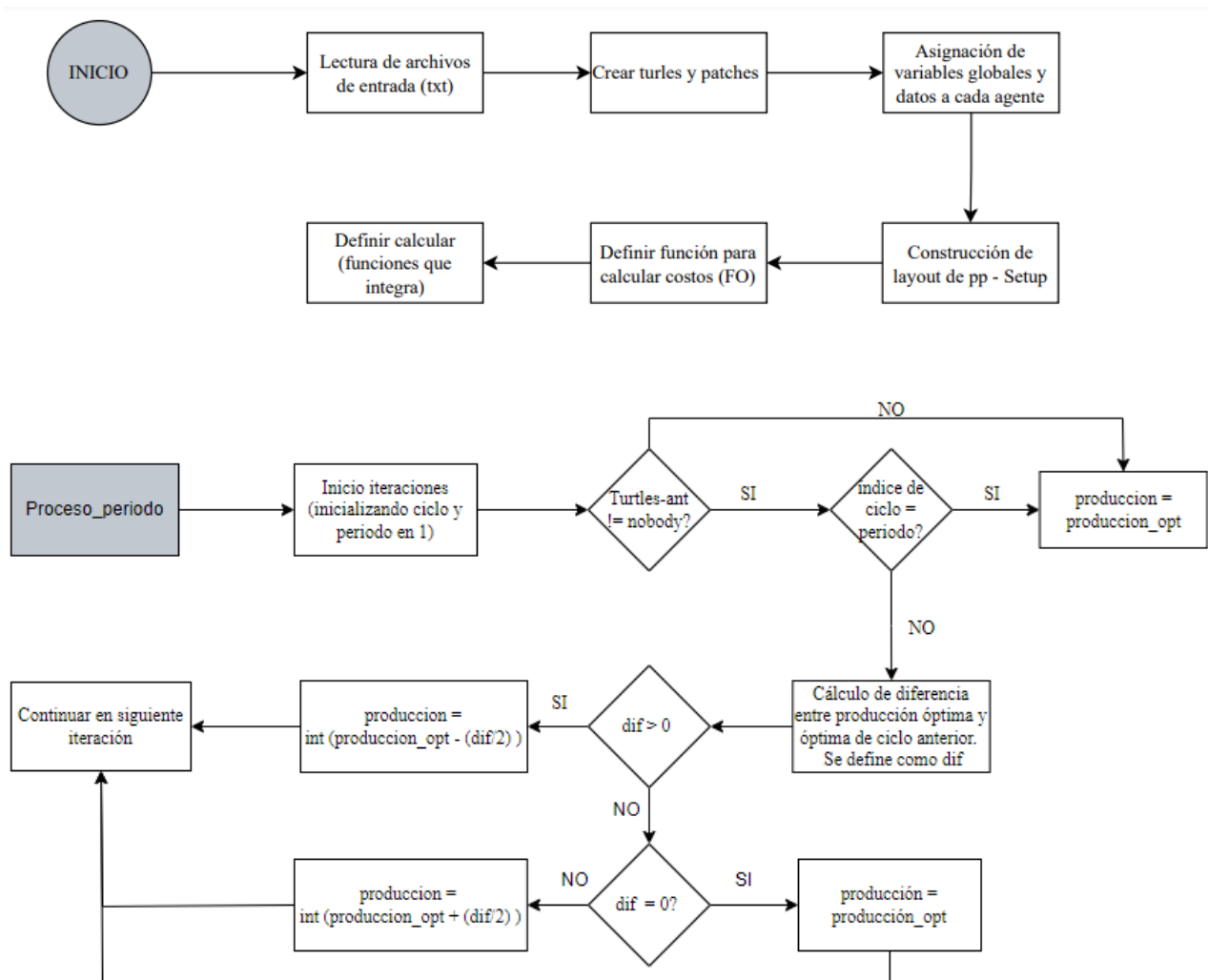
- ✓ Leer_txt: básicamente este botón se encarga de ejecutar las líneas del código que leen los archivos de texto de entrada y almacenarlos en distintas listas para la posterior asignación de los datos.
- ✓ Setup: sitúa a las “turtles” y “patches” en el entorno de la plataforma según el orden del plan con el periodo móvil correspondiente a 8 y 52 ciclos con 59 periodos, asociados a un año de producción. Además, hace la asignación de los datos de entrada a cada agente, preparando el sistema para comenzar con el procedimiento.
- ✓ Calcular: Dentro del botón calcular se realizan los procesos más relevantes del sistema, como lo son: proceso_periodo, actualizar, actualizar2 y validar. Estos procesos involucran las modificaciones y automatización de todas las etapas para disminuir la nerviosidad.

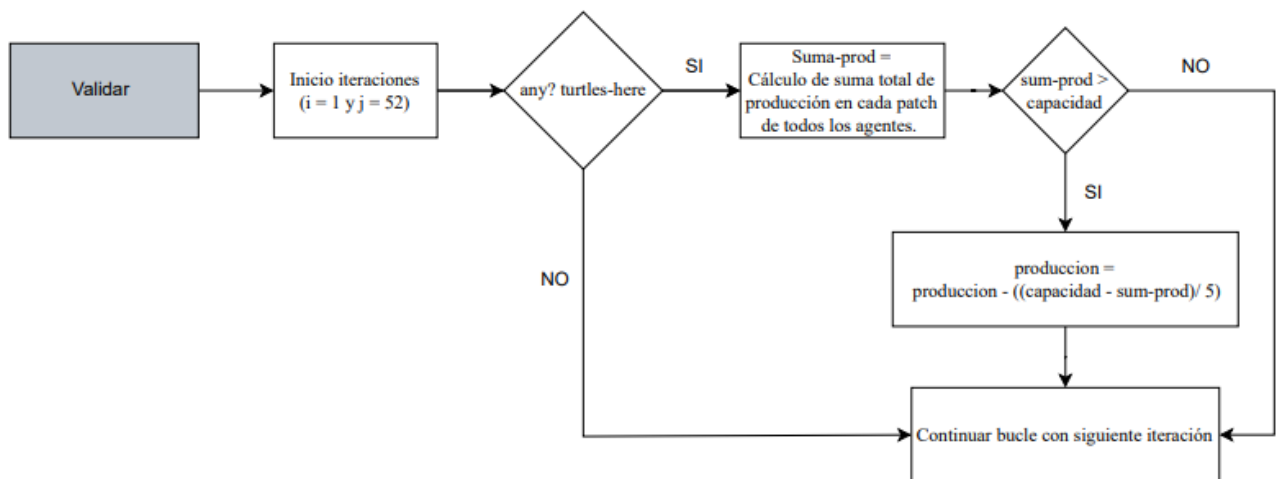
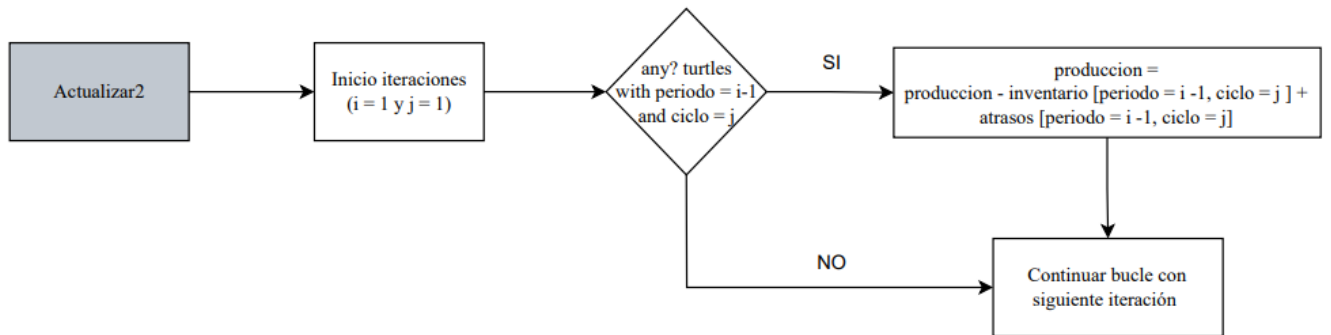
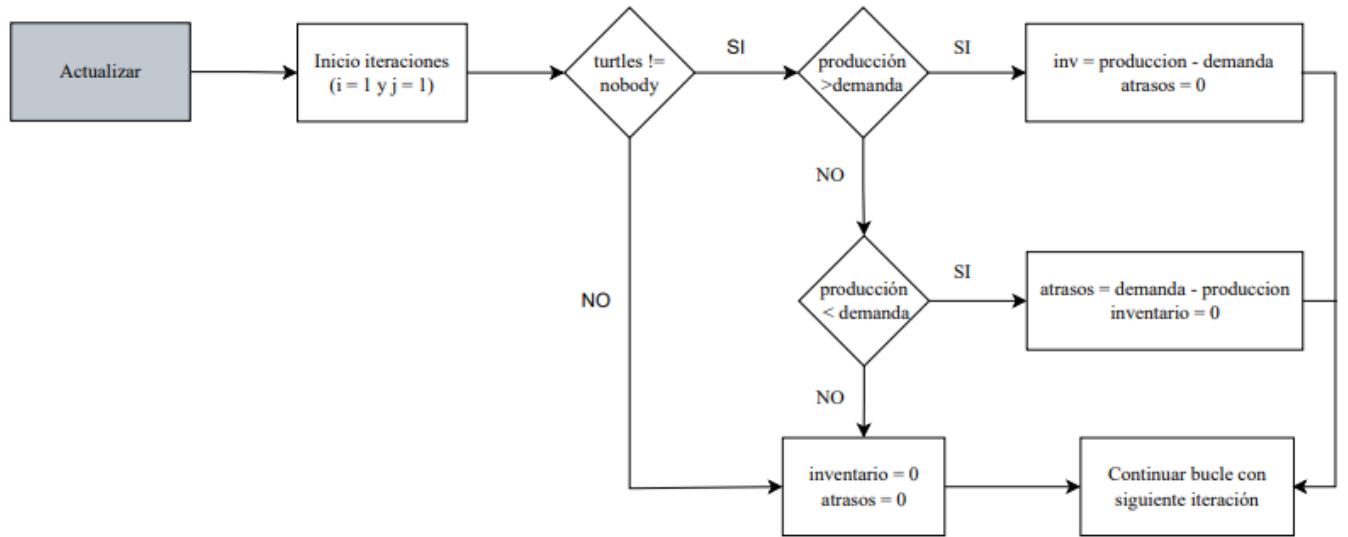
En la figura 3.8 se presenta un diagrama que representa las etapas generales del sistema plasmado en NetLogo, con el propósito de obtener resultados con respecto a los costos y nerviosidad, mediante una regla basada en la información y comunicación entre los agentes, indicando cada uno de los procesos

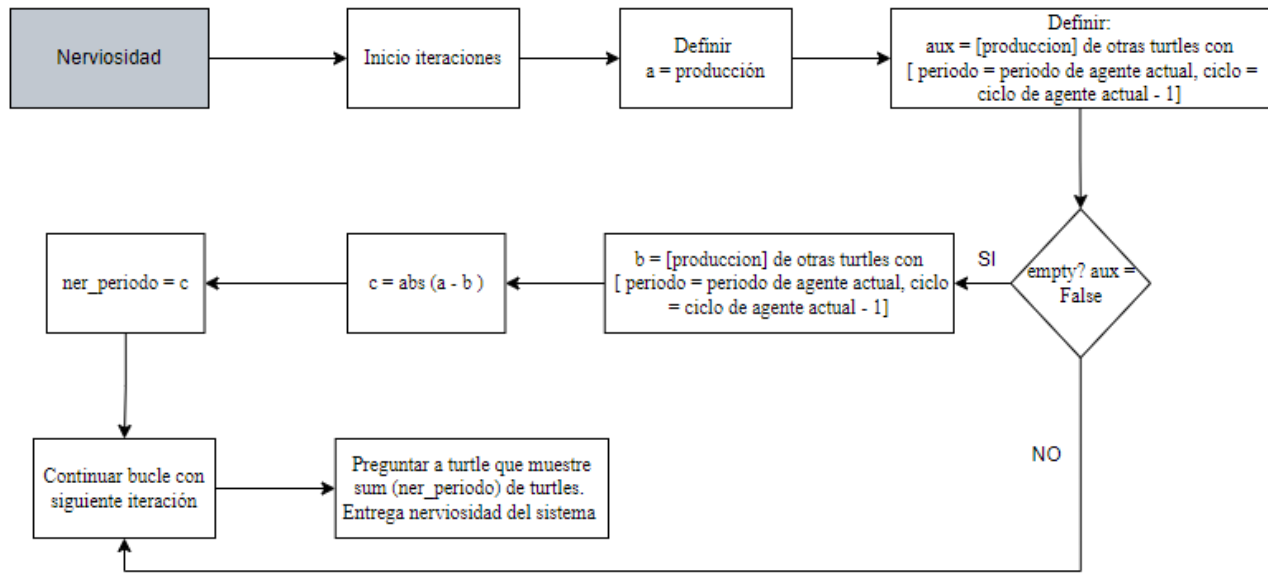
de forma resumida y general. El objetivo principal del modelo se basa en modificar la producción de los agentes considerando valores de otro agente con el mismo periodo y un ciclo anterior en cada iteración. Posteriormente, se asigna nuevamente la cantidad de unidades en inventario y pedidos pendientes, asociando estos valores para la producción del periodo siguiente.

Otro proceso importante dentro del modelo es “validar”, que limita la producción considerando la capacidad finita de producir, tal que no sea superada tras realizar las modificaciones y en caso de ocurrir, ajustar la producción para que se cumpla esta condición.

Figura 3.8: Diagrama de flujo modelo basado en agentes







Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Diseño de código en NetLogo

Las instrucciones dirigidas a los agentes permiten realizar un conjunto de acciones para la simulación. En la secuencia del modelo en NetLogo se destacan instrucciones que inciden en la función de inteligencia aplicada al sistema. En botón “calcular” se ejecutan varias acciones, las cuales son descritas a continuación:

- I. **Proceso_periodo:** Permite inicializar el análisis por periodo. En esta instrucción, se solicita a aquellos agentes donde exista otro agente en el mismo periodo, pero con ciclo anterior, que verifiquen si el ciclo es igual a periodo. De ser cierta esta condición, se asigna la producción como la producción óptima proveniente del MPS, en caso contrario, se calcula la diferencia entre la variable global de producción del agente actual y la del anterior ciclo e igual periodo, almacenando este valor en una variable local llamada “dif”.

Si el valor obtenido en dif es positivo, el valor de producción se define como el valor entero resultante de la diferencia entre la producción inicial de los agentes y un valor específico de unidades, que es dependiente de la regla definida en cada simulación generada. Con esto, se disminuye la producción del agente actual respecto al ciclo anterior, acortando la brecha existente entre ellos. De forma similar, ocurre cuando el valor de “dif” es negativo, pero en este caso, la producción es definida como la suma entre los dos valores mencionados. Un caso

excepcional que se puede presentar es cuando “dif” resulta igual a cero, para esta situación la producción se asigna simplemente como la producción inicial del agente sobre el cual está la iteración.

Este proceso se repite para cada agente dentro del sistema e instaura la regla principal definida para disminuir la nerviosidad en la planificación de la producción.

- II. Actualizar: Considerando las variaciones con respecto a los valores iniciales, debido al proceso anterior, es necesario recalcular los valores de inventario y pedidos pendientes, que preliminarmente corresponden a los datos importados como entrada, correspondientes a las soluciones óptimas del MPS. Para ello, en cada agente donde se cumpla que en el periodo siguiente existan agentes, se definen las siguientes condiciones:
 - Si la producción es mayor que la demanda, se asigna como inventario el valor obtenido mediante la resta entre producción y demanda. Los pedidos pendientes en este caso son igual a cero.
 - Por otra parte, cuando la producción es menor que la demanda, ocurre lo contrario, el inventario es igual a cero y los pedidos pendientes son igual al valor resultante de la resta entre demanda y producción.
 - Cuando el valor de la producción es igual a la demanda, se asigna al inventario y pedidos pendientes valor cero.

- III. Actualizar 2: Según la arquitectura propuesta en el modelo y considerando las instrucciones previas, se ajustan los valores de la producción con respecto al periodo anterior, permitiendo introducir al proceso una nueva variación de la producción, definida como el valor de producción del agente actual restando las unidades en inventario y sumando las de pedidos pendientes existentes en el agente con el mismo ciclo, pero periodo anterior para ambas variables (inventario y pedidos pendientes).

- IV. Validar: Tras realizar todas las modificaciones en la producción, inventario y pedidos pendientes, se valida que las variaciones en la producción no generen que se supere la capacidad de producción. Por lo tanto, se define la suma-prod como la suma de la producción de todos los agentes presentes en un mismo ciclo y periodo. Si la suma-prod supera la capacidad, se propone que la producción de aquellos agentes disminuya proporcionalmente en

cada uno de los productos en las unidades definidas como el excedente, el cual es obtenido como la capacidad menos el valor de suma-prod dividido en la cantidad de productos. Cuando la capacidad no es superada, se mantienen los valores sin modificaciones.

- V. Nerviosidad: Esta instrucción es ejecutada al final de la simulación para obtener el valor de la medida de nerviosidad del sistema, donde se definen variables locales dentro del código para reconocer a los agentes. Una vez identificados el agente actual y el de ciclo anterior con mismo periodo, se calcula la diferencia en valor absoluto que es almacenada como una variable dentro de cada agente y para obtener la nerviosidad total del sistema se hace una suma de todos los valores.

3.6 Diseño de experimentos

Dentro del entorno de ejecución de las simulaciones en NetLogo, se ejecutan cuatro funciones principales vinculadas a variaciones en la producción, inventario y pedidos pendientes en la planificación, siendo leídas y ejecutas en el siguiente orden:

1. **Proceso_periodo**
2. Actualizar
3. **Actualizar_2**
4. Validar

Esto genera que la producción de cada agente se modifique inicialmente en el primer proceso y en “actualizar_2” se efectúe un segundo ajuste en la producción. Esto considerando que la función “actualizar” solo altera el inventario y pedidos pendientes, mientras que “validar” puede hacer variaciones en la producción solo en casos excepcionales.

Al finalizar la ejecución de cada simulación, se procede a calcular la nerviosidad total del sistema, sin embargo, los valores que son tomados para realizar la diferencia de producción entre la de un agente y otro de ciclo anterior, toman en cuenta las cantidades de producción que han experimentado más de una modificación por sobre la regla principal definida para disminuir la nerviosidad que se encuentra en la función “proceso_periodo”.

Considerando estos antecedentes, se propone un segundo caso, donde se ejecute el mismo modelo con funciones idénticas, pero en un orden alternativo que permita que la nerviosidad al final de cada

simulación sea calculada con los valores de producción recientes tras aplicar la lógica plasmada en “proceso_periodo”. Así, la heurística basada en variar las cantidades a producir en cada agente está presente de manera más reciente a la hora de medir la nerviosidad.

Por lo tanto, se plantea el caso 2 con el orden definido como sigue:

1. **Actualizar_2**
2. **Proceso_periodo**
3. Actualizar
4. Validar

La única diferencia con respecto al caso anterior es que la función “actualizar_2” pasa de ser ejecutada en la tercera posición a ser la inicial.

4. Resultados y análisis

4.1 Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos para analizar el comportamiento de la nerviosidad en un plan maestro de producción. El experimento computacional es aplicado para un MPS, donde las soluciones son implementadas en un sistema MAS. Los resultados presentados reflejan las simulaciones realizadas en la plataforma NetLogo para los dos casos propuestos, donde en cada uno de ellos se evalúan 7 escenarios distintos con respecto al incremento o disminución de la producción de cada agente.

El propósito de estas instancias es investigar el comportamiento existente entre los costos y la nerviosidad del sistema, ya que la variación en las cantidades tiene repercusión en ambos valores, considerando que lo establecido en cada simulación es la lógica que permite acotar la brecha entre la producción de un agente con el del ciclo estrictamente anterior y en el mismo periodo, evaluando el impacto en la medida de nerviosidad y en la función de costo.

4.1.1 Resultados caso 1

En la tabla 4.1, se presentan los resultados para el costo final y la nerviosidad de cada una de las simulaciones ejecutadas, junto a la regla que diferencia cada una de las instancias.

Tabla 4.1: Resultados instancias caso 1

| Simulación | Regla definida | Costo final | Nerviosidad |
|------------|---|-------------|-------------|
| Base | - | 24.695.740 | 115.815 |
| S1 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/2)$ | 28.077.310 | 112.536 |
| S2 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/3)$ | 28.154.200 | 127.019 |
| S3 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/4)$ | 28.220.370 | 140.080 |
| S4 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif * 0.75)$ | 28.092.430 | 127.375 |
| S5 | $prod. \acute{o}pt \pm 10$ | 28.347.870 | 167.343 |
| S6 | $prod. \acute{o}pt \pm 50$ | 28.108.270 | 142.601 |
| S7 | $prod. \acute{o}pt \pm 1$ | 28.473.990 | 187.674 |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de cada simulación junto con un indicador definido como la relación entre los costos y nerviosidad de cada sistema y los valores base de estas variables, con el propósito de generar comparaciones entre las instancias ejecutadas.

Tabla 4.2: Relación valores base y sistemas caso 1

| Simulación | Costo base (1) | Nerviosidad base (2) | Costo sistema (3) | Nerviosidad sistema (4) | Ratio de costos [(3) / (1)] | Ratio de nerviosidad [(4) / (2)] |
|------------|-------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| S1 | 24.695.740 | 115.815 | 28.077.310 | 112.536 | 1,1369 | 0,9716 |
| S2 | 24.695.740 | 115.815 | 28.154.200 | 127.019 | 1,1400 | 1,0967 |
| S3 | 24.695.740 | 115.815 | 28.220.370 | 140.080 | 1,1427 | 1,2095 |
| S4 | 24.695.740 | 115.815 | 28.092.430 | 127.375 | 1,1375 | 1,0998 |
| S5 | 24.695.740 | 115.815 | 28.347.870 | 167.343 | 1,1478 | 1,4449 |
| S6 | 24.695.740 | 115.815 | 28.108.270 | 142.601 | 1,1381 | 1,2312 |
| S7 | 24.695.740 | 115.815 | 28.473.990 | 187.674 | 1,1529 | 1,6204 |

Fuente: Elaboración propia

El incremento o disminución porcentual relacionados a cada simulación con respecto a los valores base de nerviosidad y costo se encuentra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Indicadores porcentuales caso 1

| Simulación | Variación en costos | Variación en nerviosidad |
|------------|---------------------|--------------------------|
| S1 | 13,69 % | -2,831 % |
| S2 | 14,004 % | 9,674 % |
| S3 | 14,272 % | 20,952 % |
| S4 | 13,754 % | 9,981 % |
| S5 | 14,789 % | 44,492 % |
| S6 | 13,818 % | 23,128 % |
| S7 | 15,299 % | 62,046 % |

En las siguientes figuras se expone el comportamiento de la función de costos para cada simulación por cada ciclo de ejecución del modelo.

Figura 4.1: Costo base vs costo sistema S1 caso 1

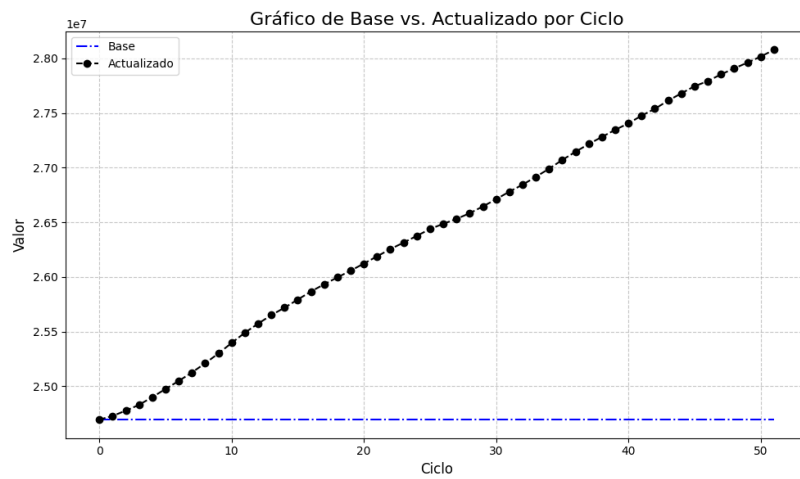


Figura 4.2:Costo base vs costo sistema S2 caso 1

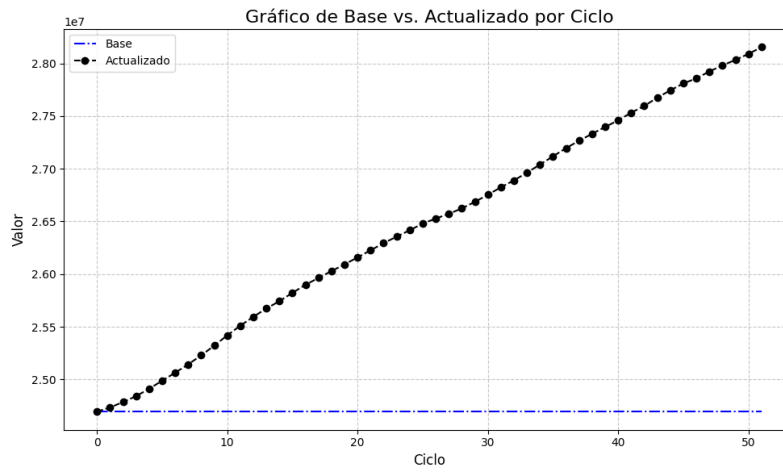


Figura 4.3: Costo base vs costo sistema S3 caso 1

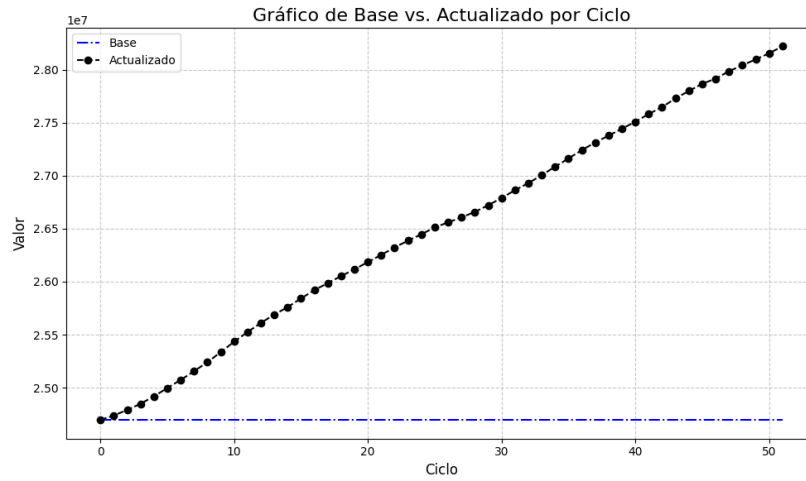


Figura 4.4: Costo base vs costo sistema S4 caso 1

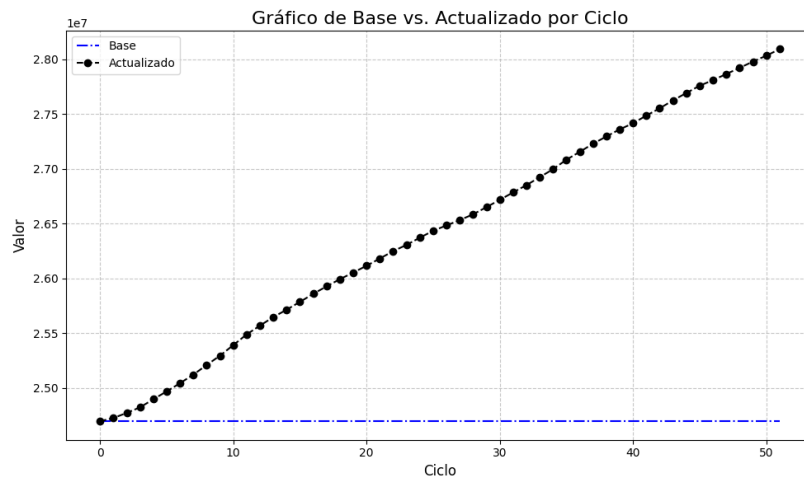


Figura 4.5: Costo base vs costo sistema S5 caso 1

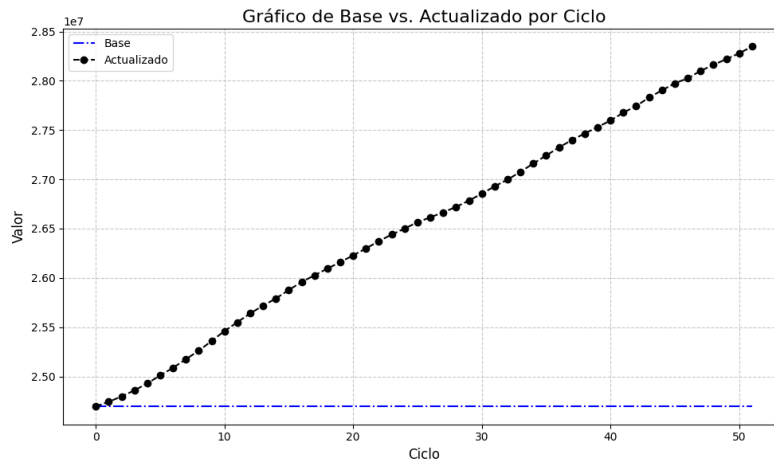


Figura 4.6: Costo base vs costo sistema S6 caso 1

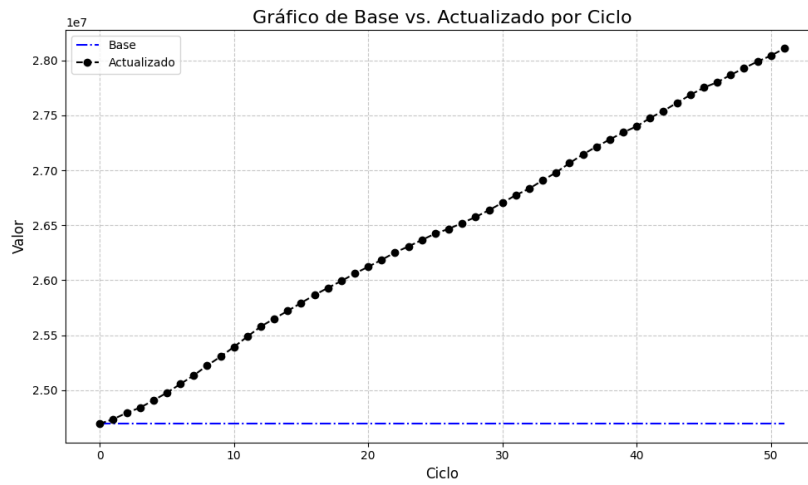
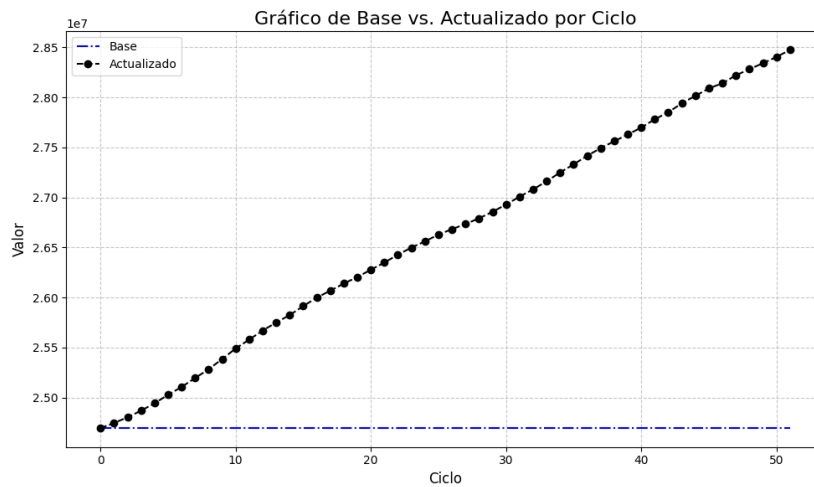


Figura 4.7: Costo base vs costo sistema S7 caso 1



A continuación, se presenta en las figuras 4.8 y 4.9, una comparación de los costos y la nerviosidad de cada simulación con respecto a los valores base por cada una de las instancias generadas. Los valores base definidos son los iniciales del modelo sin alterar las variables de producción, inventario y atrasos, teniendo en cuenta que el costo base es igual al costo óptimo obtenido del MPS.

Figura 4.8: Comparación costo base y costo sistema por instancia caso 1

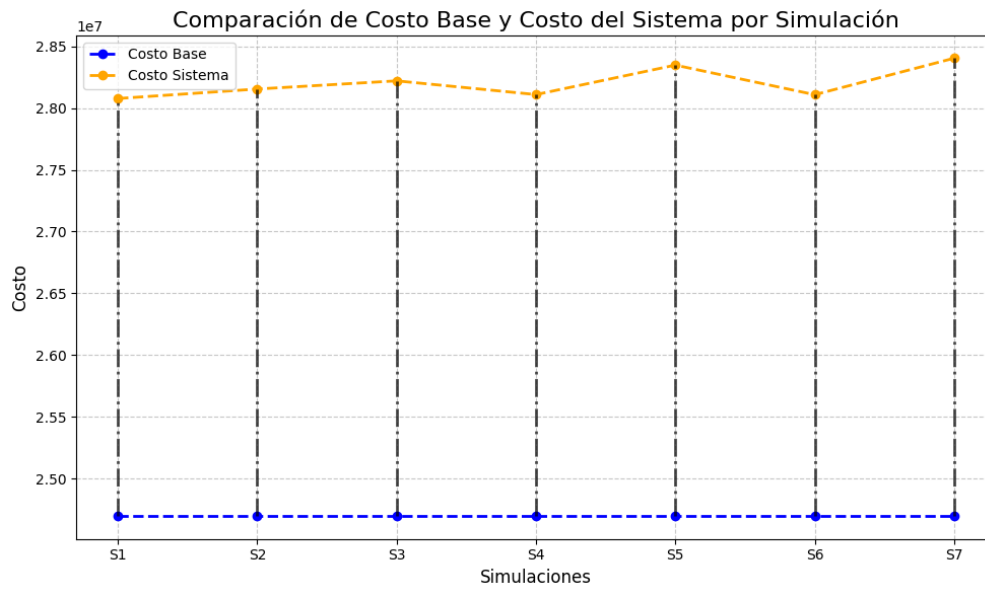
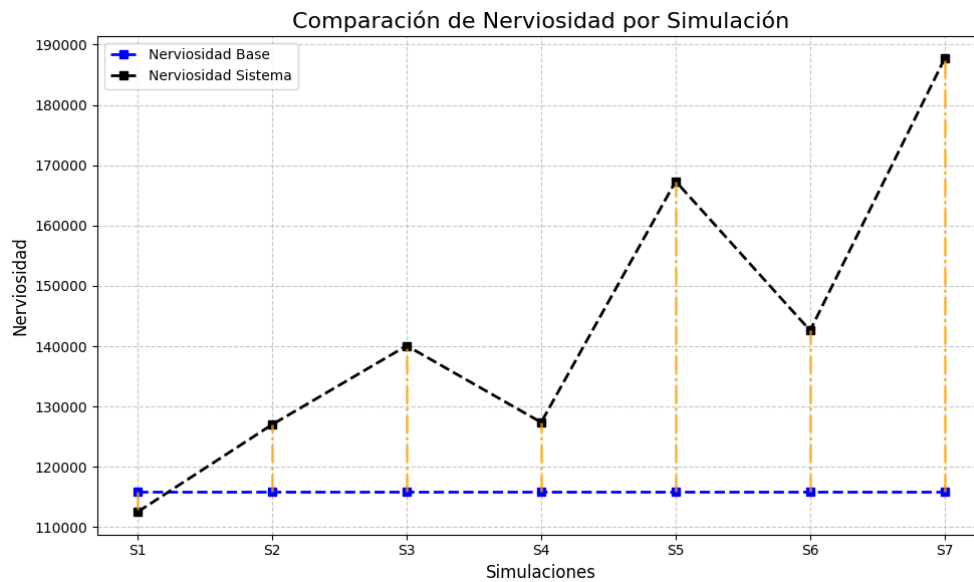


Figura 4.9: Comparación nerviosidad base y nerviosidad sistema por instancia caso 1



4.1.2 Resultados caso 2

Los resultados obtenidos tras realizar las modificaciones en este caso presentan cambios significativos para cada sistema, los cuales son presentados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Resultados instancias caso 2

| Simulación | Regla definida | Costo final | Nerviosidad |
|------------|---|-------------|-------------|
| Base | - | 24.695.740 | 115.815 |
| S1 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/2)$ | 27.674.590 | 69.290 |
| S2 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/3)$ | 27.730.850 | 77.842 |
| S3 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif/4)$ | 27.787.180 | 85.660 |
| S4 | $prod. \acute{o}pt \pm abs(dif * 0.75)$ | 27.716.420 | 74.835 |
| S5 | $prod. \acute{o}pt \pm 10$ | 27.914.380 | 99.899 |
| S6 | $prod. \acute{o}pt \pm 50$ | 27.765.180 | 91.871 |
| S7 | $prod. \acute{o}pt \pm 1$ | 28.020.160 | 113.927 |

De igual manera que en el caso anterior, se presenta en la tabla 4.5 una relación entre los costos de cada sistema y la medida de nerviosidad, lo que refleja la variación con respecto a los valores base y además permite ver el comportamiento de los resultados obtenidos con este nuevo orden.

Tabla 4.5: Relación valores base y sistemas caso 2

| Simulación | Costo base (1) | Nerviosidad base (2) | Costo sistema (3) | Nerviosidad sistema (4) | Ratio de costos [(3) / (1)] | Ratio de nerviosidad [(4) / (2)] |
|------------|-------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| S1 | 24.695.740 | 115.815 | 27.674.590 | 69.290 | 1,1206 | 0,5982 |
| S2 | 24.695.740 | 115.815 | 27.730.850 | 77.842 | 1,1229 | 0,6721 |
| S3 | 24.695.740 | 115.815 | 27.787.180 | 85.660 | 1,1251 | 0,7396 |
| S4 | 24.695.740 | 115.815 | 27.716.420 | 74.835 | 1,1223 | 0,6461 |
| S5 | 24.695.740 | 115.815 | 27.914.380 | 99.899 | 1,1303 | 0,8625 |
| S6 | 24.695.740 | 115.815 | 27.765.180 | 91.871 | 1,1242 | 0,7932 |
| S7 | 24.695.740 | 115.815 | 28.020.160 | 113.927 | 1,1346 | 0,9836 |

La variación porcentual de los costos y la nerviosidad relacionada a cada simulación con respecto a los valores base se presenta en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Indicadores porcentuales caso 2

| Instancia | Variación en costos | Variación en nerviosidad |
|-----------|---------------------|--------------------------|
| S1 | 12,062 % | -40,172 % |
| S2 | 12,290 % | -32,788 % |
| S3 | 12,518 % | -26,037 % |
| S4 | 12,231 % | -35,384 % |
| S5 | 13,03 % | -13,743 % |
| S6 | 12,429 % | -20,674 % |
| S7 | 13,46 % | -1,630 % |

En las siguientes figuras se presenta el comportamiento de los costos de cada simulación por cada ciclo, comparando los valores con respecto al costo base.

Figura 4.10: Costo base vs costo sistema S1 caso 2

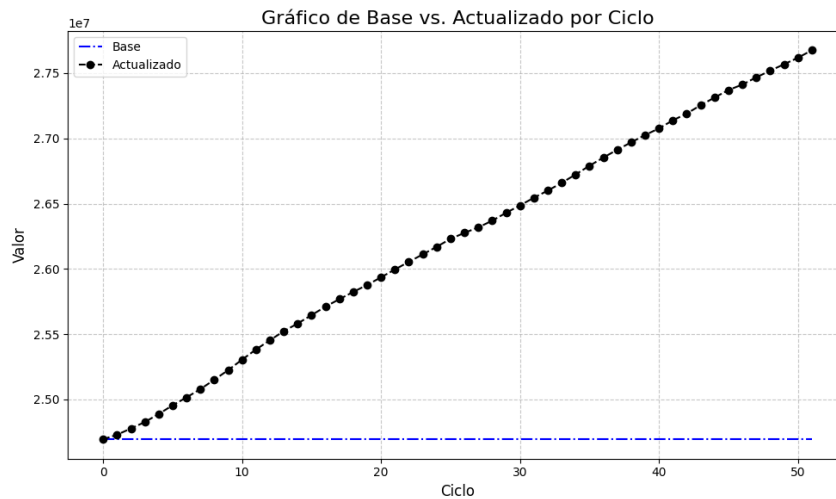


Figura 4.11: Costo base vs costo sistema S2 caso 2

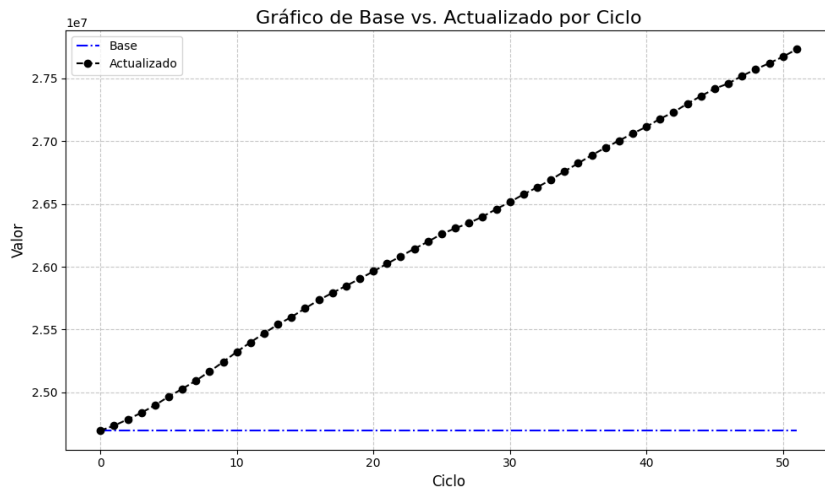


Figura 4.12: Costo base vs costo sistema S3 caso 2

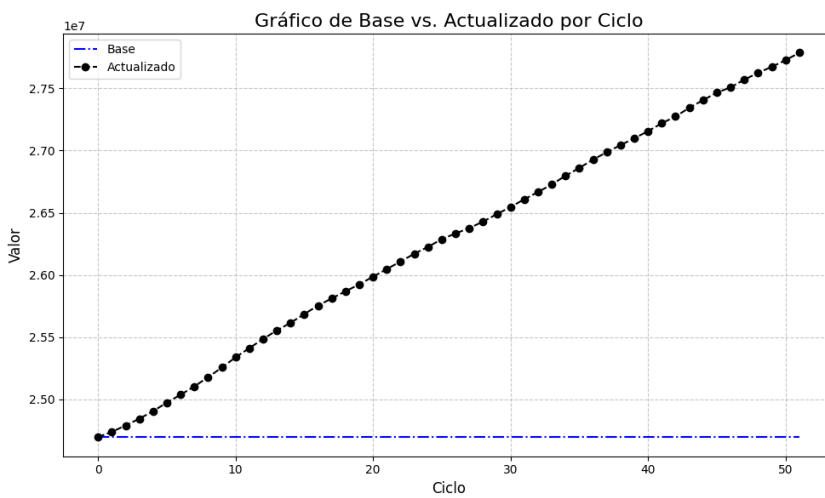


Figura 4.13: Costo base vs costo sistema S4 caso 2

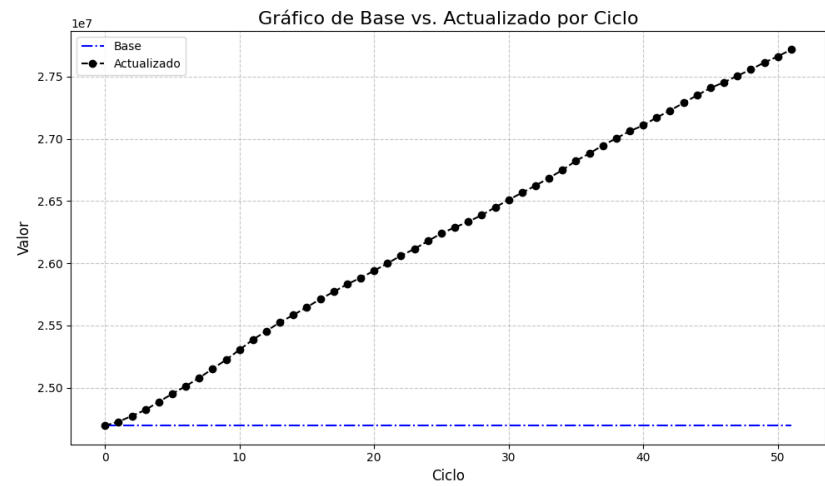


Figura 4.14: Costo base vs costo sistema S5 caso 2

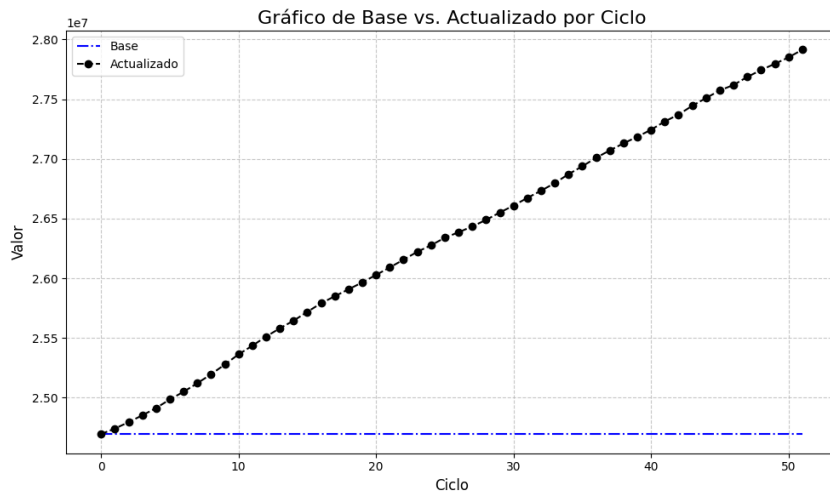


Figura 4.15: Costo base vs costo sistema S6 caso 2

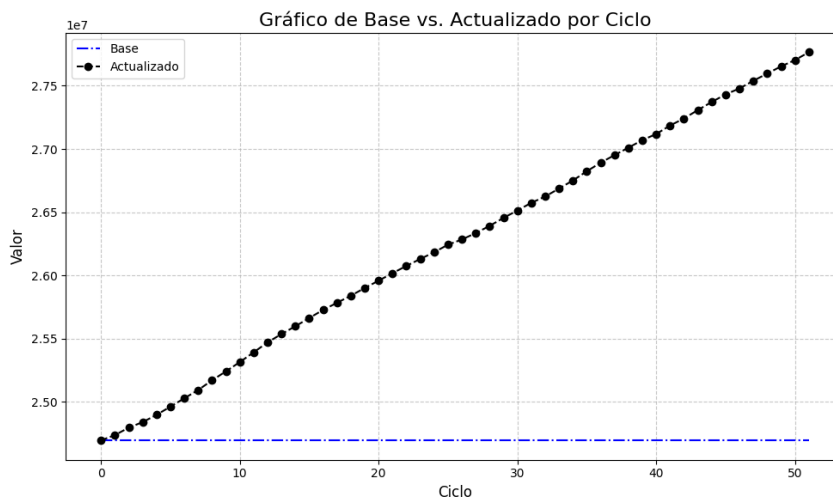
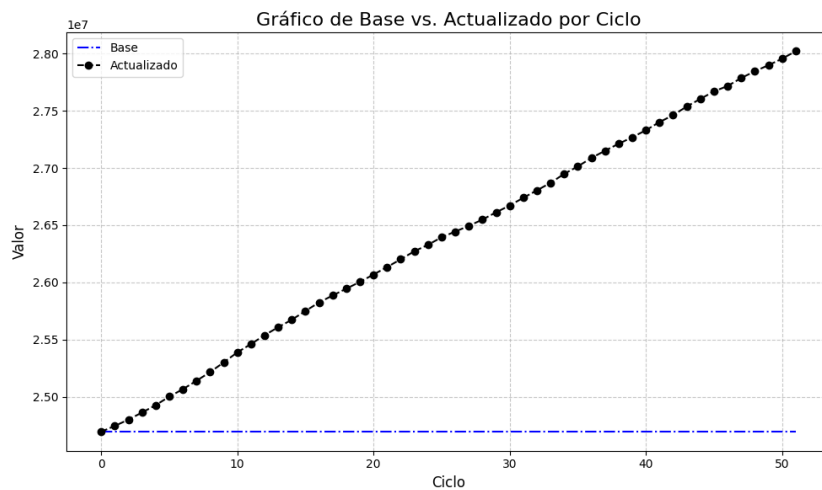


Figura 4.16: Costo base vs costo sistema S7 caso 2



Las figuras 4.17 y 4.18 entregan gráficas que reflejan la comparación de los costos y la nerviosidad de cada simulación versus los valores base.

Figura 4.17: Comparación costo base y costo sistema caso 2

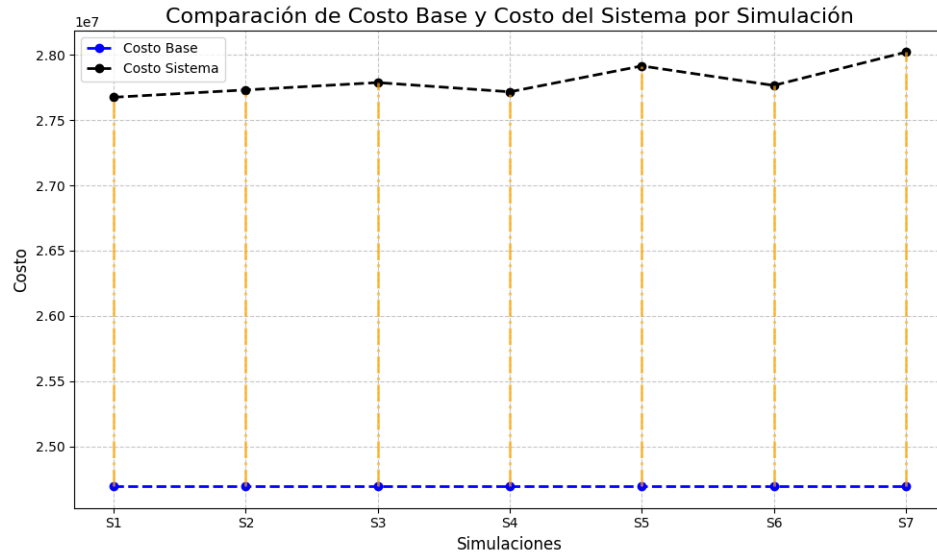
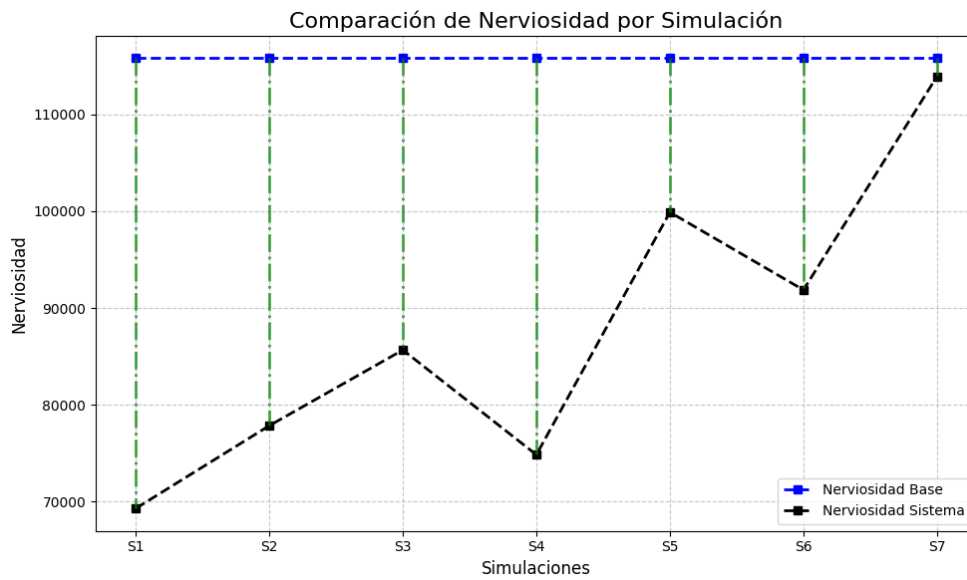


Figura 4.18: Comparación nerviosidad base y nerviosidad sistema caso 2



4.2 Análisis de resultados

Como se observa en la tabla 4.3, donde se calcula una relación que indica la variación de los costos y la nerviosidad del sistema respecto a los valores del caso base, es posible destacar que la simulación S1 en el caso de estudio 1, es la que entrega mejores resultados, considerando como primer criterio que es la única instancia que permite una disminución de la nerviosidad del sistema, reduciendo la nerviosidad en 2,831% respecto al valor base, por lo tanto, la planificación de la producción entregada por esta simulación genera mayor estabilidad en el plan. Por otra parte, el aumento de los costos asociados a las modificaciones en esta planificación alcanza un 13,69%, siendo el menor incremento entre los demás indicadores del caso 1.

Con respecto a las demás simulaciones, se evidencia que tanto S2 como S4 generan valores de nerviosidad medianamente cercanos al valor base, con una variación de 9,674% y 9,981% respectivamente, por lo que después de la primera instancia, son las simulaciones con resultados con mayor expectativa con relación a la nerviosidad.

En cuanto a los demás escenarios propuestos, se evidencia que las reglas definidas para disminuir la nerviosidad en estos sistemas no entregan resultados favorables, ya que, si bien la variación en los costos se encuentra dentro de los valores medios entregados por todas las pruebas, la nerviosidad alcanza valores significativamente lejanos del valor base, siendo este un indicador negativo para evaluar las simulaciones.

Al implementar, el nuevo orden en la ejecución de los procesos en la simulación generando el caso de estudio 2, se observan mejoras significativas en los resultados obtenidos. La nerviosidad de las 7 instancias desarrolladas toma valores por debajo de la nerviosidad base, donde al igual que en el caso 1, la simulación con mejores resultados es S1, reduciendo la nerviosidad del sistema en 40,172% asociado a un aumento en los costos de la planificación de 12,062%, siendo la menor variación resultante. Las simulaciones S2, S3 y S4 también disminuyen la nerviosidad del sistema en cantidades significativas con aumento en la función de costos similares a S1.

Los porcentajes de mejora son evidentes en el caso 2 con respecto al caso 1, donde los valores de costo varían en un pequeño margen entre cada caso, sin embargo, los cambios en la nerviosidad de cada sistema son relevantes para el propósito de la investigación. En las figuras 4.19 y 4.20 se visualiza

la comparación de ambas métricas en cada caso y la similitud que adoptan con los valores base, evidenciando las mejoras entregadas por el caso 2.

Figura 4.19: Comparación de costos entre casos y base

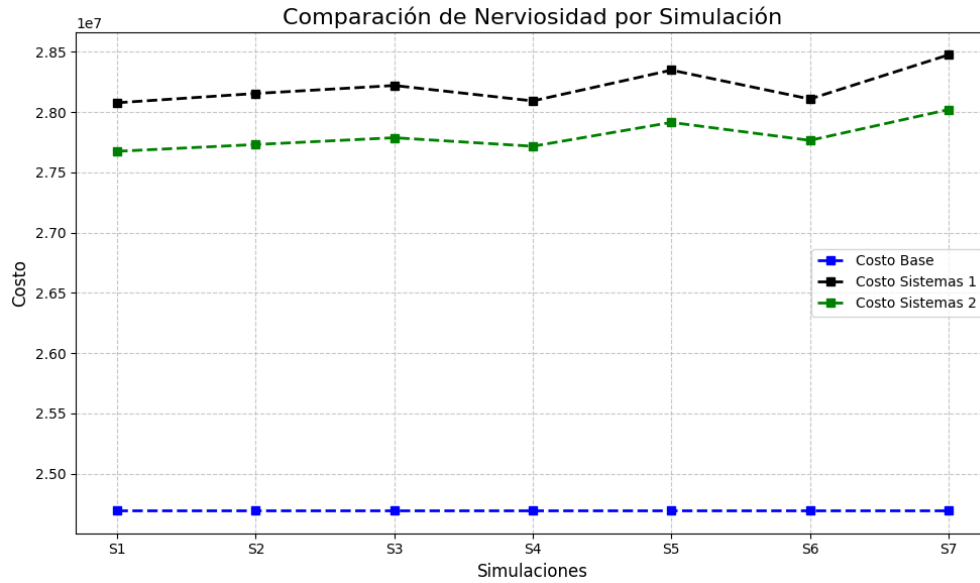
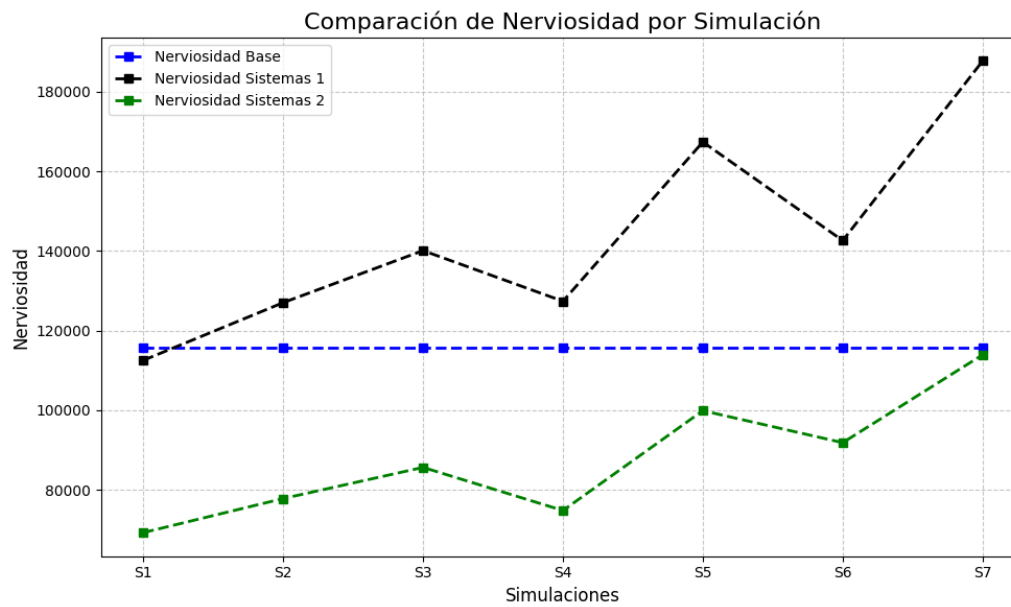


Figura 4.20: Comparación de nerviosidad entre casos y base



5. Conclusiones

En esta memoria de título, se desarrolla un sistema impulsado por el producto (PDS) implementado en un sistema multi agente para obtener la nerviosidad en un plan maestro de producción, para analizar y minimizar esta métrica y aumentar la estabilidad de la planificación. El desarrollo de este problema se concentra en la definición de la forma en la cual medir la nerviosidad implementando la comunicación entre agentes que facilitan los sistemas MAS, para lo cual se propone una regla que evalúa las diferencias de producción entre un ciclo y el ciclo anterior, para cada periodo y producto en proceso.

Se genera una planificación de la producción con inteligencia artificial basada en agentes que permite trabajar en un entorno dinámico y con toma de decisiones descentralizadas, añadiendo autonomía en comparación a una planificación convencional. Este enfoque permite entregar mejoras significativas en la disminución de la nerviosidad. Para el desarrollo de este sistema fue necesario investigar acerca de sistemas de producción, PDS y sistemas basados en agentes.

El proceso de experimentación realiza un análisis de 2 experimentos con 7 simulaciones en cada uno de ellos, con el propósito de comparar el comportamiento de la nerviosidad y la función de costos en cada caso, considerando la diferencia plasmada en la regla de variación de la producción en cada simulación.

Para desarrollar los experimentos se utilizó la plataforma de simulación NetLogo, que permite modelar un sistema basado en agentes en un mundo virtual que es el adecuado para este tipo de estudios, donde los agentes tienen características propias con valores únicos y pueden relacionarse entre sí y con el entorno.

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo propuesto tiene un correcto desempeño para el caso 2, con relación a la disminución de la nerviosidad de cada sistema, sin embargo, para el experimento 1, solo hay una instancia que entrega resultados favorables, lo que permite destacar que el orden de ejecución de los procesos propuesto en el segundo caso resuelve con mejor rendimiento los escenarios.

La instancia que entrega mejores resultados es S1 en ambos casos, pero tiene mayor consistencia en el experimento 2, donde la nerviosidad del plan disminuye en 40,172% lo que implica a un aumento en los costos de planificación de un 12,062%.

Esto concluye que la hipótesis de investigación se aprueba con respecto a la disminución de la nerviosidad, sin embargo, el incremento en los costos resulta significativo y es asociado a la variación de las variables de producción, inventario y pedidos pendientes con respecto a los valores base.

Se sugiere en futuras investigaciones buscar un modelo que permita una relación beneficiosa entre la reducción de la nerviosidad y la variabilidad de los costos asociado a las modificaciones realizadas en la planificación, donde los algoritmos de optimización multi objetivo es una herramienta interesante de implementar, considerando que al aplicar este tipo de modelos se encuentra un conjunto de soluciones con tal de presentar las mejores alternativas disponibles, que para este estudio estarían relacionadas a la reducción de la nerviosidad y el comportamiento de los costos totales.

Referencias

- Chapman, S. N. (2006). *Planificación y control de la producción*. Pearson education.
- Herrera, C., Belmokhtar-Berraf, S., Thomas, A., & Parada, V. (2016). A reactive decision-making approach to reduce instability in a master production schedule. *International Journal of Production Research*, 54(8), 2394-2404.
- Sáez Bustos, P., & Herrera López, C. (2021). Implementation of a Holonic Product-Based Platform for Increased Flexibility in Production Planning. In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA LATIN AMERICA 2021* (pp. 180-194). Springer International Publishing.
- Sáez, P., Herrera, C., & Pezoa, J. E. (2022). A product-driven system approach to generate fast solutions to the job shop scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1930-1937.
- Sáez, P.; Herrera, C.; Parada, V. Reducing Nervousness in Master Production Planning: A Systematic Approach Incorporating Product-Driven Strategies. *Algorithms* 2023, 16, 386. <https://doi.org/10.3390/a16080386>
- Terrazas Pastor, R. (2011). Planificación y programación de operaciones. *Revista Perspectivas*, (28), 7-32.
- Salazar, E (2021). Planificación y control de la producción.
- Blackburn, J. D., Kropp, D. H., & Millen, R. A. (1986). *A comparison of strategies to dampen nervousness in MRP systems*. *Management science*, 32(4), 413-429.
- Sridharan, S. V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. (1988). Measuring master production schedule stability under rolling planning horizons. *Decision Sciences*, 19(1), 147-166.
- J.-H. Lee & C.-O. Kim (2008) Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper, *International Journal of Production Research*, 46:1, 233-265, DOI: 10.1080/00207540701441921
- Meyer, G. G., Främling, K., & Holmström, J. (2009). Intelligent products: A survey. *Computers in industry*, 60(3), 137-148.

McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J. L., Wong, C., & Ashton, K. (2003). Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 365-376.

McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A. C., & Harrison, M. (2013). Product intelligence in industrial control: Theory and practice. *Annual Reviews in Control*, 37(1), 69-88.

Montecinos Matamala, I. M. (2016). *Sistema holónico de manufactura para la gestión de sistemas de cola en ambientes productivos*.

Campbell, G. M. (1992). Master production scheduling under rolling planning horizons with fixed order intervals. *Decision Sciences*, 23(2), 312-331.

Schuster, E. W., Unahabhokha, C., & Allen, S. J. (2002). *Master production schedule stability under conditions of finite capacity. Master Production Schedule Stability under Conditions of Finite Capacity*, 1-25.

Jorge E. Hernández, Josefa Mula & Francisco J. Ferriols (2008) *A reference model for conceptual modelling of production planning processes*, *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 19:8, 725-734, DOI: 10.1080/09537280802476128

Wong, C. Y., McFarlane, D., Zaharudin, A. A., & Agarwal, V. (2002, October). The intelligent product driven supply chain. In *IEEE international conference on systems, man and cybernetics* (Vol. 4, pp. 6-pp). IEEE.

Po-Chen Lin & Reha Uzsoy (2016): Chance-constrained formulations in rolling horizon production planning: an experimental study, *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2016.1165356

Blackburn, J. D., Kropp, D. H., & Millen, R. A. (1986). *A comparison of strategies to dampen nervousness in MRP systems*. *Management science*, 32(4), 413-429.

Sivadasan, S., Smart, J., Huatuco, L. H., & Calinescu, A. (2013). Reducing schedule instability by identifying and omitting complexity-adding information flows at the supplier–customer interface. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 253-262.

Erik Lindskog, Johan Vallhagen & Björn Johansson (2017) Production system redesign using realistic visualisation, *International Journal of Production Research*, 55:3, 858-869.

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

| | | | |
|---|------------|---|-------------|
| Departamento de Ingeniería | | Departamento de Ingeniería Industrial | |
| Título | | Medición de la nerviosidad en un plan maestro de producción mediante uso de sistema multi agentes | |
| Nombre Memorista | | Matías Nicolás Castillo Orellana | |
| Modalidad | | Presencial | |
| Concepto | | Profesor(es) Patrocinantes | |
| Calificación | | Carlos Herrera López, Patricio Sáez Bustos | |
| Fecha | 22-01-2024 | Ingeniero Supervisor | Institución |
| Comisión (Nombre y Firma) | | | |
| Lorena Pradenas | | | |
| Resumen | | | |
| <p>La fluctuación en la demanda y posibles cambios en el entorno suelen constituir los principales problemas dentro de cualquier industria, obligando actualizar temporalmente las decisiones. La planificación de la producción trabaja en base a información para asignar tiempo y recursos, con el propósito de generar un pronóstico adecuado, sin embargo, la variabilidad en la producción plantea un desafío para las industrias. Dadas las exigencias de los sistemas de manufactura es necesario implementar nuevos enfoques, agregando mejoras y autonomía a los procesos. Los sistemas multi agentes y controlados por el producto han ampliado su desarrollo en los últimos años. En la presenta memoria de título, se propone una medida para evaluar la nerviosidad en un plan maestro de producción, teniendo como objetivo diseñar una estrategia que permita disminuir este indicador y por consecuencia proporcionar mayor estabilidad a la planificación.</p> <p>Los resultados demuestran que la nerviosidad del sistema disminuiría 40,172% en la simulación con mejores resultados, ósea, el plan sería más estable respecto al inicial y aumentarían en 12,062% los costos con relación a valores resultantes del MPS, generando una posible mejora significativa en la estabilidad del sistema en relación con el bajo aumento en costos que implican variaciones en la producción.</p> | | | |

