



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

Modelo predictivo-reactivo para el control de un sistema de recolección de productos en bodega (AS/RS)

Santiago Estrada^{a,c}, Juan Pablo Ramírez^{a,c}, Felipe Uribe^{a,c},

Jose Fernando Jiménez^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

Competitive environments have forced companies to improve their operations management and evolve constantly. Thus, such enterprises base their competitiveness strategies emphasizing on the implementation of advanced technologies, inventory management and process automatization. This paper presents a predictive-reactive model capable of controlling an automated warehouse's product retrieval system. This work aims to achieve an efficient and reactive control for the retrieval of inventory products, therefore providing an operative advantage. The creation of the control system incorporated optimization tools such as heuristics and metaheuristics designed to find efficient solutions. Reactive responses to disturbances and complex situations were solved by a distributed control architecture. Additionally, a study case was created in order to validate the proposal through a multi-agent-based model.

Keywords – Makespan, Modelo Predictivo-Reactivo, Sistemas AS/RS, Heurística, Metaheurística, Reactividad, Productividad

1. Justificación

En las últimas décadas, los avances tecnológicos han forzado a las empresas de manufactura a automatizar sus procesos para mantener la competitividad en el mercado. El uso de un sistema automático de recolección y suministro o AS/RS (por sus siglas en inglés) puede llegar a ser un factor diferenciador tanto en el proceso de recolección como en el suministro de productos dentro de su proceso logístico. Ciertamente, la ineficiencia en los tiempos de recolección puede resultar en la insatisfacción de los clientes y en costos altamente innecesarios, generando en ambos casos un impacto negativo frente a la competitividad de la empresa (Henn et al., 2012). Por esta razón, la disminución de los tiempos de recolección y suministro brinda la posibilidad de entregar sus productos al cliente final de una manera más oportuna, con una menor manipulación, aumentando la calidad de los productos y la satisfacción de sus clientes (Tracey et al., 2005).

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar en el diseño e implementación de un sistema automático de recolección y suministro (AS/RS) de producto en bodega. Específicamente, este estudio se enfoca en el proceso de recolección que comprenden dichos sistemas. Los resultados arrojados por esta investigación pueden llegar a ser la base para que las empresas consideren la opción de automatizar sus procesos de recolección y por lo tanto hacer un mejor uso de sus recursos evidenciando procesos eficientes y reactivos según sea necesario.

La implementación de un sistema AS/RS proporciona ventajas significativas en términos de productividad y manejo de recursos para las compañías (Wang et al., 2009 & Baker et al., 2007). Estos sistemas mejoran la productividad reduciendo el indicador de días de inventario al suministrar y recoger productos simultáneamente (D'Andrea et al., 2008). Al igual que la productividad, la reactividad en estos sistemas es un indicador primordial para la continuidad en caso de algún imprevisto. La utilización de robots, que trabajen bajo la supervisión de operarios en un sistema AS/RS, permite una reducción de la mano de obra directa, disminución de los costos de nómina y un aumento en los indicadores de eficiencia. Del mismo modo, los sistemas automatizados facilitan el control de inventarios, permitiendo un análisis de datos en tiempo real (Kouloughli et al., 2015). Adicionalmente, estos sistemas disminuyen errores de manipulación causados por operarios, tiempo desperdiciado e igualmente brindan una mejora en los flujos logísticos de todo el proceso (Azzi et al., 2011). En resumen, este sistema otorga la opción de establecer procesos de picking, rutas y movimientos de transporte más eficientes, logrando un incremento en el desempeño general de sus operaciones.

Existen muchas aproximaciones para el manejo y control de los sistemas AS/RS. Entre estos están, aquellos basados en políticas de control coherentes que determinan las acciones realizadas por los agentes (Pohjalainen, 2015), así mismo se encuentran aquellos con arquitecturas cuya comunicación local se comparte a través de holones distribuidos (Leitao et al., 2006). Estos son componentes autónomos y cooperativos de un sistema de fabricación. Sin embargo, un nuevo modelo de control, llamado “Modelo Predictivo-reactivo”, tiene un potencial en el manejo de las operaciones que buscan la productividad y reactividad, simultáneamente. Específicamente la utilización de un modelo de control predictivo-reactivo otorga beneficios con respecto a otras alternativas (Cardin et al., 2017). Por un lado, este tipo de control se encarga de realizar una optimización de las operaciones a realizar durante su ejecución (i.e. recolección y suministro de producto). Por otro lado, este control es menos propenso a experimentar un colapso total dado que el daño de un componente no compromete la funcionalidad general del sistema. De hecho, esta configuración permite que el sistema responda a estas perturbaciones y tenga una continuidad en el proceso. Igualmente, un beneficio adicional es que este sistema de control facilita la modificación, introducción y eliminación de componentes sin la necesidad de reprogramar todo el sistema. Esto quiere decir, que los cambios de la operación pueden ser implementados sin detener el proceso de recolección y suministro de los productos en bodega (Marik et al., 2005).

Un modelo predictivo-reactivo basado en agentes que simule el control de un sistema AS/RS facilita el análisis y replicabilidad de un proyecto a mayor escala en el futuro. Así mismo, esta tecnología se podría aplicar a una gran variedad de empresas. En definitiva, la implementación tiene el potencial de mejorar la funcionalidad integral de los sistemas actualmente utilizados por las empresas, aumentando su eficiencia y por consiguiente otorgándoles una ventaja competitiva. Igualmente, conocer el impacto que brindan los sistemas automatizados dentro de las empresas ofrece la posibilidad de evaluar e intentar mejorar en futuras investigaciones los métodos seleccionados actuales.

2. Planteamiento del problema

2.1. Problema general

La automatización de las bodegas permite reducir los tiempos de recolección, mejorar el control de los inventarios y los flujos logísticos dentro de las empresas. Sin embargo, entre sus limitaciones, un sistema AS/RS tiene la dificultad de mantener un adecuado protocolo de control que garantice que exista un nivel óptimo en la eficiencia y que permita reaccionar a diferentes perturbaciones. Considerando esta limitación del modelo de control, surge la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo se puede mejorar la eficiencia y la reactividad de los tiempos de recolección en el proceso de manejo de inventarios en un sistema AS/RS?* Para resolver esta pregunta se deben resolver las siguientes sub-preguntas:

2.2 Sub-preguntas a resolver

Tabla 1. Sub-preguntas

Sub-Pregunta	Descripción
¿Qué tipo de configuración de control para un sistema AS/RS permitiría una mayor eficiencia en la recolección de productos?	La respuesta de esta sub-pregunta permite realizar el análisis de diferentes configuraciones para afinar una configuración que otorgue una política y/o protocolo que busque una solución a las limitaciones.
¿Qué política y protocolo se deben utilizar para elaborar el sistema de control de un sistema AS/RS?	La respuesta de esta sub-pregunta permite buscar la política y el protocolo más adecuado para minimizar el tiempo de tratamiento de un producto desde que es solicitado hasta que es alistado y empaquetado.
¿Cómo podría maximizarse la utilización del sistema AS/RS y aprovechar el funcionamiento y los beneficios ofrecidos por el sistema?	La respuesta de esta sub-pregunta propone el mejoramiento de un sistema capaz de optimizar simultáneamente la eficiencia y la reactividad al responder oportunamente a eventos no planeados.

3. Antecedentes

La gestión de operaciones en las empresas ha evolucionado considerablemente a causa de las fluctuaciones del mercado (Gunasekaran et al., 2008). En los últimos años, las tecnologías de información y comunicación han transformado la forma de operar de las empresas. Estas están obligadas a evolucionar constantemente debido a los entornos hiper-competitivos actuales. Las empresas compiten para destacarse en el mercado y esta dinámica se ha venido transformando. Específicamente, la digitalización y la globalización han reestructurado el panorama de competitividad (Veliyath et al., 2000). Los entornos en los que compiten las empresas son cada vez más exigentes en virtud del creciente número de competidores con capacidades de producción similar. Por estos motivos, las empresas se ven impulsadas a reestablecer la forma en que satisfacen las necesidades de sus consumidores (Belleghem, 2016).

Las estrategias de competitividad de las empresas se enfocan en cinco pilares: precio, calidad, flexibilidad, dependencia y capacidad de respuesta. La realización de un plan de acción que agrupe adecuadamente estos cinco pilares permite a las compañías entregar productos de alta calidad alrededor del mundo, a un precio competitivo, lo más rápido posible y personalizado (Gunasekaran, 2012). En la actualidad, dos factores influyen en la competitividad de las empresas: la implementación de nuevas

tecnologías dentro de sus procesos y el correcto manejo de sus los inventarios. En primer lugar, la implementación de tecnologías de información ha tenido un impacto considerable en las cadenas de suministro, logrando que la información sea compartida inmediatamente con todos sus eslabones (Cachon, 2000). Además, en un segundo lugar, uno de los procesos más importantes en la cadena de valor de una compañía se centra en tener una adecuada organización y manejo de sus inventarios (Odoom, 2012). En resumen, estos dos aspectos en conjunto son fundamentales para que las empresas sean competitivas abarcando los cinco pilares previamente mencionados.

Por un lado, los sistemas de recolección se han visto influenciados por los grandes avances tecnológicos de las últimas décadas. Estos avances han impulsado la necesidad de fortalecer tanto la eficiencia como la efectividad operacional (Mutsaers et al., 1998). Por consiguiente, las empresas tienen que estar siempre actualizadas tecnológicamente para poder destacarse en el mercado. Las principales ventajas de la adquisición de nuevas tecnologías son su flexibilidad de mecanización, la estandarización de calidad de los productos y la reducción de la mano de obra requerida. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías conlleva dificultades como el alto costo de adquisición y complicaciones para empresas que no están familiarizadas con dichas tecnologías (Meredith, 1987).

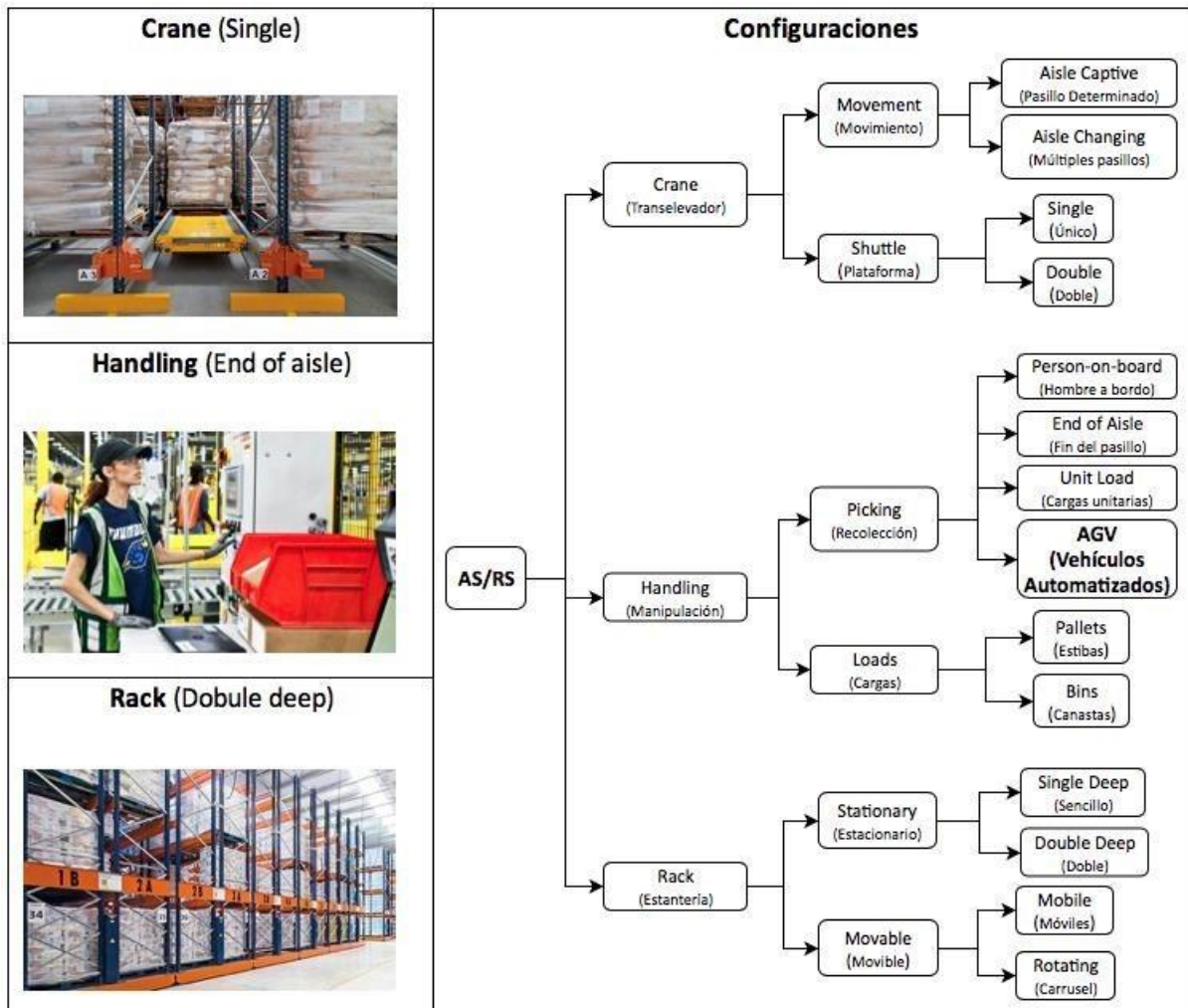
Por otro lado, el proceso de manejo de inventarios está encargado de planear, implementar y controlar los flujos de los productos y servicios dentro de una compañía (Singh, 2018). Conocer en tiempo real en donde están los productos, la cantidad y las condiciones en que se encuentran, es vital para la eficiencia de un proceso de manufactura (Cachon, 2000). La adecuada implementación y la efectividad de este proceso, permite a las compañías reducir costos y mejorar la satisfacción del cliente (Autry et al., 2005). En general, el correcto manejo de inventarios implica recibir, almacenar, etiquetar, preparar las órdenes, realizar movimientos internos y lograr una trazabilidad, entre otros procesos. De esta manera las dificultades pueden reflejarse en la eficiencia y eficacia del proceso de manejo de inventarios, arriesgando la operatividad y los costos asociados al proceso (Singh, 2018). Debido a esto, las organizaciones deben implementar tecnologías modernas para tener varios tipos de sistemas de recolección que les permita manejar y posteriormente hacer más eficiente el manejo de inventarios a lo largo de la cadena de abastecimiento.

La automatización de las bodegas es el resultado de la implementación de nuevas tecnologías dentro del manejo de inventarios. La automatización permite transportar los productos en un menor tiempo, disminuyendo la intervención de operarios, mejorando la reactividad de las empresas y aumentando el control y trazabilidad del producto en bodega (Varila, 2005). Los AS/RS son un mecanismo automático de suministro y recolección de producto en bodega. Estos están compuestos por Hardware, Software y componentes de red, que se comunican entre ellos mediante un servidor central. Existen tres componentes que caracterizan la forma de operar estos sistemas: a) La manipulación o **Handling**, b) el elevador o **Crane** y c) la estantería o **Rack**. El handling es el componente para transportar, embalar y almacenar los productos (Kulwiec, 1985). Los cranes son máquinas encargadas del almacenaje y la recolección en las bodegas, capaces de mover, recoger y depositar los productos. Los racks son estanterías con espacios designados para acomodar las cargas requeridas (Roodbergen et al., 2009). La figura 1 ilustra los componentes de los AS/RS y muestra las posibilidades de configuración para cada uno de estos.

La implementación de un sistema AS/RS en los procesos de recolección tiene beneficios y limitaciones en cuanto a su implementación y su funcionamiento. Dentro de los beneficios que presentan dichos sistemas, se encuentran la reducción de costos de mano de obra directa, la disminución de errores en el manejo del inventario, el mejoramiento en flujos logísticos y el perfeccionamiento de control de inventarios (Azzi et al., 2011). En detalle, esta implementación implica una reducción del personal requerido para la recolección de productos, disminución del porcentaje de productos dañados por manipulación,

mejoramiento en los tiempos de alistamiento y transporte, y mejora la precisión de la información de los productos en bodega (Kremljak et al., 2014). En otras palabras, la automatización de las bodegas permite incrementar la eficiencia de las empresas en términos de tiempos de alistamiento o picking, haciendo más eficiente la reactividad en la ejecución de los procesos de recolección. No obstante, como se dijo antes en la implementación de tecnologías, el uso de un AS/RS tiene ciertos desafíos y complicaciones como los altos costos de inversión, la gran cantidad de variables de diseño a tener en cuenta y el control detallado de mantenimiento (Li et al., 2014 & Chetty et al., 2003).

Figura 1. Componentes de un AS/RS



Fuente: Los Autores

Existen diferencias entre los sistemas AS/RS dada la alta posibilidad de configuraciones existentes. La escogencia de sus componentes debe ajustarse a las necesidades de cada empresa para maximizar su utilización. Por ejemplo, el sistema AS/RS *single unit-load aisle-captive* se basa en la funcionalidad del handling. Este facilita el transporte de cargas en estibas, razón por la cual es utilizado en empresas que manejan productos al por mayor (Roodbergen et al., 2009). Por otro lado, existen sistemas que se basan primordialmente en la funcionalidad del crane. El sistema *double-shuttle* brinda el beneficio de transportar dos cargas al mismo tiempo, habilitando el recoger y almacenar productos en una misma ubicación sin la necesidad de retornar al punto de recolección (Roodbergen et al., 2009). Finalmente, un tipo de sistema que

se basa en las funcionalidades del rack es el carrusel (*carousel* por su nombre en inglés), este sistema es práctico para almacenar productos pequeños y medianos en varios niveles (Roodbergen et al., 2009). En general la configuración de estos sistemas y la utilización de los componentes brindan tanto beneficios como limitaciones a las empresas que los utilizan.

Existen diversos retos a la hora de implementar un sistema AS/RS. Las limitaciones esenciales son los altos costos de inversión, el ajuste de los requisitos de las bodegas en el sistema y la recopilación de datos en tiempo real. Sin embargo, uno de los desafíos más críticos es el control del comportamiento y comunicación de los elementos que componen el sistema. Este protocolo debe tener un proceso de toma de decisiones que incluya modelos de optimización y de reactividad que manejen adecuadamente la recolección y suministro de producto, específicamente en tiempo real (Jiménez et al, 2017). Al resolver este último desafío, además de lograr mayor efectividad y eficiencia en el manejo de inventarios de una empresa, se esperaría reducir los tiempos y costos de la recolección y suministro de producto en bodega. (Colla et al., 2010)

Los sistemas automáticos de cualquier tipo (i.e. Manufactura, logística, robótica, etc.) se pueden clasificar por su arquitectura de control. La arquitectura está definida por sus componentes, estructura y comportamiento. Estas características definen el funcionamiento y la toma de decisiones del sistema. En cuanto a la estructura, una arquitectura puede ser centralizada, distribuida o híbrida. Una arquitectura de control centralizada se caracteriza por tener un procesador central donde se realizan todas las decisiones y donde una base de datos global almacena todas las actividades del sistema (Dilts et al., 1991), favoreciendo la optimalidad del sistema. Koster, et al (1998) encontraron una disminución en la cantidad de montacargas requeridos y en los tiempos de respuesta de un centro de distribución mediante el uso de una arquitectura centralizada. En el caso de una arquitectura distribuida, cada componente tiene completa autonomía y la toma de decisiones la realiza por coordinación entre estos mismos (Dilts et al., 1991), favoreciendo la reactividad del sistema. Por ejemplo. Barenji, et al (2013) utilizaron una arquitectura distribuida en conjunto con RFID, para manejar el almacenamiento de una alta variedad de productos y bajo nivel de producción. Finalmente, las arquitecturas híbridas son una combinación entre las arquitecturas centralizadas y distribuidas, donde se quiere beneficiar de la eficiencia de las arquitecturas centralizadas y de la reactividad de las arquitecturas distribuidas (Trentesaux, 2009) caracterizándose por ser un modelo predictivo-reactivo. Wu, et al (2016) utilizaron esta arquitectura para un sistema de manufactura flexible con el propósito de buscar tanto la optimalidad de los indicadores, como la capacidad de reaccionar en caso de alguna perturbación. Los tres tipos de arquitectura son igualmente válidos según los objetivos que se estén buscando en el sistema.

Una correcta configuración de la arquitectura de control permite lograr que el sistema sea reactivo y eficiente. En la literatura, se ha utilizado una gran variedad de modelos de arquitecturas, como por ejemplo los sistemas holónicos (Giret, Botti, 2009), los sistemas bio-inspirados (Brezovnik et al., 2015), métodos exactos (Wauters et al., 2016) y heurísticas (Azzi et al., 2011), entre otros. En la figura 2 se muestra en resumen los principales autores que trabajan los temas de arquitectura de control y sistemas de control en sistemas AS/RS. Como se puede evidenciar en la figura, se hace una descripción de la metodología utilizada y una referenciación de los temas trabajados.

Sin embargo, uno de los modelos más prometedores para la validación de arquitecturas de control son los sistemas multi-agentes, o MAS (por sus siglas en inglés). Un agente es una entidad computacional que está situado en un ambiente, y es capaz de tomar acciones autónomas con el fin de cumplir sus objetivos (Weiss, 1999). Este sistema utiliza uno o varios agentes capaces de interactuar entre sí y tomar decisiones autónomas para el desarrollo de las tareas asignadas. El buen funcionamiento de un MAS se basa en el

establecimiento de protocolos eficientes de comunicación y coordinación que garanticen la distribución de las tareas, conocimiento y responsabilidades de cada uno de los componentes del sistema (Bravo et al., 2004). Estos componentes utilizan un control independiente y tienen la capacidad de reorganizar las tareas entre ellos (Cardin et al., 2017). Por ejemplo, Kim et al. (2003) implementó un sistema de control basado en multi-agentes dentro de una bodega debido a la flexibilidad y la robustez ofrecida.

Entre los beneficios que brinda un MAS se encuentra la capacidad de tomar decisiones complejas y dinámicas como las que se encuentran en una bodega. Así mismo, el MAS permite que el sistema sea capaz de enfrentar perturbaciones teniendo la capacidad de responder autónomamente ante imprevistos. La capacidad de reasignar las tareas de todos sus componentes en tiempo real facilita la mejora del rendimiento general del sistema (Basile et al., 2003). La reasignación de tareas solo es posible si hay mecanismos que predigan el funcionamiento de los componentes y se logren comportamientos emergentes globales deseados (Marik et al., 2005).

Figura 2. Resumen de la revisión literaria

Autor	Metodología	Arquitectura de control			Sistemas de control					
		C	D	H	ME	H	MH	SM	HO	BI
Koster 1998	Comparación entre estructuras centralizada y distribuida para el caso de un centro de distribución	x	x							
Bravo 2004	Diseño de una arquitectura distribuida basada en multi-agentes para el proceso de explotación petrolera		x					x		
Marik 2005	Utilizar sistema basado en multi-agentes dentro de una arquitectura distribuida para resolver procesos de decisión complejos		x					x		
Asokan 2008	Aplicación de algoritmo genético y de enjambre de partículas para programar tareas dentro de un sistema AS/RS						x			x
Giret 2009	Construcción de un sistema de manufactura holónico a través de sistemas multi-agentes		x					x	x	
Bessenouci 2010	Uso de la metaheurística tabú para minimizar el tiempo de ciclo de recolección de producto						x			
Manca 2011	Algoritmo descentralizado para el manejo eficiente de robots en la industria, con comunicación entre robots espacialmente adyacentes		x			x				
Brezovnik 2014	Utilización del algoritmo colonia de hormigas para encontrar el camino mas corto en la recolección de un producto									x
Müller 2016	Uso de una MILP para controlar las intersecciones de AGVs				x					
Wu 2016	Utilización de arquitectura híbrida para un sistema de manufactura flexible, buscando optimalidad en los indicadores			x						
Wan 2018	Diseño de un controlador de AGVs para evitar colisiones por medio de redes de petri.				x					

Arquitectura de control:	Sistemas de control:
C: Centralizado	ME: Métodos exactos
D: Distribuido	H: Heurísticas
H: Híbrido	MH: Metaheurísticas
	SM: Simulación multi-agentes
	HO: Holónicos
	BI: Bio-inspirados

Fuente: Los Autores

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Diseñar y desarrollar un modelo virtual de un sistema de control automático de recolección y suministro AS/RS basado en agentes, que permita mejorar el proceso de recolección de una bodega de una cadena de abastecimiento.

4.2. Objetivos específicos

- Elaborar un modelo virtual de un sistema de control automático de recolección y suministro de una bodega AS/RS, que permita optimizar y responder adecuadamente en la ejecución de los procesos de recolección de producto.
- Implementar la propuesta planteada en un modelo de simulación por multi-agentes, estableciendo los parámetros e instancias para representar el funcionamiento de este sistema.
- Evaluar el modelo virtual de un sistema de control automático en el ámbito económico, validando los beneficios y limitaciones de la propuesta planteada.

5. Alcance y Limitaciones

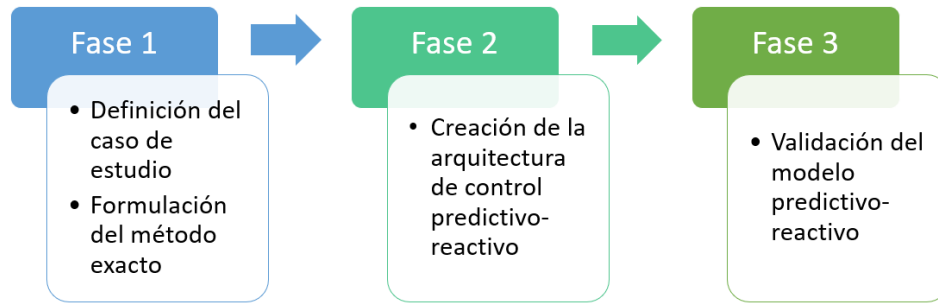
El presente trabajo busca realizar una aplicación de investigación, enfocándose en desarrollar un sistema de control para el proceso de recolección de producto en bodega. Se implementarán heurística(s) y/o meta-heurística(s) ya que el enfoque principal de la investigación es la programación del sistema de control por multi-agentes. Dicha programación será realizada a través del software *Netlogo* dada su facilidad para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo y por su licencia gratuita.

La complejidad y extensión del proceso de recolección y suministro de producto, así como el corto periodo de tiempo requerido para el desarrollo de este trabajo limitan a que la propuesta de investigación no abarque los aspectos físicos que comprenden dichos procesos. Del mismo modo, estos procesos varían considerablemente dependiendo de la empresa a la que pertenecen y de sus variables asociadas, motivo por el cual esta investigación se limitará a resolver el problema referido en el caso de estudio.

6. Metodología

La metodología del trabajo se realizó en tres fases para la ejecución y validación de los objetivos específicos planteados. La primera fase del trabajo define el caso de estudio de un sistema AS/RS y la formulación de un método exacto capaz de asignar los recursos de manera óptima. Esto con la finalidad de recrear el escenario de estudio y comprobar el funcionamiento del sistema de control propuesto. La segunda fase presenta la creación de la arquitectura de control predictivo-reactivo. El aspecto predictivo comprende la unión de heurísticas y metaheurísticas para la asignación de las operaciones a los AGVs. De manera análoga, la parte reactiva consiste en el protocolo de comunicación y el código de simulación del sistema de recolección de producto en bodega. Para finalizar, en la última fase del trabajo se validó el modelo predictivo-reactivo. El resumen de la metodología se encuentra en la figura 3.

Figura 3. Metodología



Fuente: Los Autores

6.1 Primera Fase

6.1.1 Definición del caso de estudio

La primera fase del trabajo consistió en la definición del caso de estudio para su implementación en el modelo predictivo-reactivo. El objetivo de este caso consiste en mejorar la eficiencia y reactividad del sistema de recolección. Para lograr esto se deben asignar todas las operaciones de una orden de pedido de manera simultánea con el fin de ser recolectadas por diferentes agentes. Este tipo de problema es conocido como scheduling, específicamente para *Parallel Machines*, donde varias máquinas pueden procesar simultáneamente las diferentes tareas. La solución de esto debe dar como respuesta a ¿Qué AGV recolecta qué operación y en qué orden debe hacerlo? Los objetivos más comunes son la minimización del makespan, la tardanza y la utilización de los recursos.

Para este caso se definieron las siguientes restricciones:

- Cada máquina no puede procesar más de una operación al mismo tiempo
- Las distancias entre los productos deben ser equidistantes
- Las operaciones no se pueden dividir en diferentes AGVs
- La cantidad de productos y AGVs está establecida por los parámetros de entrada
- La velocidad de los AGVs está establecida por los parámetros de entrada
- Todas las operaciones deben ser realizadas
- Los tiempos de procesamiento de las operaciones dependen de la distancia de cada AGV a los diferentes productos y de las rutas que estos tomen para recolectarlos

Se establecieron los siguientes parámetros de entrada: cantidad de AGVs (10), distancia entre productos (1m), cantidad de productos disponibles (400) y la velocidad de los AGVs (1 m/s). Así mismo se definió la orden de pedido a trabajar que se puede observar en la figura 4.

La orden de pedido utilizada para el caso de estudio consiste en cuatro Jobs, cada uno con una importancia y fecha (Due date) diferente. Cada Job está conformado por un número diferente de operaciones (ID Operación) a recolectar donde cada una de estas representa un producto de la bodega. El objetivo consiste en asignar de manera óptima las distintas operaciones a los agentes del sistema AS/RS.

Figura 4 - Orden de pedido

ID Job	ID Operación	Número Producto	Cantidad	Importancia Job	Due Date
1	P012	012	2	4	300
	P118	118	3		
	P217	217	2		
2	P195	195	3	3	150
	P289	289	3		
	P090	090	3		
3	P199	199	3	9	210
	P014	014	2		
	P163	163	2		
	P314	314	4		
4	P105	105	3	6	170
	P266	266	4		
	P228	228	3		

Fuente: Los Autores

6.1.2 Formulación del método exacto

Dentro de la primera fase, se programó un modelo matemático predictivo para medir el comportamiento de la entidad global con base en instancias pequeñas. El modelo planteado es un acercamiento basado en la programación de máquinas paralelas (Parallel Machines Job Scheduling) puesto que no existen restricciones en cuanto a la asignación de una operación a alguno de los AGVs. Este tipo de acercamiento supone un conjunto de máquinas en paralelo capaces de procesar cualquier operación a asignar. Para este caso, los tiempos de procesamiento de las operaciones son variables ya que dependen de la distancia de cada AGV a los diferentes productos y de las rutas que estos tomen para evitar colisiones. A continuación se presenta en detalle la formulación del modelo de programación lineal entera mixta (Anexo 1).

Conjuntos

I: Carros
 J: Jobs
 K: Operaciones
 T: Turnos

Parámetros

DD_j : Due Date del Job j
 IM_j : Importancia del Job j
 M : Un número muy grande
 R_{kj} : Binario, 1 si la operación k pertenece al Job j , 0 de lo contrario
 TP_{ki} : Tiempo de procesamiento de la operación k en el carro i

Variables

X_{ikt} : Binaria, 1 si el carro i realiza la operación k en el turno t , 0 de lo contrario
 Y_{ikt} : Fecha de finalización del carro i que realiza la operación k en el turno t
 W_{ikt} : Fecha de inicio del carro i que realiza la operación k en el turno t
 F_j : Fecha de finalización del Job j

Restricciones

$$MIN(Z) = \sum_{j=1}^J IM_j F_j \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{ikt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T X_{ikt} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$W_{ik1} = 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (4)$$

$$X_{ikt} M \geq W_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, t \in T \quad (5)$$

$$X_{ikt} M \geq Y_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Y_{ikt} R_{jk} \leq F_j \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_{ikt} = \sum_{k=1}^K W_{ikt+1} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \setminus t < T \quad (8)$$

$$Y_{ikt} = TP_{ki} X_{ikt} + W_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (9)$$

La ecuación (1) presenta la función objetivo: comprende la minimización de la fecha de terminación ponderada de los Jobs. La restricción (2) limita que cada carro no pueda procesar más de una operación en cada turno. La ecuación (3) restringe a que cada operación se pueda realizar una sola vez. En cuanto a la restricción (4), esta implica que la fecha de inicio para cada carro en el primer turno sea igual a 0. Las ecuaciones (5) y (6) restringen a que solo existan tanto fechas de inicio como de finalización si un carro procesa una operación en ese turno. La restricción (7) en conjunto con la ecuación (2) limitan a que los tiempos de finalización de cada Job sean iguales a los tiempos de finalización de la última operación realizada perteneciente a dicho Job. En cuanto a la ecuación (8), esta indica que los tiempos de inicio de las operaciones en cada turno de cada carro sean iguales a los tiempos de finalización del turno anterior. Por último, la restricción (9) calcula el tiempo de finalización de cada operación en cada turno de cada carro de acuerdo con los tiempos de procesamiento.

6.2 Segunda Fase

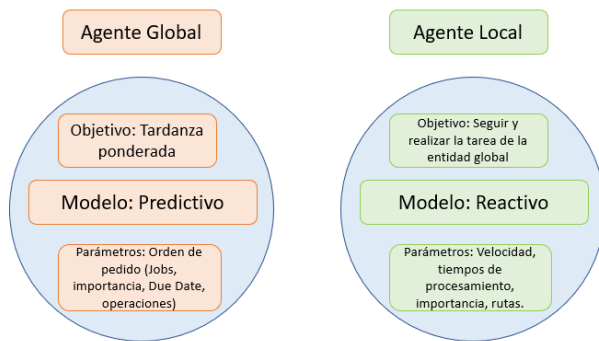
Creación de la arquitectura del modelo predictivo-reactivo

El tipo de arquitectura de control define el nivel de reactividad del sistema. La arquitectura debe delegar la responsabilidad de la toma de decisiones a los diferentes componentes de control, así mismo debe coordinar y ejecutar la correcta asignación y el ruteo de los diferentes agentes. Por esta razón se decidió construir una arquitectura de control híbrida con el fin de garantizar flexibilidad y una capacidad de respuesta suficientemente rápida para responder eficientemente a disrupciones dentro del sistema. Esto otorga la oportunidad de optimizar la función objetivo tanto a largo como a corto plazo.

6.2.1 Componentes

Se definieron dos tipos de agentes que conforman la arquitectura híbrida, agentes globales y locales. Por un lado, un agente global constituye un modelo predictivo encargado de minimizar la tardanza ponderada de la asignación de las operaciones en los AGVs. Para cumplir con su objetivo, este agente recibe una orden de pedido como parámetro de entrada. Por otro lado, un agente local establece un modelo reactivo encargado de cumplir con la asignación de las operaciones otorgadas por el agente global. Para ejecutar su función, cada agente local cuenta con parámetros específicos con el fin de procesar sus operaciones. En la siguiente figura se puede observar los componentes de la arquitectura de control.

Figura 5- Componentes de la arquitectura

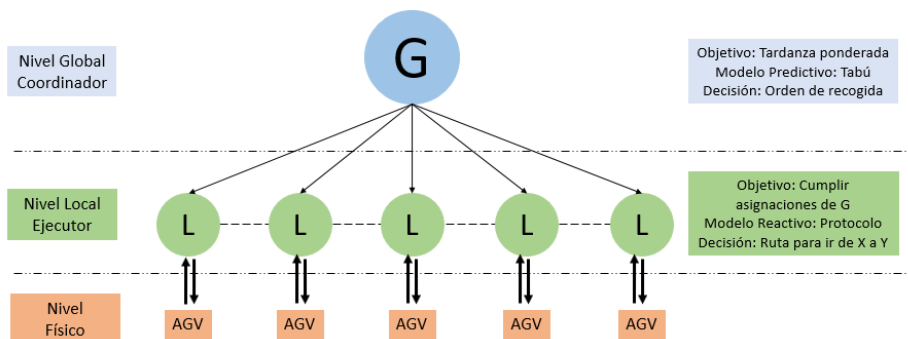


Fuente: Los Autores

6.2.2 Estructura

La arquitectura de control se rige por un modelo predictivo que determina la asignación de las operaciones a los diferentes agentes. Esto representa una relación jerárquica tipo *master-slave* que ordena el comportamiento global de los agentes minimizando la función objetivo a largo plazo. Paralelamente, una relación heterárquica entre los agentes locales permite que estos negocien sus decisiones colaborativamente garantizando la distribución de las tareas, del conocimiento y de las responsabilidades de los agentes para que el sistema sea funcional (Bravo et al., 2004). Estas decisiones están basadas en atributos de importancia otorgados a los AGVs dependiendo del Job que tienen asignado y estos deben estar comprometidos en darle prioridad a aquellos que posean una importancia mayor a la de ellos mismos. En este proceso los agentes colaboran constantemente con el fin de tomar decisiones oportunas para mejorar la función objetivo a corto plazo. La estructura de la arquitectura de control se muestra en la figura 6:

Figura 6. Arquitectura de control



Fuente: Los Autores

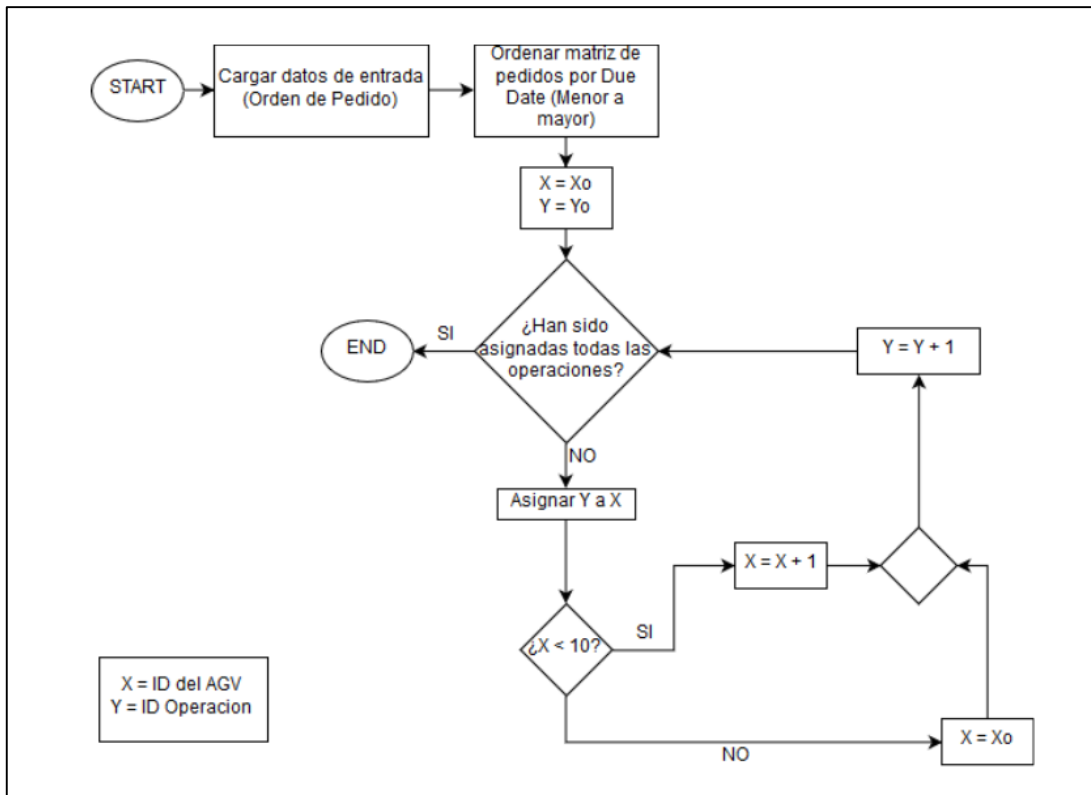
La toma de decisiones entre agentes es el resultado de una actualización constante de su percepción frente al entorno del sistema inspirado en Weyns et al., (2009) que les permite a los agentes intercambiar información para coordinar su comportamiento. Para esto cada AGV cuenta con un campo de visión que le permite evitar colisiones. Los campos de visión están basados en los que Pappas et al., (1996) utilizaron para la resolución de conflictos en sistemas híbridos basados en multi-agentes para controladores aéreos. Para este trabajo el campo de visión de un AGV es el área física alrededor que este ocupa a lo largo de su trayecto, en caso de que el campo de visión de un agente se intercepte con el de otros AGVs, un conflicto ocurre, comenzando entre los participantes el proceso de negociación.

6.2.3 Comportamiento

6.2.3.1 Comportamiento predictivo

Una vez realizada la arquitectura de control y el modelo matemático predictivo, se construyó un modelo de optimización para realizar la organización de la recolección (scheduling) de una bodega AS/RS. Para esto se diseñó un aplicativo en Visual Basic for Applications (VBA) de Microsoft Excel (Anexo 2) y se puede observar la forma en la que este opera en la siguiente figura.

Figura 7. Algoritmo Voraz



Fuente: Los Autores

El criterio del algoritmo utilizado consiste en asignar todas las operaciones a los agentes, con el fin de cumplir la demanda de todos los Jobs. Si una operación ya ha sido asignada a un AGV, la heurística continuará con la asignación de la siguiente operación. El proceso de asignación garantiza que las operaciones sean asignadas una a una y en orden ascendente en la totalidad del número de AGVs. Además, cuando una operación es asignada a un AGV, este tiene la obligación de recoger todos sus productos sin interrupciones. Además, la división de una operación en múltiples AGVs no está permitida.

Para mejorar la solución encontrada, se programó una búsqueda Tabú, la cual es una meta-heurística que guía una búsqueda en el espacio de solución, intentando superar óptimos locales mediante el uso de estructuras de memoria (Laguna et al., 1993). Esta técnica realiza cambios en el vector de la demanda para realizar diversificaciones en la solución y poder determinar una asignación más cercana al óptimo. En la siguiente figura se muestra el pseudocódigo de la técnica de solución.

Figura 8. Pseudocódigo de la metaheurística Tabú

Algoritmo 1 Pseudocódigo metaheurística Tabú

Start

1. **Do**
2. newFO = mejorCambioNoTabu
3. updateTabu
4. **If** newFO < bestF **Then**
5. iteracionesSinMejorar = 0
6. bestF = newFO
7. **Else**
8. iteracionesSinMejorar = iteracionesSinMejorar + 1
9. **End If**
10. **While** iteracionesSinMejorar <= 2 **Or** TimesExceeded

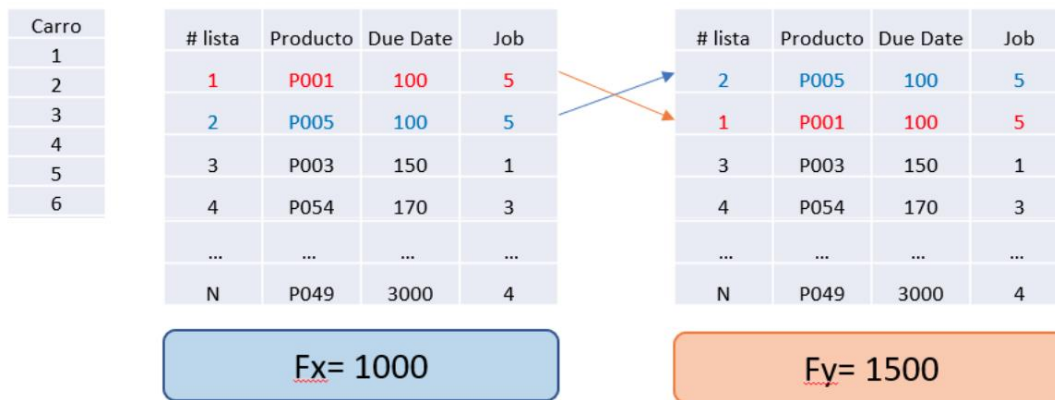
End

Fuente: Los Autores

Para la realización del Tabú, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- **Cambios:** La forma en la que se realizan los cambios dentro del vector de la demanda es uno a uno como se muestra en la siguiente figura.

Figura 9. Representación cambios vector demanda



Fuente: Los Autores

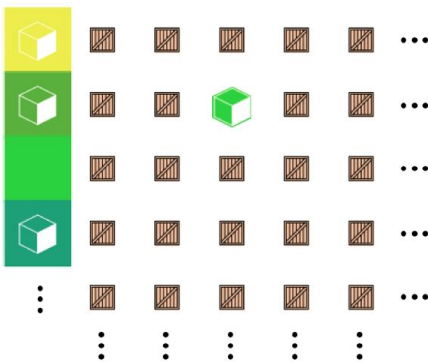
- **Matriz Tabú:** Restringe que los cambios realizados no vuelvan a ocurrir durante 2 iteraciones, esto con el fin de no caer en un óptimo local y tener una mayor diversificación en la solución.
- **Decisión de parada:** Debido a la necesidad de una solución factible en un tiempo de procesamiento corto, se acordó que la decisión de parada de la metaheurística sea determinada por un tiempo establecido (15 minutos de procesamiento) o por un número determinado de iteraciones sin mejorar (2 iteraciones).
- **Función objetivo:** La función objetivo minimiza la tardanza ponderada.

Para finalizar, esta solución es utilizada como la parte del sistema de control (master-slave) de los AGVs en la simulación basada en multiagentes. El algoritmo cumple con la asignación de todas las operaciones y demás restricciones dentro del tiempo estipulado de procesamiento.

6.2.3.2 Comportamiento reactivo

Como continuación de la segunda fase del trabajo, se creó el modelo reactivo del sistema en el software de simulación basado en agentes **Netlogo** (Anexo 3) por su facilidad para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo y por su licencia gratuita. Este programa permite diseñar la simulación en un plano cartesiano de dos dimensiones donde se establece gráficamente el layout del sistema. Para cumplir con las restricciones del caso de estudio, se decidió realizar una matriz cuadrada de productos equidistantes en filas de a 20 numeradas de manera ascendente y una zona de picking para los AGVs representando los componentes básicos de una bodega. Estos componentes son representados por el programa como agentes otorgándoles atributos para su control como las partes de un sistema AS/RS. En este software el tiempo es representado por pasos discretos (*ticks*) para simular el comportamiento de dichos agentes. En la siguiente figura se puede visualizar el aplicativo que permite simular la modelación virtual.

Figura 10. Diseño del sistema de control



Fuente: Los Autores

Después de diseñar la configuración de la modelación se procedió a realizar la lógica de control de los diferentes AGVs como se ve representado en el pseudocódigo de la figura 11.

Los AGVs cuentan con un campo de visión enfrente de ellos que les permite visualizar su entorno y anticipar colisiones. En caso de detectar una posible colisión, los AGVs entran en un proceso de negociación. Para la negociación se tienen en cuenta factores como la importancia de cada Job y el número de operaciones restantes por realizar. Existen dos casos de posibles negociaciones entre los agentes. El primero ocurre cuando los AGVs se encuentran frente a frente dentro de sus campos de visión, en este caso el AGV de menor importancia se debe desviar. En el segundo caso, un agente debe detenerse ante otro de mayor importancia al detectarlo en su campo de visión frente a una colisión inminente.

Figura 11. Pseudocódigo de la lógica de control de las entidades locales

Algoritmo 2 Pseudocódigo lógica de control de entidades locales

Start

1. **If** (Falta por recoger = true) **then**
2. **Repeat**
3. Asignar siguiente operación
4. Revisar colisión
5. Mover en dirección X
6. **If** coordenadaActualX = CoordenadaProductoX **then**
7. **If** CoordenadaActualY ≠ CoordenadaProductoY **THEN**
8. Revisar colisión
9. Mover dirección Y
10. **End if**
11. **End if**
12. **If** CoordenadaActualY = CoordenaProductoY **then**
13. Recoger = true
14. **End if**
15. **If** (Recoger = True) **then**
16. **If** (CoordenadaActualY ≠ CoordenadaOrigenY) **then**
17. Revisar colisión
18. Mover en dirección Y
19. **End if**
20. **If** (CoordenadaActualX ≠ CoordenadaOrigenX) **then**
21. Revisar colisión
22. Mover dirección X
23. **End if**
24. **If** (CoordenadaActualY = CoordenaProductoY) **then**
25. Dejar
26. **End if**
27. **End if**
28. **Until** Todos las operaciones recogidas
29. **End if**

End

Fuente: Los Autores

Para incrementar la reactividad del sistema de control se implementaron tres posibles tipos de perturbaciones. La primera consiste en un bloqueo que permite simular el daño u obstrucción de una celda específica ingresada por el usuario que no corresponda a una operación actual de alguno de los AGVs. En este caso los AGVs modifican su ruta al detectar dicha interferencia. Así mismo se agregó como perturbación la posibilidad de ingresar productos no planeados requeridos de manera inmediata, en este caso el primer AGV en estar disponible aplaza su siguiente operación para recoger dicho producto y cambia al máximo el valor de su importancia para evitar demoras. Por último se incluyó la posibilidad de dañar un AGV. En este caso dicho vehículo se detiene en la primera celda por la que pase y que esta no corresponda a una operación actual de alguno de los AGVs, luego asigna sus operaciones faltantes al primer AGV que termine sus asignaciones mientras que el AGV dañado actúa como una perturbación tipo 1.

6.3 Tercera fase

Validación del modelo predictivo-reactivo

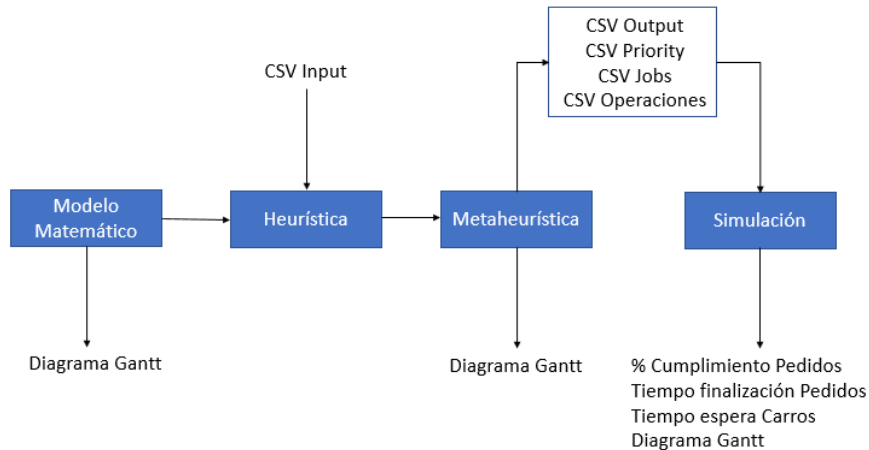
6.3.1 Propósito

Para la tercera fase, se realizó la validación del modelo predictivo-reactivo con el propósito de contrastar los resultados de la propuesta de este trabajo frente a un método exacto. Esto con la finalidad de verificar la exactitud de la solución planteada.

6.3.2 Materiales

Los implementos utilizados como datos de entrada para el modelo predictivo-reactivo son archivos tipo CSV (Anexos 4 al 8) que le otorgan los atributos a los AGVs y se encuentran descritos en la figura 12.

Figura 12. Diagrama de bloques de los componentes del modelo



Fuente: Los Autores

El archivo “CSV Input” contiene la información de la orden de pedido. Este debe ser ingresado por un usuario en el aplicativo VBA del modelo predictivo. El output de este modelo comprende cuatro archivos CSV que le transfieren la información de la asignación de la entidad global al modelo reactivo en la simulación.

El método exacto y el modelo predictivo-reactivo fueron realizados y ejecutados en un computador con procesador Intel® Core™ i5-7200U CPU y una memoria RAM de 12.0 GB. Para la simulación se utilizó la versión 6.0.4 de Netlogo de 64 bit.

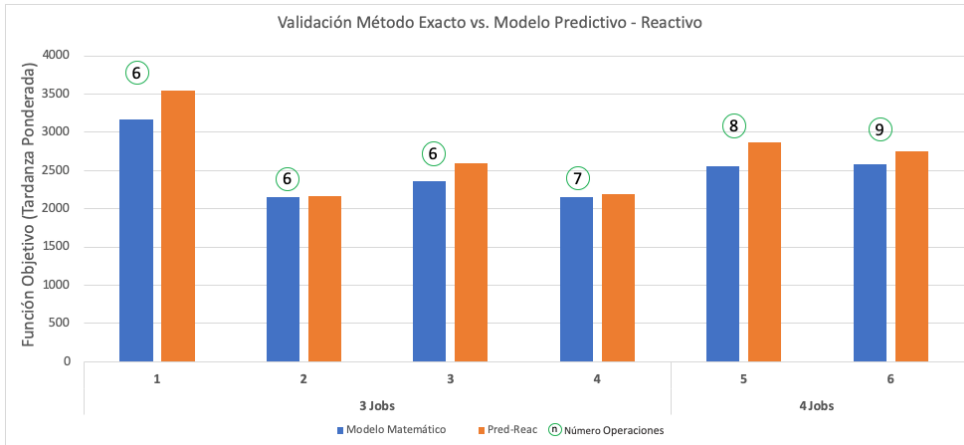
6.3.3 Método

Continuando con la tercera fase del trabajo se realizó una comparación del modelo predictivo-reactivo con la solución del método exacto. Para esto, se realizaron seis instancias comparando los resultados de las funciones objetivo y variando el número de operaciones de cada una de ellas. Esto con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del modelo en este tipo de situaciones. Luego se procedió a comparar los resultados de la meta-heurística con los de la simulación en ocho diferentes instancias. Variando el número de Jobs de cada una de ellas para evaluar la reactividad del modelo. Adicionalmente, se realizaron treinta réplicas en cada una de las instancias anteriormente mencionadas. Para cada una de ellas se cambió únicamente la orden de pedido para verificar la propuesta del modelo reactivo en el caso de estudio. Por último, se compararon los resultados del modelo predictivo-reactivo incluyendo las perturbaciones previamente establecidas.

6.3.4 Validación de la propuesta frente al método exacto de solución

Se comparó la propuesta del modelo predictivo-reactivo frente al método exacto, minimizando la tardanza ponderada (suma de las fechas de finalización de los Jobs multiplicada por sus importancias). En la siguiente figura se encuentran los resultados para cada instancia. (Anexo 9)

Figura 13. Validación de la técnica del modelo predictivo - reactivo



Fuente: Los Autores

6.3.5 Resultados del protocolo de experimentación

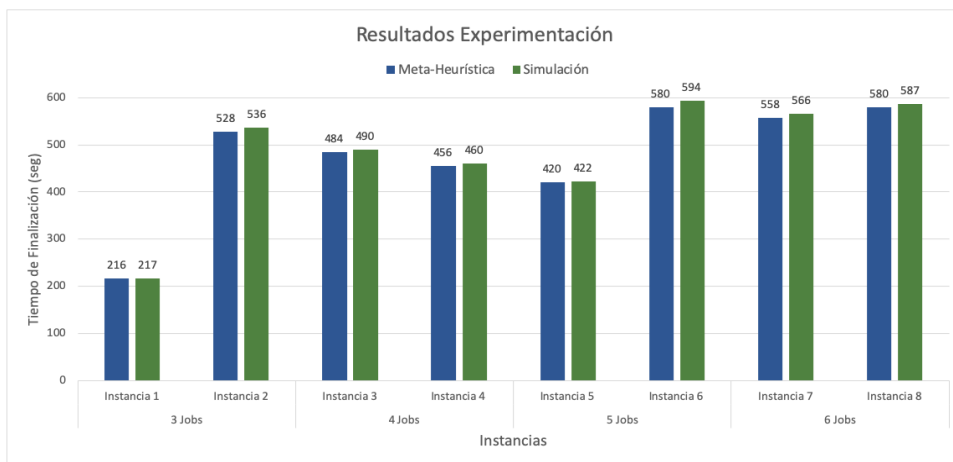
Se encontró que la máxima variación de la función objetivo entre ambos resultados fue del 12.1% para la instancia número uno. Lo anterior refleja un buen resultado en cuanto al funcionamiento del modelo predictivo, lo cual asegura que está encontrando resultados cercanos al óptimo para las instancias realizadas.

7. Resultados

7.1 Comparación del modelo predictivo frente el modelo reactivo.

Se procedió a comparar los resultados de la meta-heurística con los de la simulación en 8 diferentes instancias variando el número de Jobs de cada una de ellas para evaluar el comportamiento de la simulación. En la figura 14 se puede observar dicha validación.

Figura 14. Comparación de la Meta-Heurística con la Simulación



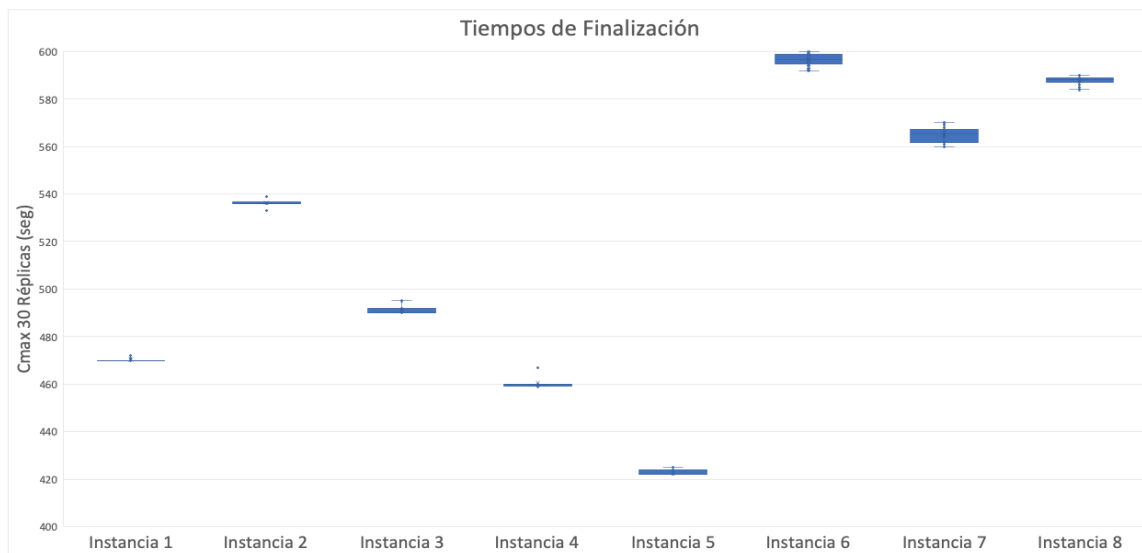
Fuente: Los Autores

Se puede evidenciar que en todas las instancias realizadas, los resultados para ambas metodologías son cercanas. De hecho la máxima variación de los resultados fue de 2.41% para la instancia 6 con 5 Jobs. La diferencia de los datos se debe principalmente a que el modelo matemático no considera las interferencias entre los vehículos. Así mismo, en la meta-heurística los tiempos de procesamiento son establecidos basándose en la ruta más corta, mientras que en la simulación los tiempos de procesamiento se afectan debido a la coordinación entre agentes, los tiempos de las interferencias y la escogencia tanto de la operación como de la ruta de cada AGV.

7.2 Replicas modelo predictivo-reactivo

Para validar los resultados se realizaron treinta réplicas para cada una de las instancias anteriormente mencionadas. En cada una de ellas se cambió únicamente la orden de pedido para verificar la propuesta del modelo virtual en el caso de estudio. En la figura 15 se puede evidenciar un diagrama de velas que muestra el Cmax para cada réplica. (Anexo 10)

Figura 15. Diagrama de velas de replicas sin perturbaciones



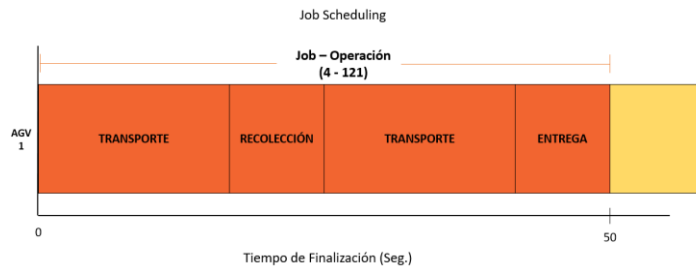
Fuente: Los Autores

La anterior figura demuestra que la variación de los resultados de la simulación es proporcional al número de Jobs que se utilicen en la orden de pedido. La variación de los resultados de las réplicas depende de la capacidad de los núcleos de procesamiento del computador y la forma en que el aplicativo Netlogo les pregunta a los agentes los comandos del código, la cual varía dependiendo de cada corrida.

7.3 Sin perturbaciones

Los resultados para la situación del caso de estudio sin perturbaciones se pueden observar mediante los diagramas de Gantt de las figuras 17 y 18. Estas muestran la programación de las operaciones en los AGVs en donde cada operación está representada por una casilla. Cada una de estas tiene un color que representa el Job al cual está asignado. Del mismo modo, cada operación esta conformada por cuatro etapas como se evidencia en la siguiente figura.

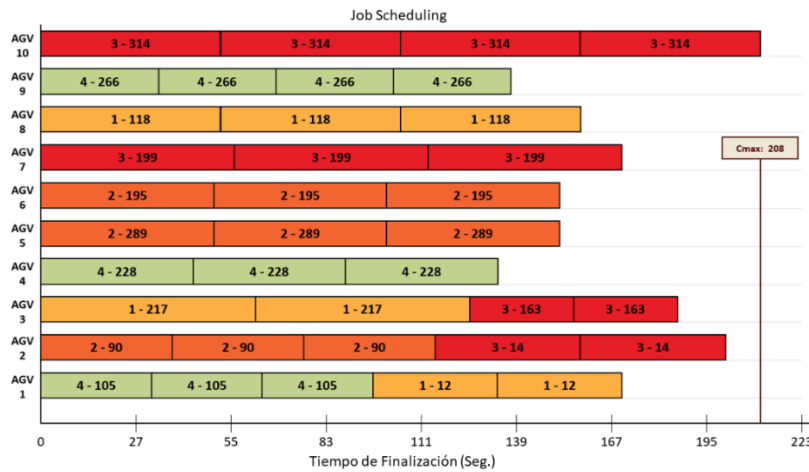
Figura 16 – Representación gráfica de una operación



Fuente: Los Autores

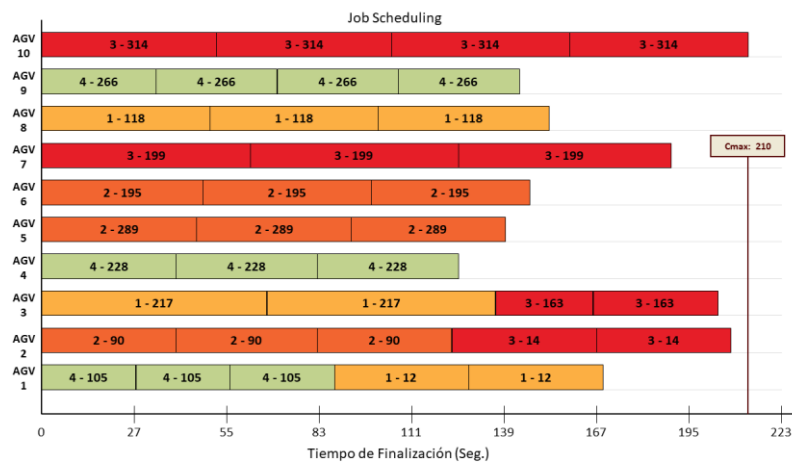
En los diagramas de Gantt, se observa una demarcación del Cmax el cual es un indicador de eficiencia del sistema y determina el intervalo de tiempo entre el inicio del procesamiento de los Jobs y el tiempo de finalización del último. Se puede evidenciar que el indicador de eficiencia del sistema para el caso de estudio por medio de la técnica de solución fue de 208 segundos (3 min y 28 seg.) y para la simulación sin perturbaciones fue de 210 segundos (3 min y 30 seg.).

Figura 17. Resultados Asignación Modelo Predictivo



Fuente: Los Autores

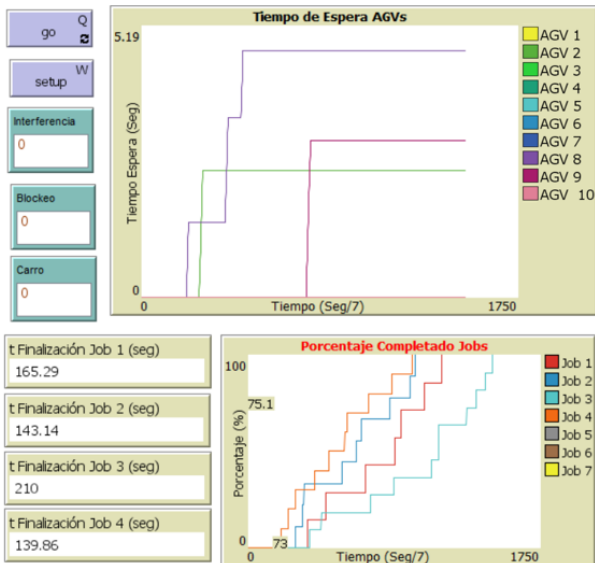
Figura 18. Resultados Asignación Modelo Predictivo-Reactivo



Fuente: Los Autores

En la figura 19 se puede observar el tiempo en espera acumulado de cada AGV, el tiempo de finalización y el porcentaje de cumplimiento de cada Job a través del tiempo transcurrido en la simulación. Las gráficas se van actualizando a medida que transcurre la simulación, permitiendo un análisis en tiempo real de la eficiencia del sistema. Del mismo modo se muestra que el Job 4 fue el primero en terminar y el Job 3 el último, corroborando la figura de Gantt de la figura 18. Por último se muestran los tiempos de espera de cada AGV, en donde el AGV número 8 fue el que más se detuvo con 5.2 segundos de espera.

Figura 19. Resultados modelo Predictivo-Reactivo caso de estudio



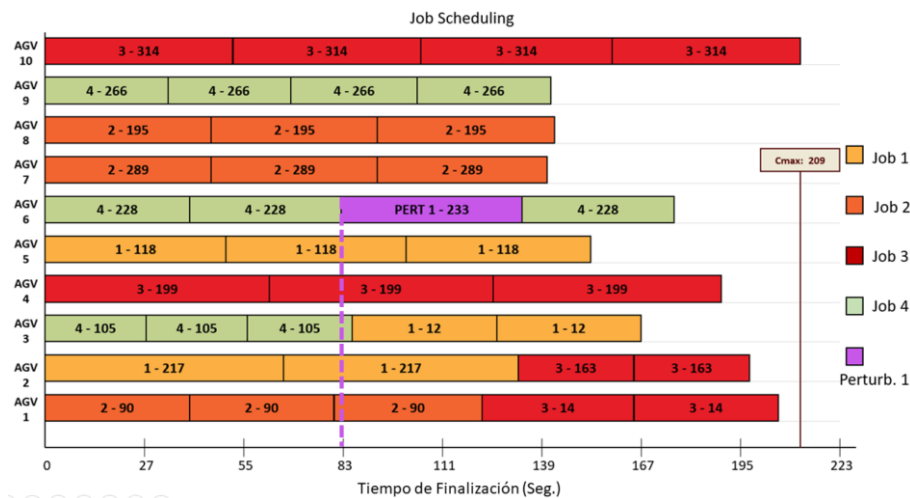
Fuente: Los Autores

7.4 Perturbaciones

7.4.1 Primera perturbación

Se simuló el caso de estudio en conjunto con una perturbación tipo 1 para la primera situación. Se solicitó con urgencia el producto 233 alrededor del segundo 83. Los resultados se muestran en la figura 20.

Figura 20. Resultados modelo Predictivo-Reactivo con Operación Adicional



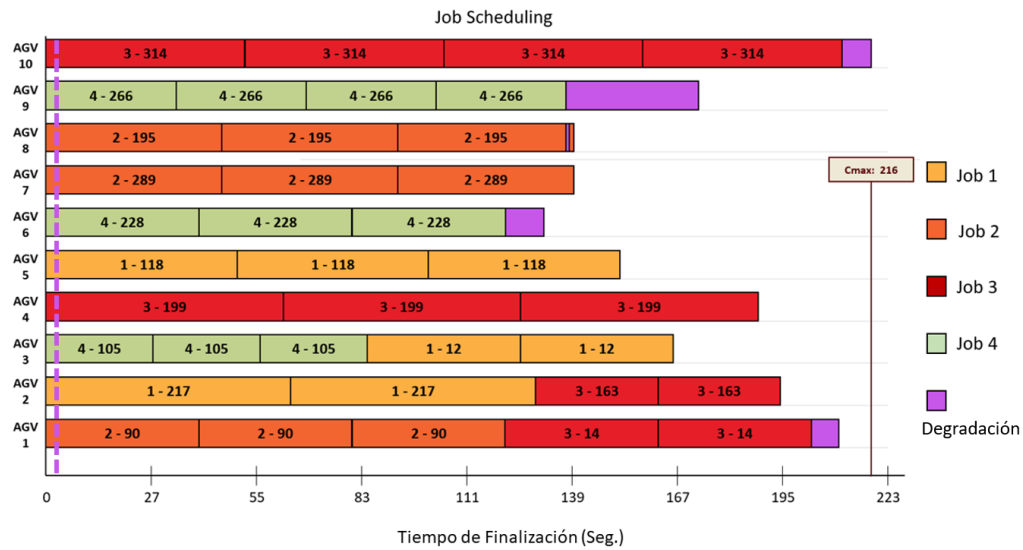
Fuente: Los Autores

En este caso el primer AGV en estar disponible fue el número 6, el cual atendió la solicitud antes de terminar sus asignaciones actuales. El Cmax de la orden de pedido no se vio afectado por esta perturbación puesto que el AGV 6 alcanzó a recogerla sin sobrepasarse del Cmax normal.

7.4.2 Segunda perturbación

Se simuló el caso de estudio junto con la segunda perturbación la cual consiste en el bloqueo de la posición de un producto evitando el paso de los AGVs sobre este. Para este caso se bloqueó el producto 185 en el segundo 2. En la figura 21 se comparan los resultados de la figura de Gantt sin perturbaciones con el de la perturbación mencionada.

Figura 21. Resultados modelo Predictivo-Reactivo con Bloqueo de Celda de Producto



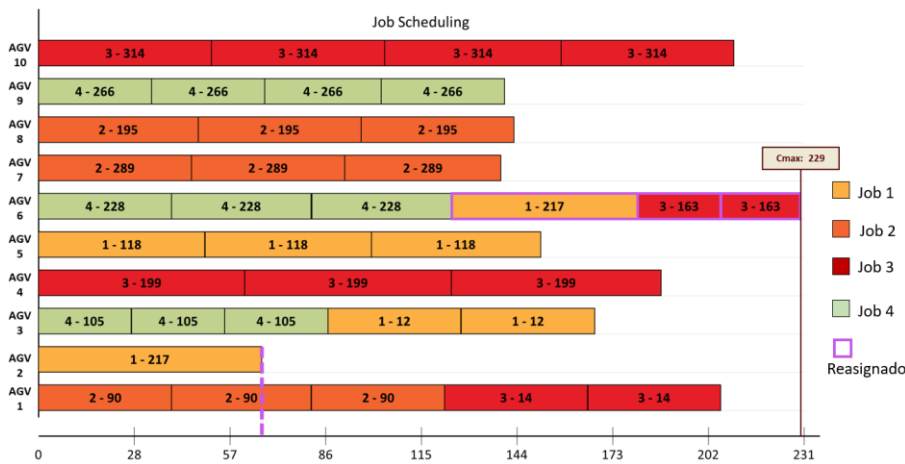
Fuente: Los Autores

En este caso el AGV más afectado fue el número 9 con 30 segundos de más que el del caso de comparación. Esto se debe a que la importancia del Job llevado por el AGV 9 es menor que la del 10, por lo cual, el primero se veía obligado a esperar a que el otro saliera de su ruta. Por otro lado, el Cmax aumentó en 6 segundos para esta perturbación puesto que el AGV 10 era el que determinaba el indicador. Además el AGV número 8 terminó la recolección antes del tiempo que le tomó hacerlo en el caso sin perturbaciones.

7.4.3 Tercera perturbación

Para la última situación se simuló la tercera perturbación que consiste en el daño espontáneo del AGV 2 alrededor del segundo 74 en la posición del producto número 25. Los resultados se encuentran en la Figura 22.

Figura 22. Resultados modelo Predictivo-Reactivo con Reasignación de Operaciones



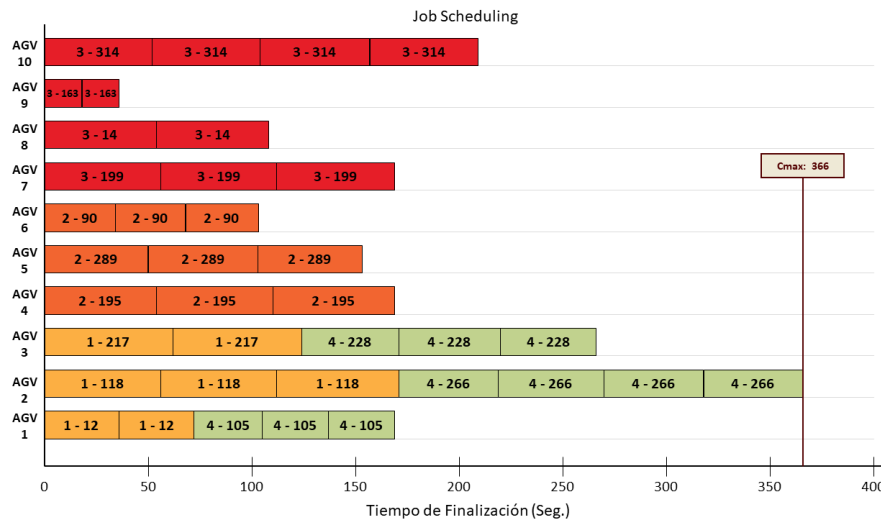
Fuente: Los Autores

Como se puede evidenciar, los productos que el AGV 2 no había entregado al momento del daño fueron reasignados al primer AGV en terminar sus operaciones. En este caso el AGV número 6 fue el encargado de completar dichas tareas. La perturbación se evidencia con la línea punteada de color fucsia al final de las asignaciones del AGV 2. Esta perturbación es la que más afecta el indicador makespan con una diferencia de 20 segundos requeridos para completar la recolección de los productos faltantes.

7.5 Impacto económico

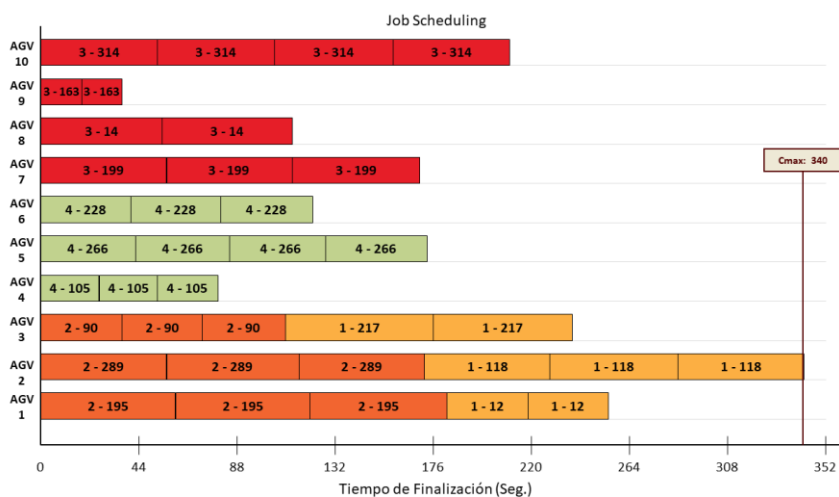
Dado que este caso es netamente teórico, la medición de su impacto se realiza mediante la comparación con algunas de las reglas de inventario que en la literatura son reconocidas por sus acertados indicadores de eficiencia. Para este análisis se escogieron las reglas PEPS (primero en entrar y primero en salir) o más conocida como FIFO, UEPS (ultimo en entrar y primero en salir) o LIFO y la del Due Date más próximo. Para esto se realizó un diagrama de Gantt para cada una de estas reglas de despacho en las figuras 23, 24 y 25.

Figura 23. Resultados con Regla FIFO



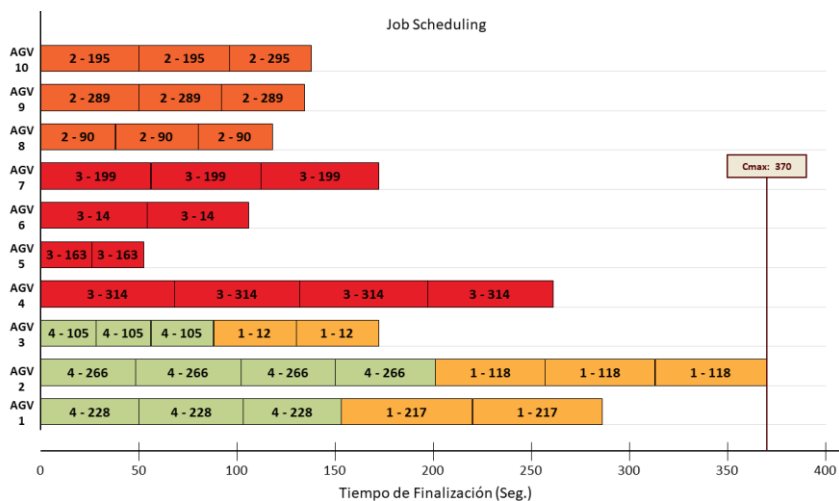
Fuente: Los Autores

Figura 24. Resultados con Regla Due Date



Fuente: Los Autores

Figura 25. Resultados con Regla LIFO



Fuente: Los Autores

Tabla 2. Resultados indicadores eficiencia

Soluciones	Makespan (Seg.)	Utilización de recursos (%)	Inactividad de recursos (%)
Predictivo-reactivo	210	79.51	20.49
FIFO	366	47.71	52.29
Due Date	340	50.85	49.15
LIFO	370	48.86	51.14

Fuente: Los Autores

Como se puede observar en la tabla 2, el método predictivo-reactivo de este trabajo obtuvo resultados considerablemente mejores en relación con las reglas de inventario analizadas. En cuanto al makespan, el modelo planteado logró el menor indicador con un tiempo de 210 segundos, mientras que las reglas FIFO, Due Date y LIFO obtuvieron 366, 340 y 370 segundos respectivamente. Adicionalmente, en términos de eficiencia, el modelo planteado también se destacó frente a las demás reglas. El indicador porcentual de utilización de recursos para el modelo fue de 79.51% frente a un 47.71% para la regla FIFO,

50.85% para el Due Date y 48.86% para la regla LIFO. Esto indica que en el modelo propuesto la inactividad de los AGVs correspondió únicamente al 20.49% del tiempo total, aproximadamente un 30% menor al de las demás reglas. Finalmente, para calcular el impacto económico de la propuesta planteada, se le otorgó un costo de un peso por segundo (1\$/Seg.) a la diferencia entre los tiempos de finalización con respecto a las demás reglas. El costo total de la propuesta planteada fue de \$210, para la FIFO fue de \$366, para el Due Date \$340 y para la regla LIFO \$370. Esto significa que el costo de procesamiento del modelo predictivo-reactivo es más económico en un 42.62% frente al FIFO, un 38.24% con respecto al Due Date y un 43.24% a diferencia de la regla LIFO.

8. Conclusiones

El resultado de este trabajo propone un modelo predictivo-reactivo para simular el control de un sistema de recolección de producto en bodega, mejorando la eficiencia y reactividad del proceso. La eficiencia e implementación de estos sistemas crea una ventaja operativa en las empresas permitiéndoles mejorar sus flujos logísticos, el manejo de sus inventarios y la satisfacción de sus clientes. Estos factores son fundamentales para destacarse en los entornos altamente competitivos.

Se definió un caso de estudio teórico con la finalidad de simular el comportamiento de un sistema AS/RS. Para esto se definieron los parámetros requeridos con el fin que la simulación lograra asemejarse a la realidad de dichos procesos en el sector logístico. Además, se compararon las características de los diferentes tipos de arquitectura de control y se optó por escoger una arquitectura híbrida para controlar el modelo predictivo-reactivo. Esto con el fin de garantizar flexibilidad y una capacidad de respuesta suficientemente rápida para responder eficientemente a disrupciones dentro del sistema.

Al comparar los resultados entre el modelo predictivo-reactivo y el método exacto se encontró que la máxima variación de la función objetivo entre ambos resultados fue del 12.1%. Lo anterior refleja un buen resultado en cuanto al funcionamiento del modelo planteado asegurando que se encuentran resultados cercanos al óptimo para las instancias realizadas y comprobando que el protocolo de comunicación utilizado para los agentes es capaz de minimizar el tiempo de tratamiento de los productos en bodega. Así mismo, los resultados del componente predictivo son comparables con los del componente reactivo, debido a que la máxima variación de estos resultados fue del 2.41%, demostrando que el sistema tiene una adecuada comunicación y negociación entre los agentes

La pregunta de investigación planteada “*¿Cómo se puede mejorar la eficiencia y la reactividad de los tiempos de recolección en el proceso de manejo de inventarios en un sistema AS/RS?*” se logró resolver puesto que los resultados del modelo predictivo-reactivo mostraron que el sistema cuenta con niveles altos de reactividad y que este es capaz de responder ágilmente a los tres tipos de perturbaciones utilizadas comúnmente presentadas en estos tipos de sistemas.

Se encontró que un modelo predictivo – reactivo es una de las configuraciones de control para un sistema AS/RS que permite una mayor eficiencia en la recolección de productos ya que se evaluó el modelo propuesto con tres diferentes reglas de despacho de inventarios para medir el impacto de eficiencia y económico. Se encontró que en todos los casos el modelo planteado disminuye tanto los tiempos de recolección como el porcentaje de inactividad de los recursos. Del mismo modo, se pudo observar un impacto positivo en el ámbito económico debido a reducciones en los tiempos de almacenamiento.

Además, a la sub pregunta ¿Cómo podría maximizarse la utilización del sistema AS/RS y aprovechar el funcionamiento y los beneficios ofrecidos por el sistema? Para resolver esta pregunta se propone un sistema capaz de optimizar tanto la eficiencia como la reactividad. Por un lado, al utilizar herramientas de optimización como la meta-

heurística, se logra maximizar la utilización AGVs, aumentar el throughput y minimizar la tardanza ponderada de los tiempos de recolección. Por otro lado, se puede observar que el sistema responde adecuadamente a los tres tipos de perturbaciones planteados reflejando una gran capacidad de respuesta a eventos no esperados, lo cual es uno de los beneficios más importantes de este tipo de modelos.

Para investigaciones futuras se recomienda que en la construcción de una arquitectura de control se prueben diferentes funciones objetivo tanto a nivel global como a nivel local. Esto con la finalidad de validar y comparar la eficiencia de la solución planteada. En cuanto el modelo predictivo, se sugiere incluir la posibilidad de dividir las operaciones en los AGVs mejorando la eficiencia del modelo. Del mismo modo, es recomendable programar diferentes meta-heurísticas con el propósito de diversificar y profundizar la solución. Así mismo, se podría evaluar la posibilidad de modelar el componente reactivo permitiendo agregar una orden de pedido en tiempo real sin la necesidad de detener la simulación. De igual manera se podría realizar un diseño de experimentos cambiando las variables del modelo predictivo-reactivo con el propósito de validar cómo afectan el resultado.

Para acercarse aún más a la realidad de los AS/RS, debería incluirse el proceso de suministro de productos en bodega, teniendo en cuenta aspectos como el nivel del stock de seguridad, la ubicación más eficiente de los productos y la asignación respectiva entre los AGVs. Adicionalmente, se recomienda utilizar un caso de la vida real para contar con datos que permitan medir la viabilidad de implementar un sistema AS/RS en un ámbito financiero. Finalmente, se considera relevante el diseño del prototipo de los AGVs para evidenciar el comportamiento físico de estos sistemas.

9. Referencias

- Autry, C. W., Griffis, S. E., Goldsby, T. J., & Bobbitt, L. M. (2005). Warehouse Management Systems: Resource Commitment, Capabilities, and Organizational Performance. *Journal of Business Logistics*, 26(2), 165–182.
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 600–607.
- Baker P., Halim Z. (2007) An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 12 Issue: 2, pp.129-138.
- Barcnji, A. V., Barenji, R. V., & Sefidgari, B. L. (2013). An RFID-enabled distributed control and monitoring system for a manufacturing system. In *2013 3rd International Conference on Innovative Computing Technology, INTECH 2013*(pp. 498–503). IEEE.
- Basile, F., Chiacchio, P., & Coppola, J. (2016). A Colored Timed Petri Net model for a cyber-physical view of automated warehouse systems. In *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*(Vol. 2016–Novem, pp. 1–8). IEEE.
- Bessenouci, H. N., Sari, Z., & Ghomri, L. (2012). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1157–1166.
- Bravo, C., Castro, J. A., Cerrada, M., & Echeverría, F. R. (2004). Design of an industrial automation architecture based on multi-agents systems. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*(Vol. 16, pp. 12–16). Elsevier.
- Brezovnik, S., Gotlih, J., Balič, J., Gotlih, K., & Brezočnik, M. (2015). Optimization of an automated storage and retrieval systems by swarm intelligence. In *Procedia Engineering*(Vol. 100, pp. 1309)
- Cardin, O., Trentesaux, D., Thomas A., Castagna, P., Berger T., El-Haouzi, H. (2017). Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, vol. 28, issue 7, No 2, 1503-1517.
- Cachon, G. P., & Fisher, M. (2000). Supply Chain Inventory Management and the Value of Shared Information. *Management Science*, 46(8), 1032–1048.
- Chetty, O. V. K., & Reddy, M. S. (2003). Genetic algorithms for studies on AS/RS integrated with machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11–12), 932–940.
- Colla, V., & Gianluca, N. (2010). Modelling and Simulation of an Automated Warehouse for the Comparison of Storage Strategies. *Modelling and Simulation Optimization*.
- D'Andrea, R., Wurman, P. (2008). Future challenges of coordinating hundreds of autonomous vehicles in distribution facilities. 2008 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (pp. 80-83). IEEE
- de Koster, R., & van der Meer, J. R. (1998). Centralized versus Decentralized Control of Internal Transport, a Case Study (pp. 403–420). Springer, Berlin, Heidelberg
- Dilts, D. M., Boyd, N. P., & Whorm, H. H. (1991). The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 10(1), 79–93.
- Giret, A., & Botti, V. (2009). Engineering Holonic Manufacturing Systems. *Computers in Industry*, 60(6)
- Gunasekaran, A., Lai, K. hung, & Edwin Cheng, T. C. (2008). Responsive supply chain: A competitive strategy in a networked economy. *Omega*, 36(4), 549–564.
- Gunasekaran, A., & Ngai, E. W. T. (2012, February 1). The future of operations management: An outlook and analysis. *International Journal of Production Economics*. Elsevier.

- Henn, S., Wascher, G. (2010). Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. *Otto von Guericke University Magdeburg, Faculty of Economics and Management*.
- Jimenez, J. F., Bekrar, A., Zambrano-Rey, G., Trentesaux, D., & Leitão, P. (2017). Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. *International Journal of Production Research*, 55(15), 4229–4247.
- Kim, B.-I., Heragu, S. S., Graves, Robert J., & Onge, A. St. (2003). A Hybrid Scheduling and control system Architecture for Warehouse Management. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 19(6), 991–1001.
- Kouloughli, S, Sari, Z. (2015). Multi- aisle AS/RS dimensions optimization for cycle time minimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 79.
- Kremljak, Z., & Hocevar, M. (2014). Restructuring a Production Company Into a Production Logistics Centre, 071–086.
- Kulwicz, R. A., American Society of Mechanical Engineers., & International Material Management Society. (1985). *Materials handling handbook*. Wiley.
- Laguna, M., Taillard, E., & de Werra, D. (1993). *Tabu search*. F. Glover (Ed.). Basel: Baltzer.
- Leitão, P., Restivo F. (2006). ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*. 57. 121-130.
- Li, W., & Zhang, X. (2014). Simulation of the smart grid communications: Challenges, techniques, and future trends. *Computers and Electrical Engineering*, 40(1), 270–288.
- Manca, S., Fagiolini, A., & Pallottino, L. (2011). Decentralized coordination system for multiple AGVs in a structured environment. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*(Vol. 18, pp. 6005–6010).
- Mařík, V., & McFarlane, D. (2005). Industrial adoption of agent-based technologies. *IEEE Intelligent Systems*.
- Meredith, J. (1987). The strategic advantages of new manufacturing technologies for small firms. *Strategic Management Journal*, 8(3), 249–258.
- Mutsaers, E., van der Zee, H., Giertz, H. (1998). The evolution of information technology. *Information management & computer security*, Vol. 6 Issue:3, pp.115-126.
- Müller, E. R., Carlson, R. C., & Junior, W. K. (2016). Intersection control for automated vehicles with MILP. *IFAC-PapersOnLine*, 49(3), 37–42.
- Odoom, C. K. (2012). Logistics and Supply Chain Management in the Hotel Industry : Impact on Hotel Performance In Service Delivery. *University of Nevada Las Vegas*, 1–48.
- Pappas, G. J., Tomlin, C., Sastry, S. S. (1996). Conflict resolution for multi-agent hybrid systems. *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*.
- Pohjalainen, A. (2015). Control Policies of an Automated Storage and Retrieval System. *Aalto University School of electrical engineering*.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362.
- Singh, D., & Verma, A. (2018). Inventory Management in Supply Chain. In *Materials Today: Proceedings*(Vol. 5, pp. 3867–3872).
- Tracey, M., Jeen-Su., Vonderembse, M (2005). The impact of supply-chain management capabilities on business performance. *Supply chain management: An international Journal*. 10 (3), 179 -19.
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), 971–978.
- van Belleghem, S. (2016). How the digital world is shaping the modern consumer. *Strategic Direction*, 32(5), 1–2.

- Varila, M., Seppänen, M., & Heinonen, E. (2005). Effects of Automation on Cost Accounting: A Case Study in Warehouse Logistics. *Proceedings of 7th Conference on Manufacturing Accounting Research*, (JANUARY 2005), 1–15.
- Veliyath, R., & Fitzgerald, E. (2000). Firm Capabilities, Business Strategies, Customer Preferences, And Hypercompetitive Arenas: The Sustainability Of Competitive Advantages With Implications For Firm Competitiveness. *Competitiveness Review*, 10(1), 56–82.
- Wan, Y. X., Luo, J. L., Zhang, Q., Wu, W. M., Huang, Y. S., & Zhou, M. C. (2018). Controller Design for Avoiding Collisions in Automated Guided Vehicle Systems via Labeled Petri Nets. *IFAC-PapersOnLine*, 51(7), 139–144.
- Wang, J., Zhang, N., Qinggang H. (2009). Application of Automated Warehouse Logistics in Manufacturing Industry. 2009 *Second ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*.
- Wauters, T., Villa, F., Christiaens, J., Alvarez-Valdes, R., & Vanden Berghe, G. (2016). A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 325–337.
- Weiss, G., Braubach, L., & Paolo, G. (1999). Intelligent Agents. *The Intelligent Agents Perspective on Engineering*, 360–372.
- Weyns, D., Helleboogh, A., Holvoet, T. (2009). How to get multi-agent systems accepted in industry?. *IJAOSE*. 3. 383-390.
- Wu, B., Xi, L., & Zhou, B. (2006). Service-oriented software architecture for flexible manufacturing control system. 2006 *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 425–430.