

**Optimización de la Programación de Proyectos de Construcción Naval
con Restricciones de Recursos mediante Algoritmos Genéticos y Lógica
Difusa**

**Optimization of Shipbuilding Project Scheduling with Resource
Constraints Using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic**

AUTORES

Gaibor Vallejo Lady María

Universidad Agraria del Ecuador
Ecuador – Guayaquil

lgaibor@uagraria.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3552-6128>

Carrasco Schuldt Ángel Santiago

Universidad Agraria del Ecuador
Ecuador – Guayaquil

acarrasco@uagraria.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2572-9829>

Como citar:	Fecha de recepción:2023-01-15 Fecha de aceptación: 2023-02-17 Fecha de publicación: 2023-03-15
-------------	--

Resumen

Este estudio examina la aplicación de los Algoritmos Genéticos (AG) en la optimización de los procesos de producción en la construcción naval, considerando entornos caracterizados por altos niveles de incertidumbre. La investigación aborda dos aspectos fundamentales: en primer lugar, la integración del problema de programación de proyectos con restricciones de recursos (RCPSP, por sus siglas en inglés) mediante AG, en combinación con técnicas de gestión de la incertidumbre aplicadas a la producción naval; en segundo lugar, el análisis de soluciones óptimas de Pareto generadas por los algoritmos genéticos para alcanzar una programación eficiente en dicho contexto.

El marco metodológico propuesto tiene como objetivo minimizar el tiempo total de finalización del proyecto y maximizar la utilización de los recursos disponibles, mediante la incorporación de modelos probabilísticos y análisis de escenarios que permitan abordar eficazmente las incertidumbres presentes en el entorno de producción. Además, el estudio se centra en la evaluación de los compromisos (trade-offs) entre el tiempo de finalización del proyecto, la asignación de recursos y los costos, a través del análisis de soluciones de Pareto óptimas, utilizando técnicas de visualización y análisis de sensibilidad para respaldar la toma de decisiones estratégicas.

Los resultados obtenidos contribuyen a mejorar la eficiencia en la producción de la construcción naval, al proporcionar un enfoque integral que permite una gestión más efectiva de la incertidumbre, una mejor asignación de recursos y una reducción significativa en la duración de los proyectos, mediante la integración del enfoque RCPSP con algoritmos genéticos y técnicas avanzadas de análisis bajo incertidumbre.

Palabras clave: Algoritmos Genéticos (AG), Lógica Difusa, Optimización Multiobjetivo, Análisis de Sensibilidad, Toma de Decisiones

Abstract

This study examines the application of Genetic Algorithms (GA) in optimizing production processes in shipbuilding, considering environments characterized by high levels of uncertainty. The research addresses two fundamental aspects: first, the integration of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) using GA in combination with uncertainty management techniques applied to shipbuilding production; and second, the analysis of Pareto optimal solutions generated by genetic algorithms to achieve efficient scheduling in this context.

The proposed methodological framework aims to minimize the total project completion time and maximize the utilization of available resources by incorporating probabilistic models and scenario analysis to effectively address uncertainties present in the production environment. Furthermore, the study focuses on evaluating trade-offs between project completion time, resource allocation, and costs through the analysis of Pareto optimal solutions, using visualization techniques and sensitivity analysis to support strategic decision-making.

The results contribute to improving efficiency in shipbuilding production by providing a comprehensive approach that enables more effective uncertainty management, better resource allocation, and a significant reduction in project duration through the integration of the RCPSP approach with genetic algorithms and advanced uncertainty analysis techniques.

Keywords: Genetic Algorithms (GA), Fuzzy Logic, Multi-Objective Optimization, Sensitivity Analysis, Decision-Making

Introducción

La industria de la construcción naval, cuyo valor de mercado global se estima en 145,67 mil millones de dólares para el año 2023, constituye uno de los sectores industriales más intensivos en capital y de mayor peso dentro de la economía global, generando amplias oportunidades de empleo. En los últimos años, la oferta mundial de buques mercantes ha estado dominada por China, la República de Corea y Japón, que en conjunto representan el 94 % del mercado mundial de la construcción naval (United Nations, 2022)

Se trata de un sector altamente complejo, caracterizado por una cadena de valor multifacética que abarca el diseño, la construcción y la instalación de diversos tipos de embarcaciones (Lee et al., 2020) La producción en un astillero representa uno de los sistemas de manufactura más intrincados y sofisticados (Okubo & Mitsuyuki, 2022). La competitividad en esta industria es igualmente multifactorial, involucrando costos de construcción, plazos de entrega, calidad del buque, servicios postventa y condiciones de financiamiento ((Ecorys, 2011) (Strandenes & Jiang, 2011)). Además, presenta estructuras organizativas complejas, tiempos de entrega prolongados y una alta demanda de recursos diversos (Liu et al., 2011).

La industria moderna de la construcción naval enfrenta de manera continua nuevos desafíos y exigencias del mercado, lo que obliga a una mejora constante de los procesos de fabricación para mantener la eficiencia ante numerosas incertidumbres operativas. En consecuencia, los astilleros se ven obligados a desarrollar e implementar nuevas tecnologías y metodologías de producción que permitan planificar y programar eficazmente procesos altamente complejos (Hadžić, 2019).

La construcción naval opera bajo un modelo de producción bajo pedido, conocido como *Engineering-to-Order* (ETO), lo que la convierte en un claro ejemplo de industria orientada a proyectos. Estos proyectos poseen características distintivas, tales como estructuras de producto complejas, múltiples etapas de fabricación, ciclos de producción prolongados, plazos ajustados, trabajos intermitentes, ejecución simultánea de varios proyectos, y cambios frecuentes en los diseños de ingeniería (Mao et al., 2020) En este contexto, la planificación de la producción adquiere un papel fundamental, ya que impacta directamente en los costos y la duración del proyecto. Debido a la limitada disponibilidad de tiempo para comparar múltiples planes, deben considerarse las restricciones de los recursos productivos (Okubo & Mitsuyuki, 2022).

El proceso productivo en la construcción naval es largo y complejo, por lo que requiere una planificación rigurosa y decisiones oportunas. Este tipo de procesos intermitentes involucra numerosas actividades de trabajo con duraciones variables (Ljubenkov et al., 2008) 2008). El desarrollo tecnológico ha influido significativamente en dichos procesos, modificando sus dinámicas (Mao et al., 2020) El principal reto radica en aumentar la

productividad de los astilleros mediante el desarrollo de nuevas tecnologías de producción y su adecuada gestión (Lee et al., 2020)

La mano de obra representa un factor clave en la productividad del sector, lo que dificulta la estimación precisa de cargas de trabajo y cronogramas, especialmente cuando se considera la asignación de trabajadores. En industrias ETO como esta, los cambios de diseño y programación ocurren con frecuencia durante la fase de producción, y la gestión de planes de largo plazo implica múltiples desafíos. Los responsables de los procesos deben supervisar cada tarea conforme a los cronogramas establecidos, lo que complica la coordinación entre procesos y eleva el riesgo de tomar decisiones ineficientes.

En entornos de múltiples proyectos, todas las tareas de construcción se integran en un plan maestro a nivel del astillero, que evalúa las capacidades y recursos disponibles a lo largo del horizonte de planificación. Dado que todos los buques se construyen con recursos compartidos, es imprescindible planificar el uso agregado de los recursos entre todos los proyectos, con el fin de generar un cronograma fiable para cada fase de producción y para el proyecto en su conjunto (Liu et al., 2020) En entornos de manufactura distribuida, llevar a cabo un proyecto de construcción naval de esta magnitud requiere cooperación entre múltiples organizaciones. Esta paralelización multiproyecto y la distribución del proceso productivo introducen numerosos desafíos de coordinación, lo que aumenta exponencialmente la complejidad del control del proyecto (Mao et al., 2020)

En la mayoría de las empresas del sector, la ejecución de los proyectos suele ser ineficiente, debido a la falta de coordinación, subutilización de recursos, sobrecostos y retrasos significativos, lo que afecta gravemente su reputación en el mercado. La raíz de estos problemas de desempeño radica en la ausencia de métodos efectivos de programación de proyectos que se alineen con las características actuales de la industria, especialmente en contextos de manufactura distribuida, decisiones colaborativas y planificación dinámica (Mao et al., 2020) Para garantizar su competitividad y sostenibilidad, los astilleros deben monitorear de forma continua su productividad, eficiencia y calidad, al mismo tiempo que reducen los costos generales de producción (Rubeša et al., 2023)

Material y métodos

Material

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon los siguientes insumos y recursos técnicos:

Datos del entorno industrial:

Se modeló el proceso de construcción de bloques de dos buques (denominados A y B) en un astillero real, considerando actividades específicas, relaciones de precedencia y requerimientos de recursos. El análisis se centró en cinco estaciones de trabajo representativas del proceso de producción naval:

- WS 02: Corte de planchas
- WS 04: Prefabricación de componentes
- WS 05: Fabricación de paneles
- WS 09: Producción de bloques estructurales
- WS 12: Deslizadero para ensamblaje final y botadura

Escenarios de capacidad operativa:

Se definieron cuatro niveles progresivamente decrecientes de capacidad de mano de obra (en personas/día): 645, 570, 495 y 420, con el objetivo de simular restricciones reales en el suministro de recursos humanos disponibles en el astillero.

Escenarios de programación:

Se establecieron ocho estrategias de planificación diferenciadas (etiquetadas como A a H), las cuales incluyeron ajustes en la asignación de recursos a actividades críticas y modificaciones en estaciones clave del proceso productivo. Estas combinaciones generaron un total de 32 escenarios integrados (8 estrategias \times 4 niveles de capacidad).

Modelado de incertidumbre en duraciones:

Las duraciones de las actividades fueron modeladas mediante números difusos trapecoidales, con el propósito de representar la incertidumbre inherente a los entornos productivos del sector naval. Posteriormente, se aplicó un método de desfuzificación por centroide para transformar estas duraciones en valores deterministas, necesarios para el tratamiento computacional del problema.

Herramienta computacional:

La simulación y resolución del problema de programación de proyectos con restricciones

de recursos (RCPSP) se llevó a cabo mediante el software Genetic Algorithm Project Scheduler, que permite implementar algoritmos genéticos personalizados para este tipo de problemas combinatorios complejos.

Métodos

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación se desarrolló en cinco etapas principales, descritas a continuación:

Modelado del Problema RCPSP

Se formuló el Problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos (RCPSP), considerando múltiples actividades interrelacionadas, restricciones de precedencia, utilización de recursos renovables y modos alternativos de ejecución. El modelo fue orientado a la minimización del tiempo total de finalización del proyecto (makespan), manteniendo la viabilidad de las asignaciones de recursos y el cumplimiento de las relaciones de precedencia.

Transformación de Duraciones Difusas a Determinísticas

Las duraciones de las actividades fueron inicialmente representadas mediante números trapezoidales difusos, a fin de incorporar la incertidumbre característica de los entornos productivos navales. Posteriormente, se aplicó el método de desfuzificación por centroide propuesto por (Gong et al., 2021) con el propósito de obtener valores deterministas que pudieran ser utilizados en los algoritmos de optimización.

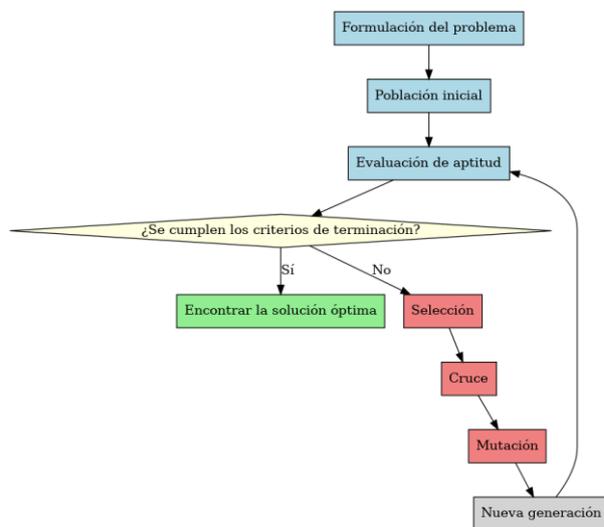
Implementación del Algoritmo Genético (GA)

Para resolver el RCPSP se implementó un algoritmo genético como técnica metaheurística. Su configuración se detalló de la siguiente manera:

- **Codificación cromosómica:** Se utilizó una representación basada en listas de actividades, donde cada gen corresponde a una actividad del proyecto y su posición refleja la prioridad de ejecución.
- **Generación de población inicial:** Se generaron soluciones aleatorias válidas, respetando las restricciones de precedencia entre actividades.
- **Operadores genéticos aplicados:**

- Cruce: tipo secuencial de un punto.
- Mutación: mutación puntual simple.
- Selección: método elitista para preservar los individuos con mejor desempeño en cada generación.
- **Función de aptitud:** Se utilizó como criterio de evaluación el makespan del proyecto, penalizando las soluciones que excedieran las restricciones de recursos.
- **Parámetros del algoritmo:**
 - Tamaño de población: entre 100 y 200 individuos.
 - Número de generaciones: 1000.
 - Tasa de mutación: entre 50 % y 70 %.
 - Tasa de selección: entre 10 % y 20 %.

Figura 1.
Diagrama GA



Nota: diagrama presentado ilustra el flujo general del funcionamiento de un Algoritmo Genético (AG) aplicado a la optimización de problemas complejos como el RCPSP (Problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos). La estructura del algoritmo se inicia con la formulación del problema, seguida de la generación de una población inicial de soluciones.

Fuente: Los autores

Evaluación de Soluciones mediante Análisis de Pareto

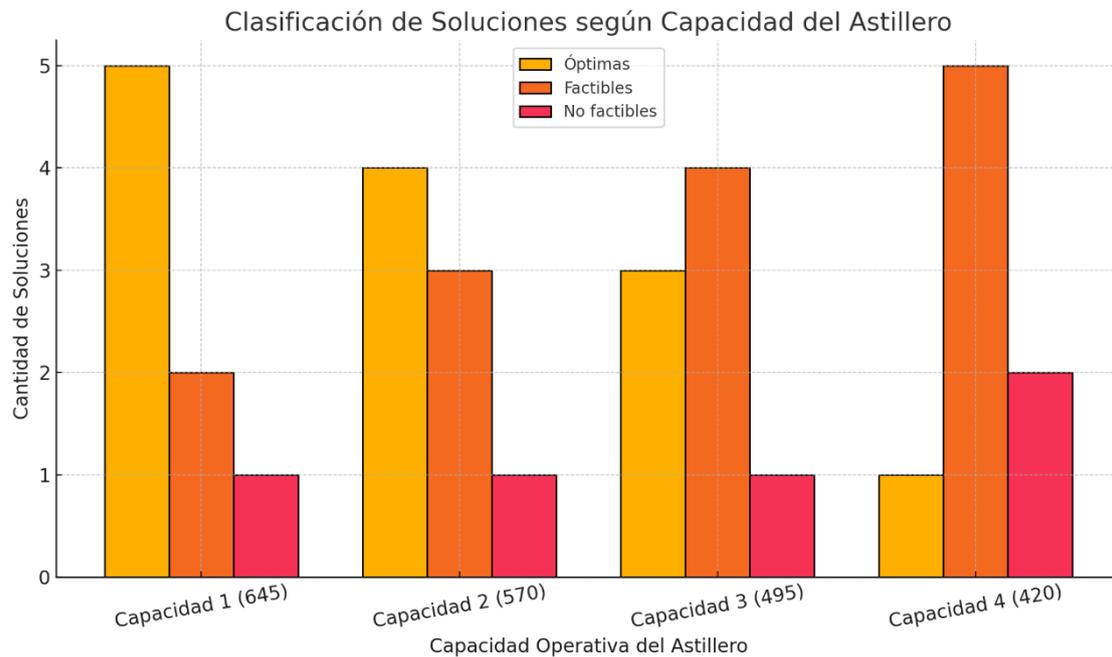
Para cada combinación de escenario y capacidad, se generó un conjunto de soluciones. Estas fueron evaluadas a través de curvas de Pareto, con el objetivo de identificar las configuraciones óptimas que ofrecieran el mejor equilibrio entre la duración del proyecto y el nivel de utilización de recursos disponibles.

Validación y Análisis Comparativo

Finalmente, se clasificaron las soluciones obtenidas en tres categorías: óptimas (Pareto eficientes), factibles (viables, pero no óptimas), y no factibles. Se analizó el impacto de las decisiones de asignación de recursos y programación sobre la duración de los proyectos en función de los diferentes niveles de capacidad operativa del astillero.

Figura 2.

Clasificación de soluciones según capacidad del astillero



Nota: Este gráfico muestra cómo las soluciones óptimas disminuyen a medida que se reduce la capacidad, mientras que las soluciones factibles y no factibles aumentan, evidenciando el impacto de la restricción de recursos en la calidad de los cronogramas generados.

Fuente: Los autores

Resultados

Análisis de los Resultados

Esta investigación aborda el Problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos (RCPPSP) en el contexto de la construcción por bloques de buques, con el objetivo de optimizar la utilización de la capacidad del astillero. Se analizaron diversas

combinaciones de escenarios y niveles de capacidad (de 645 a 420 personas/día), obteniéndose 32 soluciones evaluadas mediante curvas de Pareto.

Los resultados indican que:

- **WS 02 (Corte)** mantiene valores constantes de tiempo de flujo en todos los niveles de capacidad, ya que trabaja a plena capacidad y presenta el menor tiempo de procesamiento.
- **WS 09 (Producción de bloques)** exhibe el mayor tiempo de flujo, el cual aumenta proporcionalmente con la reducción de capacidad. A nivel de capacidad 4, el flujo se vuelve intermitente.

Tabla 1.

Flujo por Estación en Diferentes Capacidad

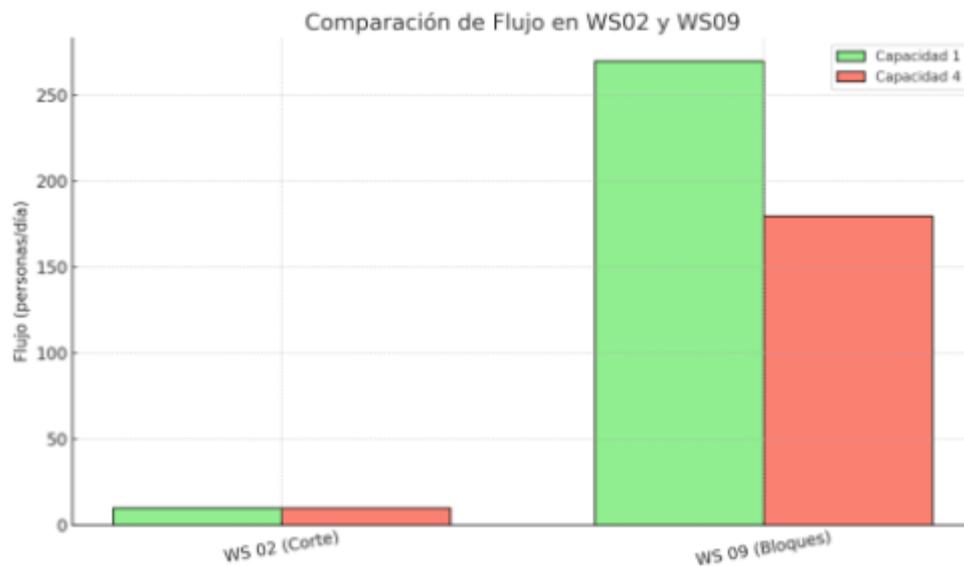
Estación	Flujo en Capacidad 1	Flujo en Capacidad 4
WS 02 (Corte)	10	10
WS 09 (Bloques)	270	180

Nota: La tabla muestra la comparación del flujo de personal (personas/día) asignado a dos estaciones clave del proceso de construcción naval bajo dos escenarios extremos de capacidad operativa: Capacidad 1 (645 personas/día) y Capacidad 4 (420 personas/día).

Fuente: Los autores

Figura 3.

Comparación de flujo en WS 02 y WS09



Nota: Se comparan los niveles de recurso (personas/día) utilizados en capacidades extremas (645 y 420) para las estaciones de corte y producción de bloques.

Fuente: Los autores

- **El buque B** presenta mayor tiempo de construcción que el buque A, debido a las condiciones específicas de sus estaciones de trabajo.
- En condiciones normales (escenario A1), el tiempo total de finalización del proyecto (makespan) es de 462 días. Sin embargo, este valor se incrementa hasta un máximo de 482 días (capacidad 4) y se reduce hasta un mínimo de 415 días (escenario H1).
- A mayor reducción de capacidad del astillero, mayor es la duración del proyecto. Los escenarios con capacidades 1, 2 y 3 permiten completar los proyectos en el tiempo normal o incluso antes. Solo el escenario con capacidad 4 muestra tardanza significativa.
- Los valores de tardanza aumentan a medida que disminuye la disponibilidad de recursos, siendo el escenario con capacidad 4 el que presenta la mayor tardanza. Por el contrario, para las capacidades 1 a 3 se observa adelanto (earliness), ya que los proyectos se completan antes del plazo establecido.
- Escenarios como C4, F4 y H4 presentan adelantos incluso en condiciones de capacidad reducida, indicando estrategias más eficientes de asignación de personal a actividades críticas.

Adicionalmente, el histograma de recursos mostró distribuciones similares para los escenarios de capacidades 1 a 3. En contraste, para la capacidad 4, la reducción de

personal ocasionó un alargamiento del proyecto y una dispersión en la asignación de recursos hacia las fases finales.

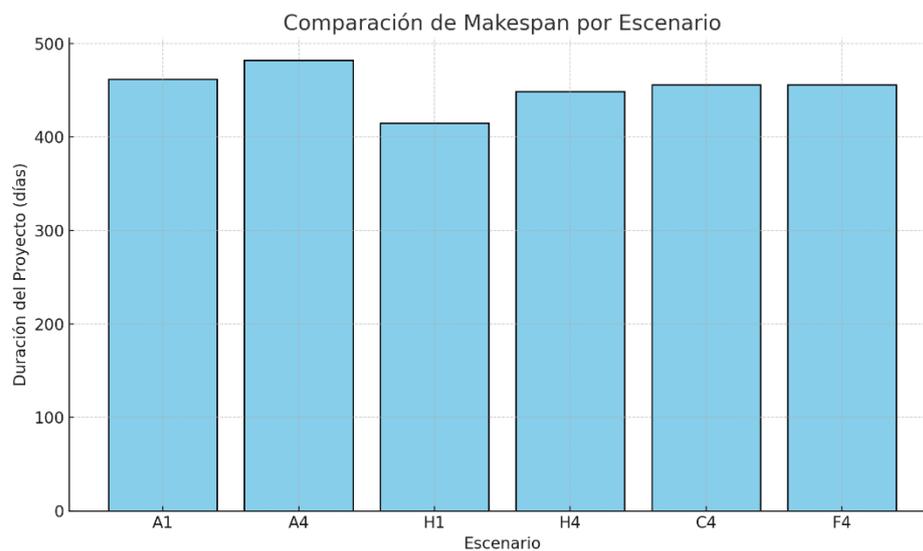
Tabla 2.
Duración del proyecto por Escenario

Escenario	Duración del Proyecto (días)
A1	462
A4	482
H1	415
H4	449
C4	456
F4	456

Nota: La tabla muestra los resultados comparativos del tiempo total de finalización del proyecto (makespan) bajo distintos escenarios de planificación y niveles de capacidad operativa del astillero.

Fuente: Los autores

Figura 4.
Comparación de Makespan por Escenario



Nota: Este gráfico muestra la duración total del proyecto en días para distintos escenarios seleccionados.

Fuente: Los autores

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian la eficacia del enfoque basado en algoritmos genéticos (GA) aplicado al RCPSP en entornos navales. A pesar de que el RCPSP y los métodos evolutivos han sido aplicados ampliamente en otras industrias (Liu et al., 2020), su uso específico en la programación de proyectos de construcción naval en ambientes difusos ha sido escasamente abordado, con pocas excepciones.

Diversas investigaciones han integrado el RCPSP con métodos como programación lineal entera mixta, optimización por enjambre de partículas (PSO), algoritmos meméticos, evolución diferencial, programación genética, entre otros. Sin embargo, esta investigación se distingue por incorporar tanto lógica difusa como análisis de Pareto en un entorno real de astillero.

Desde el punto de vista de la planificación y gestión de la producción, los algoritmos genéticos ofrecen una alternativa robusta frente a métodos tradicionales que no consideran adecuadamente las restricciones futuras de recursos. En este estudio, los GA fueron configurados con parámetros eficaces (tasa de mutación entre 50 %-70 %, selección entre 10 %-20 %, población entre 100 y 200 individuos, y hasta 1000 generaciones), permitiendo explorar un espacio de soluciones amplio y encontrar combinaciones óptimas de duración y uso de recursos.

Aplicaciones prácticas:

- En contextos como la construcción naval, donde los recursos son limitados y costosos, el uso de GA permite asignarlos eficientemente, reduciendo tiempos muertos y desperdicios.
- La optimización de los cronogramas permite reaccionar ante incertidumbres como retrasos, escasez de materiales o variabilidad en la mano de obra.
- Esto no solo mejora el desempeño del proyecto, sino que contribuye a una mejor rentabilidad y retorno de inversión, al reducir costos operativos y tiempos de entrega.

En conclusión, el uso de algoritmos genéticos en combinación con técnicas de desfuzificación y análisis de sensibilidad representa una estrategia eficaz para optimizar la programación de proyectos en astilleros, mejorando significativamente la eficiencia operativa y la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre.

Conclusiones

El presente estudio desarrolla un modelo de optimización de los procesos de producción en la industria naval mediante la aplicación del Problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos (RCPPSP). Este modelo está orientado a tres objetivos fundamentales: la minimización de costos, la reducción del tiempo total de ejecución del proyecto y la optimización del equilibrio entre costo y duración. Para ello, se emplea una metodología basada en Algoritmos Genéticos (GA) en combinación con lógica difusa, lo que permite mejorar significativamente la planificación de proyectos en contextos industriales caracterizados por su alta competitividad y limitación de recursos, como es el caso de los astilleros.

El marco metodológico propuesto integra modelos probabilísticos y análisis de escenarios, con el propósito de optimizar tanto el tiempo de finalización de los proyectos como el uso eficiente de los recursos disponibles.

Principales aportes del estudio:

- Se implementó la resolución del problema RCPSP utilizando algoritmos genéticos dentro de un entorno de incertidumbre, modelado mediante conjuntos difusos.
- Se llevó a cabo un análisis detallado de soluciones óptimas de Pareto, permitiendo identificar configuraciones que equilibran adecuadamente los tiempos de ejecución y el consumo de recursos.
- La metodología fue validada en el sector de la construcción naval, demostrando su aplicabilidad y efectividad en escenarios reales de planificación y control de producción.

Los resultados obtenidos confirman que la combinación de técnicas de inteligencia evolutiva y modelos de incertidumbre constituye una estrategia eficaz para enfrentar los desafíos operativos que presenta la programación de proyectos en entornos industriales complejos. Este enfoque representa una contribución sustantiva a la literatura especializada en gestión de proyectos navales.

Referencias bibliográficas

- Ecorys. (2011). *Study on the Competitiveness of the European Companies and Resource Efficiency Final Report Revised version after the Stakeholders Consultation Workshop and including policy recommendations Client: Directorate General-Enterprise and Industry* Rotterdam, 6th.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiM3dfG656MAxW7RzABHfxgCVMQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Fdocsroom%2Fdocuments%2F5189%2Fattachments%2F1%2Ftranslations%2Fen%2Frenditions%2Fnative&usg=AOvVaw1WYfJbcv79mlz4SEyYJvP_&opi=89978449
- Gong, D. C., Chen, P. S., & Wang, S. J. (2021). Simulation study of impact of capacity reservation threshold on order fulfilment. *International Journal of Simulation Modelling*, 20(1), 17–28. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-1-537>
- Lee, Y. G., Ju, S., & Woo, J. H. (2020). Simulation-based planning system for shipbuilding. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(6), 626–641. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775304>
- Liu, J., Liu, Y., Shi, Y., & Li, J. (2020). Solving the resource-constrained project scheduling problem by genetic algorithm. *Journal of Japan Industrial Management Association*, 57(6), 520–529. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000874](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000874)
- Ljubenkov, B., Đukić, G., & Kuzmanič, M. (2008). *Simulation Methods in Shipbuilding Process Design*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Simulation-Methods-in-Shipbuilding-Process-Design-Ljubenkov-Dukic/2087f7850d00689c8222c5099b8740fd84971898>
- Mao, X., Li, J., Guo, H., & Wu, X. (2020). Research on collaborative planning and symmetric scheduling for parallel shipbuilding projects in the open distributed manufacturing environment. *Symmetry*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SYM12010161>
- Okubo, Y., & Mitsuyuki, T. (2022). Ship Production Planning Using Shipbuilding System Modeling and Discrete Time Process Simulation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/jmse10020176>
- Rubeša, R., Hadjina, M., Matulja, T., & Bolf, D. (2023). The shipyard technological level evaluation methodology. *Brodogradnja*, 74(3), 91–106. <https://doi.org/10.21278/brod74305>

Strandenes, S. P., & Jiang, L. (2011). *Assessing the cost competitiveness of China's Shipbuilding Industry.*

<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/82791/1/680143351.pdf>

United Nations. (2022). *Review of Maritime Transport 2022.*

<https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2022>