

Evaluación comparativa de Algoritmos Computacionales aplicados a la Optimización de la Planificación Agregada de la Producción

Buscaglia Iván Santiago ^a, Michalus Juan Carlos ^a, Batista Oscar Hugo ^a, Schmidt Erardo ^a

^a Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones, Argentina.

ivan.buscaglia@gmail.com, michalus@fio.unam.edu.ar, batista@fio.unam.edu.ar, schmidt@fio.unam.edu.ar

Resumen

Se analiza el desempeño de diferentes algoritmos en la optimización de la planificación agregada de la producción (PAP), con el objetivo de identificar cual presenta mejor performance. Los algoritmos evaluados son GRG Nonlinear, Evolutionary, DEPS Evolutionary, SCO Evolutionary, lq-CMA-ES y Purecma. Los resultados indican que el tiempo de procesamiento no es un factor de comparación crítico, sin embargo, la consecución de un resultado óptimo es fundamental para las operaciones de las organizaciones. El algoritmo lq-CMA-ES se destaca por su buen desempeño, aunque requiere mayor tiempo de desarrollo y ajuste. Alternativamente, los algoritmos DEPS, SCO y GRG son recomendados por su facilidad de implementación.

Palabras Clave – Algoritmos de Optimización; Evaluación Comparativa; Planificación Agregada de la Producción

1 Introducción

Es esencial integrar nuevas tecnologías de la información en los procesos productivos, ya que las empresas operan en entornos caracterizados por su volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad, también conocidos como VUCA (por sus iniciales en idioma inglés). Esta terminología fue adoptada por las fuerzas armadas para ayudar en la planificación de operaciones en contextos complejos. Para enfrentar eficazmente este escenario, las empresas deben fomentar elementos ágiles como la autonomía, la autoorganización y la flexibilidad [1].

En la industria en general, y en particular en la planificación de la producción, existen diversas situaciones que requieren la búsqueda de la solución óptima a problemas, especialmente al planificar la producción. En este contexto, la implementación de algoritmos de optimización contribuye a la reducción de los tiempos de procesamiento de datos a la hora de tomar decisiones, lo que aumenta la agilidad de la organización. Por ejemplo, estos algoritmos poseen la habilidad de calcular con precisión tanto la cantidad como las dimensiones de los lotes, y logran hacerlo en un lapso de tiempo muy pequeño [2].

Para realizar un análisis aún más específico, éste trabajo se centra en la aplicación de estos algoritmos en la Planificación Agregada de la Producción (PAP). Que se define como el proceso en el cual una empresa planifica y organiza sus recursos, capacidad de producción, subcontratación e inventario para un período de tiempo determinado. El propósito principal de este proceso es asegurar la satisfacción de la demanda mientras se busca maximizar las ganancias [3]. La PAP se realiza con una perspectiva a mediano plazo, abarcando un horizonte temporal que generalmente oscila entre 6 y 18 meses [4], dependiendo de las características de la organización. Este proceso se vincula tanto con

* ivan.buscaglia@gmail.com

decisiones a largo plazo, que afectan la estrategia empresarial, como con decisiones operativas específicas [5].

Cabe mencionar que este es un documento que se debe actualizar constantemente, consolidando los resultados obtenidos y recalculando la demanda. Se han creado diversos modelos de planificación agregada de la producción, los cuales varían en su nivel de complejidad. Estos consideran aspectos como la incertidumbre en los datos, objetivos múltiples, la gestión de diversos productos y conceptos financieros específicos [6]. En términos generales, los parámetros que conforman esta planificación incluyen los días productivos en el mes, la necesidad pronosticada de producción, la variación en la plantilla, la producción disponible, las horas trabajadas, las horas ociosas, las horas extraordinarias realizadas, la producción subcontratada necesaria, el inventario, el índice de satisfacción del cliente y los costos asociados a todos estos parámetros. Las variables para optimizar suelen ser la cantidad de operarios y la producción, ya sea normal, extraordinaria o subcontratada.

El modelo matemático propuesto, con el cual se describe a una PAP ayuda a comprender y optimizar las operaciones de una organización, mediante el análisis de sus funciones. Hay que tener en cuenta que a cada contexto le corresponde ciertos valores iniciales y restricciones, como la cantidad inicial de empleados, los límites mínimos y máximos de producción y subcontratación, etc. Las variables y constantes específicas del modelo permiten calcular funciones que representan aspectos importantes, como el costo asociado con la contratación o despido de empleados, el costo de producción en condiciones normales, los costos relacionados con horas ociosas y horas extraordinarias de trabajo, así como el inventario al final de cada período y los costos relacionados con mantener o agotar dicho inventario. La sumatoria de todos los costos del periodo analizado es el costo total, el cual es el objetivo a minimizar.

Para determinar los valores de las variables en la PAP, se puede emplear diversos modelos. Estos comprenden enfoques intuitivos o de prueba y error, analíticos que se basan en modelos matemático, así como simulaciones, generalmente realizadas mediante computadora, en la cual se evalúan múltiples soluciones que se mejoran utilizando reglas específicas de búsqueda [4]. Como resultado de analizar el modelo de PAP propuesto en este trabajo se propone modelar matemáticamente la PAP, con sus constantes, variables, funciones y restricciones, para luego realizar simulaciones por ordenador empleando algoritmos para resolverla. Este enfoque puede beneficiarse del respaldo de planillas de cálculo y algoritmos matemáticos de optimización. No obstante, es importante tener en cuenta que esta opción puede demandar una capacidad de procesamiento considerable, lo que podría resultar en tiempos de espera prolongados para obtener una solución óptima debido a la complejidad de las variables involucradas.

Mediante investigaciones previas del equipo de trabajo [7] [8], se identificó un conjunto de algoritmos que son apropiados para implementarse en el problema analizado. Los cuales surgen de continuar con investigaciones previas del equipo, estos son GRG Nonlinear, Evolutionary, DEPS Evolutionary Algorithm, SCO Evolutionary Algorithm, lq-CMA-ES y Purecma.

Teniendo en cuenta el marco teórico presentado se introduce al problema de investigación que se pretende analizar, el cual es, “La falta de claridad respecto a qué algoritmos son más eficaces para minimizar el costo total en la planificación agregada de la producción”.

2 Metodología

Para realizar una sugerencia acerca de qué algoritmo emplear para resolver una PAP, se identificó un conjunto de estos que son apropiados para implementarse en el problema analizado. En este sentido, se define que el objetivo de este trabajo es “Determinar comparativamente cuál de los algoritmos computacionales analizados es más efectivo a la hora de minimizar el costo total en la planificación agregada de la producción”. Por lo tanto, se comparan los algoritmos teniendo en cuenta su capacidad para minimizar el costo total de la producción, ya que es crucial para la organización tomar decisiones que optimicen los costos. Esto significa que cuanto menor sea el resultado obtenido por el proceso de optimización del algoritmo mejor es su valoración. Se compararon los resultados obtenidos con un tiempo de procesamiento de 10 a 20 minutos, teniendo en cuenta que este rango resulta aceptable para un proceso de optimización.

Los algoritmos empleados en el análisis se describen brevemente a continuación.

GRG Nonlinear:

El solucionador no lineal de GRG utiliza dos técnicas para la búsqueda: Quasi-Newton y gradiente conjugado, adaptándose automáticamente entre estas dos opciones según el espacio de almacenamiento disponible [9]. Este algoritmo será evaluado generando una planilla de cálculo, que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

Evolutionary:

El solucionador Evolutionary, se basa en algoritmos genéticos o evolutivos para encontrar soluciones a problemas de optimización. Este método puede encontrar una buena solución para un modelo que esté razonablemente escalado [10]. Este algoritmo será evaluado generando una planilla de cálculo, que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

DEPS Evolutionary Algorithm:

DEPS consta de dos algoritmos independientes: Evolución Diferencial y Optimización de Enjambre de Partículas. Ambos son especialmente adecuados para problemas numéricos, como la optimización no lineal, y se complementan entre sí en el sentido de que compensan las deficiencias mutuas [11]. Este algoritmo será evaluado generando una planilla de cálculo, que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

SCO Evolutionary Algorithm

El algoritmo Social Cognitive Optimization (SCO) soluciona problemas difíciles usando agentes que aprenden y comparten información en una biblioteca. Los agentes eligen modelos exitosos y

mejoran sus soluciones buscando, adaptándose y encontrando las mejores soluciones usando simbolización y observando los resultados de otros agentes [12]. Este algoritmo será evaluado generando una planilla de cálculo, que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

lq-CMA-ES

CMA-ES es una técnica adaptativa para la optimización numérica no lineal o no convexa, que se ajusta dinámicamente para generar soluciones mejores a lo largo de las iteraciones y ha demostrado eficacia tanto en poblaciones pequeñas como en grandes [13] [14]. Teniendo en cuenta lo anterior, lq-CMA-ES una variante del algoritmo de CMA-ES que utiliza un modelo de aptitud sustituto construido mediante un enfoque lineal cuadrático, que se utiliza para mejorar el rendimiento del algoritmo en espacios de búsqueda continuos [15]. Este algoritmo será evaluado generando código específico en Python [16], que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

Purecma

CMA-ES es una técnica adaptativa para la optimización numérica no lineal o no convexa, que se ajusta dinámicamente para generar soluciones mejores a lo largo de las iteraciones y ha demostrado eficacia tanto en poblaciones pequeñas como en grandes [13] [14]. El algoritmo "purecma" es una implementación minimalista del algoritmo de Estrategia Evolutiva de Adaptación de la Matriz de Covarianza, CMA-ES [17]. Este algoritmo será evaluado generando código específico en Python [16], que corresponderá con el modelo de PAP propuesto.

3 Resultados y discusión

Se ejecutaron de los algoritmos en los entornos previamente mencionados, con el objetivo específico de minimizar el costo total de la PAP. Cada algoritmo se evalúa en términos de su capacidad para reducir el costo total. A partir de este proceso, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se presentan a continuación ordenados de menor a mayor para facilitar la comparación y análisis de desempeño:

Tabla 1 – Resultados del proceso de optimización; Fuente: Elaboración propia

Algoritmo	Resultado
lq-CMA-ES	\$582.858,42
DEPS	\$600.169,00
SCO	\$600.173,00
GRG Nonlinear	\$638.147,09
Purecma	\$1.010.348,66
Evolutionary	\$4.219.910,00

Análisis de desempeño:

El algoritmo lq-CMA-ES se adapta dinámicamente generando soluciones cada vez mejores, empleando un modelo de aptitud sustituto mediante un enfoque lineal cuadrático, lo que lo hace efectivo en problemas numéricos no lineales como la PAP. Para emplearlo será necesario modelar el problema en Python, con ello se logrará obtener un resultado óptimo. Hay que tener en cuenta que se deberá emplear grandes cantidades de tiempo para desarrollarlo, configurarlo y ajustarlo.

GRG Nonlinear: Destaca por su eficiencia en problemas no lineales, lo que conduce a resultados óptimos en tiempos razonables, adecuándose bien a la naturaleza de las ecuaciones de la PAP.

DEPS Evolutionary Algorithm: Combina Evolución Diferencial y Optimización de Enjambre de Partículas, lo que amplía la exploración del espacio de soluciones y aumenta la diversidad en la búsqueda, mejorando su eficacia en la resolución de problemas de PAP.

SCO Evolutionary Algorithm: Utiliza principios de optimización cognitiva social, simulando el comportamiento humano de aprendizaje y compartir información, lo que proporciona una perspectiva única y adaptativa para abordar problemas de optimización, especialmente en entornos cambiantes como la PAP.

Para emplear los algoritmos DEPS, SCO o GRG Nonlinear para resolver una PAP, será necesario modelar el problema en una plantilla de cálculo, con esto se logrará obtener un resultado relativamente bueno empleando menor cantidad de tiempo en el desarrollo, configuración y ajuste.

Por otro lado, Purecma y Evolutionary no resultaron igualmente efectivos en este contexto. Purecma, a pesar de ser una implementación minimalista del algoritmo CMA-ES, puede haber sido insuficiente para manejar la complejidad de las ecuaciones de la PAP, con limitaciones en su capacidad de adaptación y exploración del espacio de soluciones. Por su parte, aunque los algoritmos genéticos son potentes, Evolutionary muestra resultados menos efectivos debido a la complejidad no lineal de las ecuaciones de la PAP. Esto resulta en una exploración menos eficiente del espacio de soluciones y una convergencia más lenta en comparación con los demás algoritmos analizados.

4 Conclusiones

Considerando como criterio de comparación los resultados obtenidos del proceso de minimización del costo total, se concluye que el algoritmo lq-CMA-ES es el más adecuado para resolver este problema, seguido por DEPS, SCO y GRG Nonlinear.

En contraposición a los hallazgos de investigaciones anteriores, los algoritmos GRG Nonlinear, DEPS Evolutionary Algorithm y SCO Evolutionary Algorithm tienen resultados buenos y muy similares, probablemente debido a un ajuste deficiente de la configuración de los algoritmos en estudios anteriores [7] [8]. Por este motivo se destaca que es muy importante dedicar una considerable cantidad de tiempo a probar las configuraciones de los algoritmos, para así determinar la que mejor se ajuste a cada problema particular.

Al definir qué algoritmo se implementará, es fundamental considerar los recursos disponibles para dicha tarea. La utilización del algoritmo lq-CMA-ES requerirá una mayor cantidad de recursos para

su implementación y ajuste adecuados, sin embargo, se obtendrán resultados óptimos. En cambio, la implementación de los algoritmos DEPS, SCO o GRG Nonlinear demandará menos recursos, aunque los resultados obtenidos no serán tan favorables en comparación. El analista deberá evaluar los recursos a invertir frente a la necesidad de obtener un resultado óptimo.

Además, se observa que el tiempo de procesamiento no resulta un factor decisivo a la hora de comparar los algoritmos. El rango de tiempo que toma a los diferentes algoritmos hallar su resultado óptimo es de entre 10 y 20 minutos (cabe mencionar que se continuó procesando hasta que ya no eran capaces de mejorar el resultado). El rango de tiempo que demoran en hallar un resultado óptimo no genera grandes implicancias en la agilidad de las organizaciones, en contraposición a la importancia que si tiene hallar el resultado óptimo.

Los caminos a seguir en futuras investigaciones son los siguientes:

Determinar el origen de la aptitud: Determinar por qué determinados algoritmos son capaces de resolver una PAP, obteniendo un mejor resultado en menor tiempo. De lograr determinar esta causa se podría desarrollar un algoritmo específico para esta tarea.

Refinamiento de algoritmos existentes: Se pueden explorar técnicas de ajuste y optimización adicionales para mejorar el rendimiento de los algoritmos analizados. Esto podría incluir la modificación de parámetros.

Desarrollo de interfaces de usuario amigables: La creación de interfaces de usuario amigables, por ejemplo, en el caso del algoritmo lq-CMA-ES, permitiría que el mismo sea una opción ideal resolver este problema. Generar esta interfaz en formato de código abierto permitiría a las industrias acceder a una herramienta más potente comparativamente para resolver el problema planteado, sin tener que invertir grandes cantidades de recursos.

Diferentes modelos de PAP: El problema planteado es generalista, sin embargo, se podrían incluir más variables y constantes específicas al problema en cuestión, lo que lo volvería aún más complejo. Como se mencionó anteriormente, cada aplicación de PAP es específica de un entorno, se podría analizar un caso específico, más complejo que la versión generalista.

Implementación de otros Algoritmos: Existen desarrollos constantes en el campo de los algoritmos de optimización, por lo que la investigación debe continuar actualizándose respecto a qué algoritmos podrían implementarse para resolver este problema.

5 Referencias Bibliográficas

- [1] D. Allendes y A. Benito, Entorno VUCA: enfrentando el desafío organizacional a través del liderazgo efectivo, Santiago, Chile: Facultad de Ingeniería de la Iniversidad del Desarrollo, 2020.
- [2] F. J. Castillo Zunino, Algoritmos genéticos para planificar la secuencia, asignación, tamaño y cantidad de lotes en una planta multiproducto, Santiago, Macul, región metropolitana, Chile.: Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería, 2014.
- [3] S. Chopra y P. Meindl, Administración de la Cadena de Suministro, Estrategia, planeación y operación, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ: Pearson , 2012.
- [4] J. A. Dominguez Machuca, S. Garcia Gonzales , A. Ruiz Jimenez, M. A. Dominguez Machuca y M. J. Alvarez Gil, Dirección de operaciones, Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios, Madrid: McGraw-Hill, 1995.
- [5] A. M. S. B. A. E. P. D. El-Awady Attia, Aggregate production planning considering performance evolution : a case study., Caire, Egypt: AMME Conference, Apr 2016.
- [6] F. K. H. M. Ali Cheraghlikhania, Aggregate production planning: A literature review and future research directions, Iran: International Journal of Industrial Engineering Computations , 2018.
- [7] I. S. Buscaglia y J. C. Michalus, «Optimización de la Planificación Agregada de la Producción: Una Exploración de los Algoritmos Genéticos,» *XIII-Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción*, 2023.
- [8] I. S. Buscaglia y J. C. Michalus, «Análisis Exploratorio de Algoritmos Genéticos aplicados a la Planificación Agregada de,» *XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, 2023.
- [9] M. Muzzammil, J. Alam y M. Muzzammil, «An optimization technique for estimation of rating curve parameters,» *Symposium on Hydrology Indian Association of Hydrologists (IAH), Roorkee. New Delhi, India.*, 2015.
- [10] Frontline Systems Inc ®, «EXCEL SOLVER - ALGORITHMS AND METHODS USED,» . Recuperado de: <https://www.solver.com/excel-solver-algorithms-and-methods-used>., Consultado el: 24/7/2024.
- [11] LibreOffice, «Solver Algorithms Options,» https://help.libreoffice.org/latest/en-US/text/scalc/01/solver_options_algo.html?&DbPAR=SHARED&System=WIN#DEPSEvolutionaryalgorithmh2, Consultado el: 07/02/2024.
- [12] X.-F. XIE, W.-J. ZHANG y Z.-L. YANG, «SOCIAL COGNITIVE OPTIMIZATION FOR NONLINEAR PROGRAMMING PROBLEMS,» Beijing, 2002.
- [13] J. Blank y K. Deb, pymoo: multi-objective optimization in python, IEEE Access, 8():89497–89509, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2990567., 2020.
- [14] N. Hansen., The CMA Evolution Strategy: A Comparing Review, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: URL: https://doi.org/10.1007/3-540-32494-1_4, doi:10.1007/3-540-32494-1_4., 2006.
- [15] N. Hansen, «A global surrogate assisted {CMA-ES},» de *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference ({GECCO})*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, 2019.
- [16] G. & D. F. L. Van Rossum, «Python 3 Reference Manual,» CreateSpace, Scotts Valley, CA, 2009.
- [17] N. Hansen, «cma.purecma,». Recuperado de: https://cma-es.github.io/apidocs-ptycma/cma.purecma.html#__author__, 2017. Consultado el: 24/7/2024.