

Optimización a gran escala usando metaheurísticas

Juan José Barbero, Martín Tamagusku, Eber Bezzone,
Fernando Sanz Troiani, Hugo Alfonso¹,
Carlos Bermudez, Gabriela Minetti¹, Carolina Salto¹
Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Esq. 9 (6360) General Pico - La Pampa - Rep. Argentina
Te. / Fax: (02302) 422780/422372, Int. 6302
e-mail: ¹{minettig, saltoc, alfonsoh@ing.unlpam.edu.ar}

Resumen Este proyecto de investigación se enfoca en la resolución de problemas de optimización a gran escala utilizando nuevas técnicas metaheurísticas, así como también su hibridación con las ya existentes.

Una de las líneas de investigación analiza el efecto de reemplazar el método para crear nuevas soluciones en el algoritmo *artificial bee colony* por operadores de recombinación.

Otra de las líneas de investigación se enfoca en la resolución del problema *flexible job shop scheduling* (NP-hard), presente en ambientes fabriles, porque tiene que asignar cada operación a la máquina apropiada además de secuenciar las operaciones en las máquinas. Debido a esta complejidad, las metaheurísticas se convirtieron en la mejor opción para resolver en la práctica este problema.

Una tercera línea de investigación apunta a la resolución del problema de diseño de redes de distribución de agua, mediante el uso de metaheurísticas como *Simulated Annealing* y *Cuckoo Search*.

Por último, una línea de investigación se orienta a la utilización de la metaheurística basada en la migración de las aves en el problema de ruteo vehicular con capacidad, el cual es reconocido por su incidencia en el mundo de los negocios y por la dificultad para resolverlo.

Palabras claves: Metaheurísticas, optimización, operadores

Contexto

Estas líneas de investigación se desarrollan en el marco de un proyecto de investigación, llevado a cabo en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa, acreditado por dicha facultad y dirigido por la Dra. Minetti. Cabe destacar que desde hace varios años, los integrantes de estos proyectos mantienen una importante vinculación con investigadores de la Universidad Nacional de San Luis (Argentina) y de la Universidad de Málaga (España), con quienes se realizan publicaciones conjuntas.

Introducción

La mayoría de los problemas de optimización del mundo real abordan una gran cantidad de variables de decisión, y se los conoce como problemas de Optimización Global a Gran Escala (LSGO). Muchas aplicaciones de la ciencia y la ingeniería se formulan como problemas LSGO: diseño de sistemas electrónicos a gran escala, problemas de *scheduling* con gran cantidad de recursos u operaciones, diseño de redes de distribución de agua, ruteo vehicular a gran escala, reconocimiento de genes en bioinformática, cinética química de problemas inversos, entre otros. Por un lado, la optimización de este tipo de problemas consume mucho tiempo. Por otra parte, los algoritmos metaheurísticos son ampliamente reconocidos como enfoques eficientes para resolver problemas de optimización de grandes dimensiones. En este sentido,

las líneas de investigación de este proyecto se encargan de proponer, adaptar y analizar distintas metaheurísticas con el propósito de resolver eficaz y eficientemente diferentes problemas LSGO.

Por un lado, se estudia y analiza el reemplazo del método para crear nuevas soluciones en el algoritmo de *artificial bee colony* mediante operadores de recombinación. Las razones de este reemplazo están dadas por el hecho que el método original es similar al proceso de recombinación utilizado en los algoritmos evolutivos. Para ello, realizamos una investigación sistemática del efecto de utilizar seis operadores de recombinación diferentes, para soluciones codificadas en los reales, en el paso realizado por la abeja empleada.

Por otra parte, el problema *flexible job shop scheduling* (FJSSP) es un problema difícil y complejo en entornos de fabricación, NP-hard, porque tiene que asignar cada operación a la máquina adecuada además de secuenciar las operaciones en tales máquinas. Debido a esta complejidad, las metaheurísticas se convirtieron en la mejor opción para resolver en la práctica este tipo de problema. Por lo tanto, se trabajó en la realización de un compendio cubriendo un amplio espectro algorítmico de diferentes técnicas para resolver el JSSP, analizando la calidad de las soluciones encontradas por cada una de estas técnicas, además de las ventajas y desventajas de las mismas en cuanto a tiempos de desarrollo, adecuación al problema, complejidad en la resolución del problema, entre otras características.

Además se investiga la optimización del diseño de redes de distribución de agua, que es un campo de investigación muy activo desde hace algunas décadas. Estas redes están compuestas por reservorios y tuberías que tratan de brindarles a los usuarios un flujo constante de agua con una determinada presión. El problema de optimizar estas redes consiste en encontrar el diámetro óptimo de cada tubería seleccionándola de un conjunto limitado de caños disponibles comercialmente, con el objetivo de reducir el costo. En esta línea de investigación se están utilizando técnicas metaheurísticas basadas en trayectoria y en población. En particular se están adaptando y probando diferentes algoritmos como *Simulated Annealing* (SA), *Cuckoo Search* (CS), entre otros.

Por último, en otra línea de investigación se trabaja sobre el algoritmo propuesto por Duman [1] basado en la migración de las aves (*Migrating Birds Optimization Algorithm*, MBO). Este algoritmo ha demostrado ser eficiente al resolver problemas de transporte marítimo [2], secuenciación de tareas [3], entre otros. Motivo por el cual se diseñó e implementó una versión de MBO para resolver el problema de ruteo vehicular (CVRP). El objetivo es evaluar la calidad de las soluciones encontradas por esta propuesta algorítmica y analizar su esfuerzo computacional. Esta nueva versión de MBO es testada usando un amplio y diverso conjunto de casos de prueba.

Desarrollo

En esta sección se describen las líneas de investigación mencionadas en la introducción.

Mejora del algoritmo *artificial bee colony*

La inteligencia *swarm* es el estudio de sistemas computacionales inspirados por la cooperación de un gran número de agentes homogéneos en el medio ambiente. Una colonia de hormigas o de abejas, una bandada de pájaros, o un sistema inmune son ejemplos típicos de sistemas de enjambres. Tereshko y Loengarov [4] consideran una colmena de abejas como un sistema dinámico, donde recopilar información de un entorno y ajustar su comportamiento de acuerdo con ésta produce una toma de decisiones inteligente al mejorar el nivel de comunicación entre los individuos. Teniendo en cuenta las ideas de Tereshko y Loengarov, Karaboga et al. [5] proponen un algoritmo de optimización basado en el comportamiento inteligente del enjambre de abejas (*artificial bee colony*, ABC).

En la literatura se presentan alternativas que modifican el método original para generar una fuente de comida candidata (o solución candidata) [6], [7], [8], [9], pero estas alternativas son solo pequeñas variaciones del esquema tradicional. El mecanismo utilizado por ABC para producir una nueva solución candidata es muy similar al procedimiento llevado a cabo por los operadores de recombinación en la literatura

de los algoritmos evolutivos. En este sentido, se consideró la aplicación de otros mecanismos para generar nuevas posiciones de fuentes al utilizar los operadores de recombinación, cuyo efecto sobre el desempeño de ABC aún no se ha estudiado y su impacto podría ser más significativo que el enfoque tradicional. En consecuencia, se analizó el efecto del uso de seis operadores de recombinación diferentes para crear nuevas posiciones de alimentos en el paso de la abeja empleada del algoritmo ABC. Dado que ABC trabaja con soluciones codificadas en los reales, se eligieron los siguientes operadores evolutivos: aritmético, aritmético-Max-Min, lineal, binomial, de un punto y multipunto. El desempeño de estas variantes algorítmicas se evaluó al usar el conjunto de prueba IEEE CEC'2008 [10], especialmente diseñado con problemas de minimización de gran escala (es decir con dimensiones de 100, 500 y 1000 variables).

Optimización del diseño de redes de distribución de agua

Se requiere un método de solución eficaz que sea confiable y fácil de usar para la optimización de las redes de distribución de agua, que proporcionan un servicio esencial en todas las comunidades. La optimización no solo aborda los costos de capital y operativos junto con el rendimiento y la confiabilidad hidráulica, sino también la gestión competente de la energía. En consecuencia, las metaheurísticas brindan, una vez más, una alternativa de solución eficiente. Por este motivo, en esta línea de investigación se analizan y diseñan dos variantes metaheurísticas que resuelven este problema, SA e ILS.

Dada las características propias de este tipo de redes, una vez que SA o ILS arman una determinada solución, la prueban y evalúan por medio del simulador EPANET 2.0 [11]. Este simulador, además, resuelve todas las ecuaciones hidráulicas de forma externa. Los problemas que se utilizan para efectuar los experimentos son de periodo simple y multi periodo, en donde el patrón de demanda varía con el tiempo. Si bien, aún, no se cuenta con resultados fehacientes, por estar en la fase inicial, se puede observar

que los algoritmos desarrollados logran un buen desempeño al reducir en forma considerable los costos de las redes.

Compendio de metaheurísticas eficientes para resolver el FJSSP

Generalmente, el FJSSP es un entorno de producción más realista y, por consiguiente, en la práctica es más aplicable que el JSSP. Sin embargo, el FJSSP es más complejo [12]) que el JSSP debido a su decisión adicional de asignar cada operación a la máquina apropiada (enrutamiento), además de, secuenciar las operaciones en estas máquinas (planificación o *scheduling*). Debido a la complejidad mencionada de FJSSP, se sugiere la adopción de métodos heurísticos porque producen *schedules* de muy buena calidad en un tiempo razonable, en lugar de buscar una solución óptima, posible sólo para casos pequeños. En los últimos años, la adopción de metaheurísticas [13] ha dado lugar a mejores resultados que los algoritmos exactos o los heurísticos *greedy* [14], [15], [16].

Por todo lo anterior, se adaptaron y analizaron diferentes metaheurísticas para resolver el FJSSP con el objetivo de ofrecer una referencia de base para la comparación, utilizando diferentes metaheurísticas para cubrir un amplio espectro algorítmico, desde los métodos de trayectoria hasta los métodos basados en la población. De esta forma, obtenemos un valioso compendio de enfoques para FJSSP al especificar sus cualidades desde dos puntos de vista: primero, adaptando las metaheurísticas para resolver el problema y, en segundo lugar, encontrando *schedules* de buena calidad con un bajo esfuerzo computacional. En consecuencia, la metodología seguida en este estudio empírico consiste en adaptar cinco metaheurísticas para resolver el FJSSP: SA, *Iterated Local Search* (ILS), CS, *Genetic Algorithms* (GA) e *Imperative Competitive Algorithm* (ICA). Se evaluaron y compararon cada una de ellas en un conocido conjunto de instancias de prueba del problema.

Aplicación de MBO al problema de ruteo vehicular

El problema de ruteo vehicular con capacidad (CVRP) es ampliamente conocido por su complejidad y por su vasta aplicación en la logística empresarial. Muchas han sido las técnicas algorítmicas usadas para resolverlo y MBO es una que aún no había sido considerada para tal fin. MBO [1] toma como referencia el comportamiento de las aves durante sus largos viajes migratorios y lo reformula en un algoritmo de optimización. Aquí se trata a las soluciones como aves migratorias que emprenden el vuelo, por ende el primer paso consiste en generar de forma aleatoria las aves que compondrán la formación y ubicarlas de manera hipotética en forma de "V". A partir de estas soluciones iniciales, el algoritmo comenzará la exploración y explotación del espacio de búsqueda, simulando la rotación de las aves en la formación de vuelo. El trabajo de investigación consistió en adaptar este algoritmo al CVRP, al modificar la representación de la solución y los operadores de movimiento; los cuales diferían de los definidos originalmente para MBO. Esto significó modificaciones en la inicialización de la población, en la definición de la estructura de vecindario y en su manejo.

Resultados obtenidos

A continuación se detallan los resultados obtenidos por cada una de las líneas de investigación abordadas, excepto en la referida a la optimización de redes de distribución de agua por encontrarse en una fase inicial.

Los resultados obtenidos, al analizar los seis operadores de recombinación diferentes para crear nuevas fuentes de alimentos en el algoritmo ABC, sugieren el uso de la recombinación aritmética como una alternativa interesante al método original [17]. Dado que este operador presenta un rendimiento muy bueno en términos del rango de calidad promedio y el esfuerzo computacional para todas las funciones y dimensiones consideradas. Además, el desempeño de los otros operadores que ajustan las variables en las soluciones (operadores de recombinación lineal y aritmético Max-Min) es similar al comportamiento del algoritmo origi-

nal. En cambio, los algoritmos ABC que aplican operadores de recombinación binomial, de un solo punto y multipunto, y solo copian partes de otras soluciones para crear uno nuevo, no parecen ser buenas alternativas para el algoritmo ABC, debido a la baja calidad de sus soluciones para cualquier función y dimensión.

En cuanto al compendio de diferentes metaheurísticas para resolver el FJSSP, se incluyeron dos metaheurísticas basadas en trayectoria (SA e ILS) y tres basadas en población (CS, GA e ICA) para dar un amplio espectro de posibles soluciones al problema de programación mencionado. Los resultados indican que las metaheurísticas basadas en trayectoria fueron precisas y eficientes para solucionar el FJSSP [18]. En el estudio llevado a cabo en este trabajo, SA es el algoritmo de mejor rendimiento para resolver el FJSSP. Además, cuando SA se contrasta con algoritmos en la literatura, también se convierte en el mejor enfoque. Como consecuencia, SA brinda soluciones precisas a este problema de NP-hard de una manera eficiente y competitiva.

El desempeño de MBO fue puesto a prueba con numerosas instancias de CVRP de variada complejidad, obteniendo resultado de buena calidad en tiempos razonables. Esto motiva a continuar trabajando en la mejora del método de exploración de MBO, con el fin de alcanzar la solución óptima en la mayor cantidad de instancias posibles. Es decir que, dado a los bajos tiempos de cómputo de la metaheurística se dispone de un margen de acción que permite llevar a cabo esta tarea y mantener valores de tiempo competitivos.

Formación de recursos humanos

Cada año se incorporan al proyecto alumnos avanzados en la carrera Ingeniería en Sistemas, quienes trabajan en temas relacionados a la resolución de problemas de optimización usando técnicas inteligentes, con el objeto de guiarlos en el desarrollo de sus tesis de grado y, también, de formar futuros investigadores científicos. Por otra parte, los docentes-investigadores que integran el proyecto realizan diversos cursos de posgrado relacionados con la temática del proyecto, con

el objetivo de sumar los créditos necesarios para cursar carreras de posgrado.

REFERENCES

- [1] E. Duman, M. Uysal, and A. F. Alkaya, "Migrating birds optimization: A new metaheuristic approach and its performance on quadratic assignment problem," *Information Sciences*, vol. 217, pp. 65 – 77, 2012.
- [2] E. Lalla-Ruiz, C. Expósito-Izquierdo, J. de Armas, B. Melián-Batista, and J. M. Moreno-Vega, "Migrating birds optimization for the seaside problems at maritime container terminals," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2015, Special Issue, p. 12 pages, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2015/781907>
- [3] "The migrating birds optimization metaheuristic for the permutation flow shop with sequence dependent setup times," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 408 – 413, 2016.
- [4] V. Tereshko and A. Loengarov, "Collective decision-making in honey bee foraging dynamics," *Computing and Information Systems Journal*, ISSN 1352-9404, 2005.
- [5] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (abc) algorithm," *J. of Global Optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, Nov. 2007.
- [6] W. Gao, S. Liu, and L. Huang, "A global best artificial bee colony algorithm for global optimization," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 236, no. 11, pp. 2741 – 2753, 2012.
- [7] K. Diwold, A. Aderhold, A. Scheidler, and M. Middendorf, "Performance evaluation of artificial bee colony optimization and new selection schemes," *Memetic Computing*, vol. 3, no. 3, p. 149, 2011.
- [8] B. Akay and D. Karaboga, "A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization," *Information Science*, vol. 192, pp. 120–142, 2012.
- [9] A. Banharsakun, T. Achalakul, and B. Sirinaovakul, "The best-so-far selection in artificial bee colony algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 2888 – 2901, 2011, the Impact of Soft Computing for the Progress of Artificial Intelligence.
- [10] K. Tang, X. Yao, P. N. Suganthan, C. MacNish, Y. P. Chen, C. M. Chen, , and Z. Yang, "Benchmark functions for the CEC'2008 special session and competition on large scale global optimization," Nature Inspired Computation and Applications Laboratory, USTC, China, Technical Report, 2007.
- [11] L. Rossman, *Users Manual*, Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316309132>
- [12] M. R. Garey, D. S. Johnson, and R. Sethi, "The complexity of flowshop and jobshop scheduling," *Math. Oper. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 117–129, May 1976.
- [13] E. Talbi, *Metaheuristics: from Design to Implementation*. Wiley, 2009.
- [14] G. Vilcot and J.-C. Billaut, "A tabu search and a genetic algorithm for solving a bicriteria general job shop scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 190, no. 2, pp. 398 – 411, 2008.
- [15] G. Zhang, X. Shao, P. Li, and L. Gao, "An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, no. 4, pp. 1309 – 1318, 2009.
- [16] G. Zhang, L. Gao, and Y. Shi, "An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, pp. 3563–3573, 2011.
- [17] G. Minetti and C. Salto, "Improving artificial bee colony algorithm with evolutionary operators," in *Anales del XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, R. de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI), Ed., 2017, pp. 93–102.
- [18] C. Bermudez, G. Minetti, and C. Salto, "A metaheuristic compendium for scheduling problems," in *Anales del XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, R. de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI), Ed., 2017, pp. 2–12.