

# Problemas Complejos Resueltos con Metaheurísticas

German Dupuy, Eber Bezzone, Juan Barbero, Natalia Stark, Fernando Sanz Troiani,  
Hugo Alfonso, Carlos Bermudez, Carolina Salto<sup>1</sup>, Gabriela Minetti<sup>1</sup>  
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: <sup>1</sup>{saltoc,minettig@ing.unlpam.edu.ar}

**Resumen** Este proyecto de investigación se enfoca en el estudio de técnicas metaheurísticas para resolver distintos problemas de optimización. Una de las líneas de investigación está abocada al estudio de nuevas técnicas metaheurísticas y su adaptación para resolver problemas complejos de planificación. En particular se pone especial énfasis en metaheurísticas que simulan comportamientos sociales de distintas especies, tales como *Cuckoo Search*, *Bee Colony Algorithm*, *Migration Bird Optimization*, entre otros. Otra de las líneas de investigación se enfoca en el desarrollo de estrategias adaptativas para modificar la probabilidad de mutación sin control externo en algoritmos genéticos. De esta manera, se reduce considerablemente el tiempo dedicado a la configuración paramétrica. Una tercera línea de investigación apunta a examinar si la metaheurística *Problem Aware Local Search* (PALS), un método eficiente inicialmente propuesto para el problema de ensamblado de fragmentos de ADN, puede ser usado en otros dominios de aplicación y con otros problemas de optimización. También se analizan alternativas de diseño de los principales componentes para construir una versión de PALS eficiente y exacta y así resolver los problemas del nuevo dominio de aplicación de una manera competitiva. Por último, una línea de investigación se orienta a la propuesta de una nueva metodología, denominada HAPA, para tratar la configuración y evaluación del desempeño de los algoritmos genéticos distribuidos ejecutados sobre plataformas heterogéneas, con el objetivo de obtener una implementación eficiente y eficaz de este tipo de algoritmos.

**Palabras claves:** Metaheurísticas, algoritmos genéticos distribuidos, paralelismo, mutación, estrategias adaptativas, problemas complejos

## Contexto

Estas líneas de investigación se desarrollan en el marco de dos proyectos de investigación, llevados a cabo en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa. Uno de ellos acreditado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICTO 0278-2011) dirigido por la Dra. Salto, y el otro 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

Un gran número de problemas de optimización de la vida real en ciencia, ingeniería, economía y negocios son complejos y difíciles de resolver. Ellos no pueden solucionarse de manera exacta en tiempo razonable. Usar algoritmos aproximados, tales como las metaheurísticas, es la principal alternativa para resolver esta clase de problemas.

El surgimiento en los últimos años de nuevas técnicas metaheurísticas para resolución de problemas de optimización generan un ámbito de análisis de experimentación interesante. La característica que comparten estas metaheurísticas es que están basadas en el comportamiento social de distintas especies, como la formación del vuelo en V de las

aves en su fase migratoria, el parasitismo obligado de algunas especies de cucos poniendo sus huevos en los nidos de otras aves (de otras especies), entre otras ideas. La mayoría de estas metaheurísticas tienen una formulación para problemas de optimización continuo. Por lo tanto, su aplicación en la resolución de problemas combinatoriales, como lo son los problemas de planificación de la producción o de enrutamiento, plantea un desafío interesante en la comunidad científica.

Por otra parte, las metaheurísticas cuando se las enfrenta a problemas de optimización complejos y/o alta dimensionalidad pueden presentar una degradación en su efectividad para encontrar el óptimo y, en muchos casos, reducir su desempeño. Esta degradación motiva la necesidad de desarrollar estrategias más eficientes para explorar las áreas más prometedoras del espacio de soluciones. Las alternativas pueden variar entre incluir adaptaciones en los procesos de búsqueda, incorporar búsquedas locales específicas al problema en cuestión, o establecer paralelizaciones de las tareas desarrolladas.

Determinar qué metaheurística es la más adecuada para la resolución de un problema, cuál es la configuración apropiada de la misma o sobre qué plataforma se ejecuta son interrogantes que intentan responder las diferentes líneas de investigación abordadas en nuestro proyecto.

## Desarrollo

En las siguientes secciones se describen cada una de las líneas de investigación desarrolladas por este grupo de trabajo.

### Nuevas técnicas metaheurísticas

En esta línea de investigación se trabaja con nuevas técnicas metaheurísticas surgidas en los últimos años para resolver problemas de relevancia en la industria. En particular, se ha elegido el problema de planificación de *job shop* flexible (FJSSP), el cual es una extensión del problema de planificación *job shop* clásico y considerado un problema NP-duro [1]. En este problema una misma operación se puede procesar en más de una máquina y de esta manera hay varias máquinas alternativas disponibles para procesar un trabajo. Por lo tanto, el FJSSP consiste de dos subproblemas: (i) asignar

cada operación a una máquina del conjunto de máquinas posibles y (ii) secuenciar las operaciones asignadas en las máquinas.

En particular se ha avanzado en la puesta a punto de un algoritmo de búsqueda cuco (CS) [2], [3] para resolver este problema. CS está basado en el comportamiento de parasitismo obligado de algunas especies de cucos en combinación con el comportamiento de los vuelos de Lévy de algunas aves y de las moscas de la fruta. Se ha trabajado especialmente en definir la generación nuevas soluciones candidatas, las cuales se obtienen al perturbar una solución de la población siguiendo una distribución Lévy. Un vuelo Lévy se puede describir como un camino aleatorio en el cual el largo de paso (distancia entre dos soluciones) se decide por una función de distribución de probabilidades. Se usan tres movimientos u operadores diferentes los cuales son controlados por el valor generado por la distribución Lévy: intercambio, inserción e inversión. Estos operadores son tradicionales para el problema en cuestión y generan diferentes pasos en el movimiento. El movimiento de intercambio se usa para introducir pequeñas perturbaciones mientras que el movimiento de inserción realiza grandes saltos. El movimiento de inserción introduce perturbaciones intermedias.

Otro problema de relevancia en la industria es el problema de enrutamiento vehicular con capacidad (*Capacited Vehicle Routing Problem, CVRP*). Este problema se relaciona con la determinación de rutas óptimas (costos totales mínimos) usadas por una flota de vehículos para realizar entregas a los clientes desde un mismo depósito, considerando que todos los vehículos tienen una capacidad limitada e idéntica.

Para resolver CVRP se está estudiando la adaptación de la metaheurística conocida como optimización basada en la migración de las aves (MBO) al mismo [4]. MBO toma como referencia el comportamiento de las aves durante sus largos viajes migratorios. Cada solución desarrollada en la ejecución del algoritmo representa un ave en la formación de vuelo en V y se ve beneficiada por la solución que tiene enfrente. Por tal motivo al iniciar la ejecución del algoritmo el primer paso es establecer la organización de los integrantes de la bandada. De esta manera contamos con

una solución líder y con dos listas enlazadas que representarán a las ramas izquierda y derecha de la formación. Luego, el líder será el encargado de encabezar la búsqueda y de facilitar el trabajo a sus seguidores inmediatos, quienes harán lo mismo con los suyos, y así siguiendo hasta llegar al final de la formación.

### **Metaheurísticas con estrategias adaptativas**

La segunda línea de investigación está relacionada con la propuesta de estrategias para adaptar la probabilidad de mutación ( $p_m$ ) durante la búsqueda genética [5]. El objetivo de la estrategia propuesta, denominada APmGA, es incrementar la  $p_m$  si se pierde gradualmente la diversidad genética, con el fin de mantener una población distribuida en el espacio de búsqueda. Por el contrario, el valor  $p_m$  se reduce cuando se observa un incremento en la diversidad de la población. Por lo tanto, estos cambios en el valor de  $p_m$  son una fuente adicional para equilibrar exploración y explotación. Para lograr esto, la estrategia monitorea la diversidad genotípica presente en la población al usar la medida entrópica de Shannon [6]. A partir de esta propuesta [7] surge la necesidad de comparar diferentes métodos de adaptación de  $p_m$  durante la ejecución de un algoritmo genético (GA), y de esta manera determinar cuáles de ellos permite que el GA brinde resultados de alta calidad con un esfuerzo numérico reducido. El método propuesto es comparado con el presentado por Riff et al. [8], el cual se basa en las ideas de aprendizaje reforzado. Esto es, un operador recibe un premio en su probabilidad de uso cuando su aplicación genera un individuo mejor que sus padres. Análogamente, este recibe una penalidad cuando el hijo tiene un valor de fitness peor que los de sus progenitores. Tanto los premios como las penalidades dependen fuertemente de la mejora/degradación del resultado de la función de evaluación. El último método a comparar está basado en la idea de Srinivas et al. [9], donde las probabilidades de mutación son variadas dependiendo de los valores de fitness de la solución. Es decir que, las soluciones con alto valor de fitness son protegidas, mientras que las soluciones con fitness por debajo de la media sufren una variación genética importante. Estas tres estrategias adaptativas son consideradas debido a que difieren en la información de la búsqueda

para actualizar el valor de probabilidad y a su rendimiento.

### **Metaheurísticas diseñadas específicamente para resolver un determinado problema**

Problem Aware Local Search es una metaheurística basada en trayectoria, propuesta por Alba y Luque [10], que fue inicialmente desarrollada para resolver el problema de ensamblado de fragmentos de ADN, un problema de optimización combinatoria NP-duro. PALS realiza una explotación exhaustiva y sistemática del vecindario de la solución tentativa a considerarse. Una característica clave de este algoritmo es que las soluciones vecinas son explotadas eficientemente por medio de un cálculo de fitness muy rápido basado en los cambios realizados en la solución, en lugar de la evaluación completa del nuevo valor de fitness. Esto permite que PALS examine un gran número de soluciones tentativas muy rápidamente, analizando más exhaustivamente el espacio de búsqueda y así obtener resultados de gran calidad.

Dado que el poder de esta metaheurística, aún, no ha sido completamente explotado, en esta línea de investigación se estudia si PALS puede ser eficientemente empleado para resolver otros problemas de optimización combinatoria [11]. Los problemas elegidos son importantes tanto en la ciencia como en el ámbito empresarial, a saber: el problema de asignación cuadrática, el problema de planificación de flujo y el problema de mochilas múltiples.

Por otra parte PALS ofrece un marco general de búsqueda el cual puede instanciarse de acuerdo a algún diseño alternativo, pero, actualmente, la literatura no muestra un análisis de los puntos de diseño clave de esta metaheurística. En consecuencia en esta línea de investigación también se proponen y analizan diferentes puntos de diseño para PALS. Los cuales incluyen diferentes estrategias para generar la solución inicial, distintos criterios para agregar y seleccionar movimientos al y del conjunto de soluciones candidatas, operadores de variación apropiados para generar movimientos en las soluciones candidatas y la definición de funciones de evaluación parcial del fitness según el problema. Esto da origen a un total de 81 configuraciones distintas de PALS.

### **Metaheurísticas distribuidas**

Por último, una línea de investigación se orienta

a la propuesta de una nueva metodología, denominada *Hardware Aware Parallel Algorithms* (HAPA) [12], [13], para tratar la configuración y evaluación del desempeño de los algoritmos genéticos distribuidos ejecutados sobre plataformas de cómputo heterogéneas, con el objetivo de obtener una implementación eficiente y eficaz de este tipo de algoritmos.

Las investigaciones más recientes de algoritmos genéticos distribuidos sobre plataformas heterogéneas [14], [15], [16], [17], [18] se enfocan en la resolución de un determinado problema, y no en la metodología que podría aplicarse cuando es necesario usar hardware heterogéneo. En este sentido, nuestra propuesta consta de un nuevo procedimiento metodológico, y el consecuente diseño algorítmico. El objetivo de HAPA es facilitar una implementación eficiente y numéricamente precisa de algoritmos genéticos distribuidos (dGA) sobre un conjunto de máquinas con diferentes procesadores, tamaños de memoria principal, y sistemas operativos. HAPA consta de tres fases: (i) el cálculo de un ranking de los procesadores con el fin de conocer la plataforma (*offline*), (ii) el diseño de algoritmos derivados de la fase anterior, y (iii) la validación de un dGA (*online*). En particular se ha aplicado la metodología HAPA para regular las condiciones de parada del dGA y la frecuencia de la migración de dicho algoritmo.

## Resultados obtenidos

A continuación se detallan los resultados obtenidos por cada una de las líneas de investigación abordadas.

### Nuevas técnicas metaheurísticas

CS resultó ser una técnica fácil de trabajar para la resolución del FJSSP, ya que necesita de muy pocos parámetros para su funcionamiento. Los resultados obtenidos han sido prometedores para las instancias del problema analizadas, resultando un algoritmo competitivo en cuanto a cantidad de soluciones óptimas reportadas como en el esfuerzo computacional incurrido.

El análisis de los resultados obtenidos, al resolver CVRP usando MBO, establece que esta metaheurística es robusta a la hora de considerar

instancias de prueba de diferente tamaño. Además brinda soluciones de alta calidad, dado que los errores con respecto al óptimo son menores al 6 %. Por último, también se concluye que es una herramienta eficiente ya que encuentra las mejores soluciones en menos de 170 iteraciones.

### Metaheurísticas con estrategias adaptativas

Las estrategias de control consideradas para actualizar la probabilidad de mutación reducen el tiempo previo de puesta a punto para determinar el valor de probabilidad que más favorezca al desempeño del GA. En tanto que, los resultados obtenidos por nuestra propuesta APmGA comparados con los de la literatura, AcGA y AGA, son muy alentadores, dado que permiten obtener soluciones de mayor calidad que los otros con un esfuerzo numérico razonable. Esto se debe a que el tiempo computacional dedicado al cálculo de la probabilidad no es significativo.

### Metaheurísticas diseñadas específicamente para resolver un determinado problema

Los resultados obtenidos por PALS, bajo cada una de las 81 configuraciones, en la resolución de los diferentes problemas de optimización combinatoria prueban que tiene la habilidad para resolverlos eficientemente. Por lo tanto, las fronteras de PALS han sido exitosamente expandidas a otros dominios. Además, esto se logra bajo configuraciones similares de los puntos de diseño algorítmicos. Esto ayuda a reducir el tiempo requerido para determinar la mejor configuración para PALS.

A partir de este estudio, también, puede concluirse que PALS permite que el diseñador logre fácilmente un correcto equilibrio entre la intensificación y la diversificación. La primera se logra por medio del elitismo usado a la hora de generar la solución inicial y de agregar movimientos al conjunto de soluciones candidatas. En tanto que la diversificación se alcanza a través de la aplicación del operador de variación.

### Metaheurísticas distribuidas

De las pruebas realizadas para evaluar el desempeño de HAPA respecto de un dGA ejecutado en un entorno homogéneo, se concluye que: la calidad de la solución es comparable con la obtenida usando una plataforma homogénea, pero lo más importante es que se logra una disminución del esfuerzo numérico y, consecuentemente, del tiempo de ejecución para hallar dichas

soluciones cuando HAPA se aplica en ambientes heterogéneos. En resumen, este trabajo aporta una forma de evitar el diseño *ad-hoc* de algoritmos para plataformas heterogéneas, también se abre una nueva línea de investigación sobre la forma de inyectar conocimientos de hardware en los parámetros del software de los algoritmos. Además de ser una propuesta innovadora, se ha demostrado que es numéricamente competitiva y que los tiempos de ejecución son reducidos.

## 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. Actualmente, tres becarios alumnos desarrollan sus tareas dentro del marco del proyecto (1 beca CIN y las restantes de Universidad). Durante el transcurso del año 2016 se dirigió una tesis de grado (defendida en diciembre de 2016) y otros dos trabajos los cuales se encuentran en estado avanzado de desarrollo. Por otra parte, los docentes-investigadores que integran el proyecto realizaron diversos cursos de posgrado relacionados con la temática del proyecto, con el objetivo de sumar los créditos necesarios para cursar carreras de posgrado.

## REFERENCIAS

- [1] E. Garey, D.S. Johnson, and R. Sethi, "The complexity of flow-shop and job-shop scheduling," *Mathematics of Operations Research*, vol. 1, pp. 117–129, 1976.
- [2] X.-S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights," in *Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NABIC '09)*, 2009, pp. 210–214.
- [3] D. S. Yang X-S, "Engineering optimisation by cuckoo search," *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, vol. 1, no. 4, pp. 330–343, 2010.
- [4] E. Duman, M. Uysal, and A. F. Alkaya, "Migrating birds optimization: A new metaheuristic approach and its performance on quadratic assignment problem," *Inf. Sci.*, vol. 217, pp. 65–77, Dec. 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2012.06.032>
- [5] N. Stark, G. Minetti, and C. Salto, "Comparison of different approaches for adapting mutation probabilities in genetic algorithms," in *XXII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2016, pp. 75–84.
- [6] C. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 1948.
- [7] E. Alba and B. Dorronsoro, "The exploration/exploitation tradeoff in dynamic cellular genetic algorithms," *Proceedings of IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 126–142, 2005.
- [8] E. Montero and M.-C. Riff, "On-the-fly calibrating strategies for evolutionary algorithms," *Information Sciences*, vol. 181, no. 3, pp. 552–566, 2011.
- [9] M. Srinivas and L. Patnaik, "Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 4, pp. 656–667, 1994.
- [10] G. Luque and E. Alba, "Metaheuristics for the dna fragment assembly problem," *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 1, no. 2, pp. 98–108, 2005.
- [11] G. Minetti, Gabriela F. and Luque and E. Alba, "The problem aware local search algorithm: an efficient technique for permutation-based problems," *Soft Computing*, pp. 1–14, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-017-2515-9>
- [12] C. Salto and E. Alba, "Adapting distributed evolutionary algorithms to heterogeneous hardware," *Trans. Computational Collective Intelligence*, vol. 19, pp. 103–125, 2015.
- [13] —, "Propuesta metodológica para el diseño de metaheurísticas paralelas en ambientes de cómputo heterogéneo," in *Actas de la XVII Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial*, 2016, pp. 301–302.
- [14] J. W. B. Jr. and S. V. Kumar, "Asynchronous genetic algorithms for heterogeneous networks using coarse-grained dataflow," in *GECCO*, ser. Lecture Notes in Computer Science, E. Cantˆo-Paz, J. A. Foster, K. Deb, L. Davis, R. Roy, U.-M. O'Reilly, H.-G. Beyer, R. K. Standish, G. Kendall, S. W. Wilson, M. Harman, J. Wegener, D. Dasgupta, M. A. Potter, A. C. Schultz, K. A. Dowsland, N. Jonoska, and J. F. Miller, Eds., vol. 2723. Springer, 2003, pp. 730–741.
- [15] M. García-Arenas, J. J. Merelo Guervós, P. Castillo, J. L. J. Laredo, G. Romero, and A. M. Mora, "Using free cloud storage services for distributed evolutionary algorithms," in *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, ser. GECCO '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 1603–1610. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2001576.2001792>
- [16] Y. Gong, M. Nakamura, and S. Tamaki, "Parallel genetic algorithms on line topology of heterogeneous computing resources," in *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, ser. GECCO '05. New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 1447–1454. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1068009.1068239>
- [17] K. Meri, M. G. Arenas, A. M. Mora, J. J. Merelo, P. A. Castillo, P. García-Sánchez, and J. L. J. Laredo, "Cloud-based evolutionary algorithms: An algorithmic study," *Natural Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 135–147, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11047-012-9358-1>
- [18] S. Mostaghim, J. Branke, A. Lewis, and H. Schmeck, "Parallel multi-objective optimization using master-slave model on heterogeneous resources," in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, 2008, pp. 1981–1987.