

Resolución de problemas regionales NP-duros usando técnicas de optimización

Carolina Salto^{2,3}, Gabriela Minetti², Hugo Alfonso², Carlos Bermúdez², M. Juliana Dielschneider Del Bono², Luciano Bessoni², Javier Vargas², José Luis Hernández¹, Mercedes Carnero¹

¹ Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Río Cuarto

² Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)

Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa – ³ CONICET

e-mail: {saltoc, minettig, alfonsoh, bermudezc, juliana, jvargas}@ing.unlpam.edu.ar
{mcarnero,jlh}@ing.unrc.edu.ar

Resumen

En este artículo se introducen dos de las líneas de investigación que se desarrollan en el Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LISI), relacionadas con problemas de optimización NP-duros de carácter regional: diseño de redes distribución de agua y logística de distribución de carga y paquetería.

En la actualidad, las empresas públicas de suministro de agua proporcionan más del 90% del abastecimiento mundial, por lo que un sistema seguro de distribución de agua es fundamental para cualquier ciudad. La importancia, el enorme costo de capital del sistema y el creciente tamaño de las ciudades conducen a la optimización de la red de distribución de agua. En esta línea de investigación, se proponen y analizan dos algoritmos metaheurísticos para optimizar el diseño de la red de agua de un nuevo barrio de la ciudad de General Pico, con el objetivo de minimizar el costo total de la inversión.

La logística remite a flujos de materiales y de información; a lugares de manipulación, depósito y transformación de las mercancías; a redes y nodos de circulación; y a tiempos de movimiento y de espera que responden a aspectos materiales (las infraestructuras, los transportes y las cargas) y también a aspectos funcionales (los servicios, las normativas y regulaciones). En suma, la logística implica un uso del territorio en el tiempo, una convergencia espacio-temporal, una organización y sincronización de flujos a través de estrategias sobre los nodos y las redes. La Provincia de La Pampa cuenta con gran potencial para constituirse

en un centro logístico de distribución a nivel nacional, por ello se considera importante que esté consolidada en la búsqueda de propuestas innovadoras para introducir al sector. En consecuencia, la segunda línea de investigación se enfoca en modelar las características de la logística de distribución de cargas y paquetería en la región con el objetivo de minimizar los costos operativos y maximizar la calidad del servicio.

Palabras claves: Optimización, Logística, Inteligencia Artificial, Diseño de redes

CONTEXTO

Desde su creación en 1998, el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI), perteneciente a la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam), se ha abocado al estudio de algoritmos cada vez más eficientes para la solución de problemas complejos, tanto de optimización como de diseño. Actualmente, dos de sus líneas de investigación están relacionadas con la resolución de problemas de optimización NP-duros de la región de influencia de dicho laboratorio: diseño óptimo de redes de distribución de agua y optimización de la logística de distribución de cargas y paquetería. Estas líneas de investigación se desarrollan en el marco de dos proyectos de investigación: "Big data optimization con algoritmos metaheurísticos utilizando frameworks de computación distribuida", acreditado por la FI, y "Optimización de la logística de distribución utilizando técnicas de la Inteligencia Artificial" (POIRE), acreditado por la UNLPam.

En ambas líneas, el objetivo principal consiste en obtener algoritmos inteligentes que, además de brindar soluciones de calidad a las problemáticas planteadas con poco esfuerzo computacional, requieran bajo costo de implementación. Cabe destacar que desde hace varios años, los integrantes de este laboratorio mantienen una importante vinculación con investigadores de universidades argentinas (Universidad Nacional de San Luis y Universidad Nacional de Río Cuarto-UNRC) y de la Universidad de Málaga (España), con quienes se realizan trabajos conjuntos. En particular este trabajo se desarrolló con investigadores de la UNRC.

La primera línea de investigación, diseño de redes de agua, se enmarca en la ciudad de General Pico, donde el agua potable proviene de unas 100 perforaciones para extracción del acuífero subterráneo que se extiende desde General Pico a la localidad de Dorila, uno de los pocos recursos hídricos accesibles y aptos para el consumo. Cada pozo extrae un promedio de 9000 litros/hora. El agua extraída se transporta hasta una cisterna principal subterránea, que junto a otras cinco cisternas abastecen a toda la ciudad. Todo esto contribuye a que la optimización del diseño de redes de distribución de agua para nuevos barrios sea un problema de alta complejidad.

La segunda línea de investigación, logística de distribución de carga, se encuadra en la Provincia de La Pampa situada en el centro geográfico de la República Argentina y considerada la puerta de ingreso a la Región Patagónica. Por ende, cuenta con gran potencial para constituirse en un centro logístico de distribución para el territorio argentino. Dado que los costos de transporte se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales, mejorar la eficiencia mediante la máxima utilización del equipo de transporte y de su personal es una preocupación importante. Un problema frecuente en la toma de decisiones es reducir los costos de transporte y mejorar el servicio al cliente encontrando las mejores rutas.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño óptimo de redes de distribución de agua potable y la optimización de la logística de distribución de cargas y paquetería son problemas de decisión complejos del mundo real que, mode-

lados como problemas de optimización, pertenecen a la clase NP-Duros.

El objetivo del problema de optimización del diseño de redes de distribución de agua (Water Distribution Network Design Optimization - WDND) es minimizar el costo total de inversión (Total Investment Cost - TIC) de una red de distribución de agua. Un grafo conexo conformado por un conjunto de nodos $N = \{n_1, n_2, \dots\}$, un conjunto de tuberías $P = \{p_1, p_2, \dots\}$, un conjunto de subredes o loops internos $L = \{l_1, l_2, \dots\}$, y un conjunto de tipos de tuberías disponibles en el mercado $T = \{t_1, t_2, \dots\}$ representan la red de agua. A partir de este modelo, se minimiza el costo total de la inversión, siguiendo la fórmula mostrada en la Ecuación 1.

$$\min TIC = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} L_p IC_t x_{p,t} \quad (1)$$

donde IC_t es el costo de un tubo p del tipo t , L_p es la longitud del tubo y $x_{p,t}$ en una variable binaria que indica si el tubo p es del tipo t o no. Función restringida por las leyes físicas de conservación de masa y energía, la demanda de presión mínima en cada nodo y la máxima velocidad en la tubería, en cada momento $\tau \in \mathcal{T}$.

En el campo de la investigación operativa [1], la optimización de la logística de distribución de cargas y paquetería se agrupa en la clase de problemas del enrutamiento vehicular (VRP, sus siglas en Inglés) [2]. El VRP clásico consiste en determinar las rutas que debe tomar una determinada flota de vehículos para recolectar y/o distribuir artículos en ubicaciones conocidas de clientes. Cada artículo suele tener asociado un determinado tamaño o peso. La cantidad total (en términos de tamaño o peso) de los artículos recolectados por un vehículo no puede exceder su capacidad. En esta versión de VRP, se supone que todos los datos (demandas del cliente, tiempos de viaje, ventanas de tiempo, etc.) se conocen de antemano. El responsable de la toma de decisiones, tanto en grandes compañías como en pequeñas empresas, debe planificar con anticipación las rutas de los vehículos para satisfacer las demandas de los clientes a un costo de viaje mínimo. El costo del viaje puede incluir, entre otros: tiempo de viaje, horas hombre, viáticos, combustible y peajes [3], [4]. Desafortunadamente, el VRP es fuertemente NP-duro incluso para un

solo objetivo, ya que el problema del viajante de comercio (TSP, por sus siglas en inglés) [5] puede reducirse polinomialmente a él [6].

En el VRP clásico se establecen rutas de menor costo desde un depósito central a un conjunto de puntos dispersos geográficamente (clientes, tiendas, escuelas, ciudades, almacenes, etc.) con diversas demandas. Cada cliente debe ser atendido exactamente una vez por un solo vehículo, y cada vehículo tiene una capacidad limitada. Una extensión más realista es el Problema de generación de rutas para vehículos con ventanas de tiempos (VRPTW), que cuenta con muchas aplicaciones en el mundo real; aquí se asocia una ventana de tiempo a cada cliente. Es decir, además de la restricción de capacidad del vehículo, cada cliente proporciona un marco de tiempo dentro del cual se debe completar un servicio o tarea en particular, como cargar o descargar un vehículo. Un vehículo puede llegar temprano, pero debe esperar hasta que sea posible la hora de inicio del servicio. El objetivo del VRPTW es minimizar la cantidad de vehículos y la distancia total recorrida para atender a los clientes sin violar las limitaciones de capacidad y ventana de tiempo.

La resolución de estos problemas de alta complejidad requiere de métodos eficaces, confiables y fáciles de usar que, además de tener en cuenta los costos de capital y operativos, consideren el rendimiento, la confiabilidad hidráulica y la gestión competente de la energía en el caso de WDND y la satisfacción del cliente y la fiabilidad del sistema para el VRPTW. En consecuencia, las técnicas de solución capaces de producir soluciones de alta calidad en un tiempo limitado, como las heurísticas y las metaheurísticas [7], son de primordial importancia. Estas técnicas, que pertenecen a la clase de algoritmos de búsqueda estocásticos, reducen de forma significativa la complejidad temporal del proceso de búsqueda. Por otro lado, la paralelización de la búsqueda, además de disminuir los tiempos, permite aumentar la calidad de las soluciones halladas. Esto implica el estudio de diferentes plataformas actuales de hardware (procesadores multicore, unidades de procesamiento gráficas, ambientes cloud) y de software (Hadoop, Spark, MPI, High Processing Computing en general).

II. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

En esta sección se presenta el tratamiento dado a los problemas, WDND y VRP, abordados en cada una de las líneas de investigación enunciadas anteriormente.

A. Diseño de redes de distribución de agua

Actualmente, las formulaciones de WDND incluyen la extensión a múltiples períodos, es decir, patrones de demanda que varían en el tiempo, que son formulaciones de problemas realistas, pero también más complejas que las tradicionales. Algunos trabajos expresaron el problema de diseño como un problema de optimización multiobjetivo y aplicaron un algoritmo evolutivo multiobjetivo [8]. También se desarrolló un algoritmo genético para resolver seis pequeñas redes [9], considerando la restricción de velocidad del agua que fluye a través de las tuberías. En [10] también consideraron esta restricción, pero los autores usaron programación matemática en redes más grandes y más cercanas a la realidad. Los autores en [11], [12] utilizaron otras metaheurísticas para abordar formulaciones de WDND más complejas. En la búsqueda local iterativa (ILS) presentada en [13] se consideró que cada nodo de demanda tiene un patrón de demanda de agua de 24 horas, incluyendo una nueva restricción relacionada con el límite de la velocidad máxima del agua a través de las tuberías.

El crecimiento de las ciudades también requiere de este complejo proceso de diseño, como es el caso de General Pico (La Pampa, Argentina). En particular, se necesita optimizar un WDND independiente de un nuevo barrio de cinco km^2 , sujeto a demandas multiperiodo, restricciones hidráulicas, entre otras restricciones. Una cooperativa pública está a cargo de distribuir este elemento esencial en esta ciudad, lo que requiere un sistema de optimización para determinar la mejor solución de ingeniería que cumpla con los criterios de diseño establecidos y minimice los costos de capital. Nuestro objetivo de investigación es desarrollar una solución óptima basada en algoritmos de optimización de última generación, que pretenda apoyar la toma de decisiones para diseñar, planificar y gestionar sistemas de agua complejos.

Proponemos y comparamos metaheurísticas basadas en *Tabu Search* (TS) y *Simulated Annealing* (SA) para resolver el problema WDND, op-

timizando los diámetros de las tuberías y minimizando el costo total de inversión. El método basado en TS, llamado SOTS (*Strategic Oscillations Tabu Search*), adapta la técnica constructivo-destructiva llamada Oscilación Estratégica [14] para mejorar las capacidades de intensificación y diversificación de la búsqueda. Se utiliza un algoritmo de optimización híbrido basado en *Simulated Annealing* (HSA) [15] mejorado con un procedimiento de búsqueda local basado en GRASP [13] para minimizar el costo de la red de agua. Probamos el rendimiento de SOTS y HSA con una red de distribución de tamaño medio del mundo real. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes: *i*) La adaptación de la técnica SO ad hoc al problema WDND (fases constructiva y destructiva de SOTS), y *ii*) Resolución de una red de distribución del mundo real.

B. Logística de la distribución de cargas y paquetería

Para abordar este problema de optimización relacionado con la logística de distribución de cargas y paquetería, se propone el desarrollo de software logístico, que incorpore herramientas basadas en inteligencia artificial, como soporte para la toma de decisiones a nivel gerencial y asistido por herramientas que permitan evaluar la incidencia de la matriz de costos y buscar el equilibrio del sistema. Debe ser capaz de diseñar rutas de distribución eficientes para incrementar la eficiencia operacional, reducir costos y aumentar la satisfacción de los clientes. Además, se pretende determinar los factores de costos relacionados a cada ruta planificada, su clasificación en cuanto a variabilidad y la asignación de un valor, para estudiar la incidencia de cada uno de ellos en el costo total de dicha ruta y contar con información importante para la toma de decisiones. El VRPTW ha recibido mucha atención debido a la aplicabilidad de las restricciones de ventana de tiempo en situaciones del mundo real. Se trata de un problema NP-Completo y las instancias con 100 clientes o más son muy difíciles de resolver de manera óptima. Representamos el VRPTW como un problema multiobjetivo, en el que las dos dimensiones objetivas son la cantidad de vehículos y el costo total (distancia). Una ventaja de este enfoque es que no es necesario derivar pesos para

una fórmula de puntuación de suma ponderada. Esto evita la introducción de un sesgo de solución hacia cualquiera de las dos dimensiones.

Muchos investigadores han propuesto técnicas exactas para resolver este problema, pero ha sido Kohl [16] quien ha introducido uno de los métodos exactos más eficientes para el VRPTW; al resolver varias instancias de hasta 100 clientes. Sin embargo, el costo computacional de estos métodos es muy alto, siendo los métodos aproximados, como las metaheurísticas, los que han resuelto este inconveniente (algoritmos genéticos, estrategias evolutivas, enfriamiento simulado, búsqueda tabú, entre otras) [17], [18], [19]). Debido a que resolver eficientemente las instancias de VRPTW con más de 100 clientes sigue siendo un desafío, en nuestra línea de investigación se propone combinar las ventajas de las metaheurísticas multiobjetivo con heurísticas exactas para obtener soluciones de calidad con bajo costo computacional.

III. RESULTADOS ENCONTRADOS Y ESPERADOS

En esta sección se muestran y analizan, en primer lugar, los resultados hallados a partir de la concreción de los objetivos propuestos en la primera línea de investigación. En segundo lugar, se describe qué resultados se esperan obtener en la línea de trabajo orientada a VRP.

A. Diseño de redes de distribución de agua

A continuación se analiza el desempeño de los algoritmos propuestos para optimizar el WDND de un nuevo barrio en la ciudad de General Pico: SOTS y HSA. El algoritmo SOTS puede iniciar la búsqueda de soluciones con costos de inversión totales muy altos y alcanza buenas soluciones en las primeras etapas de la búsqueda, con un esfuerzo computacional relativamente bajo en comparación con la heurística HSA. Esto se debe principalmente a la fase de destrucción inteligente implementada. Sin embargo, a medida que avanza la búsqueda, la disminución de los costos totales de inversión encontrados se hace menor, la capacidad exploratoria disminuye y aumenta la cantidad de veces que se ejecuta la función de evaluación. Un comportamiento similar se puede observar en HSA. Las herramientas disponibles para evitar mínimos locales son diferentes para los dos métodos: memoria a corto plazo y memoria a largo plazo en el caso de

SOTS, y aceptación de peores soluciones cuando la temperatura es alta en el caso de HSA. Considerando que el espacio de posibles soluciones para el problema dado es del orden de 10^{256} , la posibilidad de explorar diferentes regiones del problema utilizando una sola técnica de búsqueda es limitada, y los esfuerzos para diseñar algoritmos para el WDND podrían considerar estrategias cooperativas entre los dos métodos. El trabajo futuro tiene como objetivo desarrollar algoritmos híbridos, combinando las ventajas de SOTS y HSA y así minimizar sus debilidades.

B. Logística de la distribución de cargas y paquetería

A partir de las características del VRPTW relevadas en la región pampeana y del problema modelado en consecuencia, se está en proceso del diseño e implementar un software logístico como soporte para la toma de decisiones a nivel gerencial de empresas que incluyan en sus actividades tareas de distribución de cargas y paquetería. Dicha tecnología permitirá, a partir de la consideración de las distintas variables y restricciones, conseguir el mayor rendimiento y eficacia en los procesos logísticos. Para determinar la eficacia del software logístico desarrollado para resolver el VRPTW, se utilizará un conjunto de datos de referencia bien conocidos. Se esperan hallar soluciones competitivas con las más conocidas en la literatura, así como también posibles nuevas soluciones que no estén sesgadas hacia algunos de los objetivos (cantidad de vehículos y el costo total).

IV. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

Cada año se incorporan al LISI alumnos avanzados en la carrera Ingeniería en Sistemas como becarios de investigación y también para realizar trabajos finales de carrera. El trabajo con problemas actuales y regionales favorece la formación de los recursos humanos en la actividad de transferencia de los resultados de la investigación desarrollada. También es importante resaltar la interdisciplinariedad en el tratamiento de las distintas propuestas ya que permite vincular áreas ingenieriles. 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] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, 9th ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2012.
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
- [3] S. Chopra and P. Meindl, *Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia Planeación y Operación*, 5th ed. Pearson, 2013.
- [4] R. Ballou, *LOGÍSTICA. Administración de la cadena de suministros*, 5th ed. Pearson, 2004.
- [5] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson, "Solution of a large-scale traveling-salesman problem," *Journal of the Operations Research Society of America*, vol. 2, no. 4, pp. 393–410, 1954. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/166695>
- [6] J. K. Lenstra and A. H. G. R. Kan, "Complexity of vehicle routing and scheduling problems," *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 221–227, 1981. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/net.3230110211>
- [7] E. Talbi, *Metaheuristics: from Design to Implementation*. Wiley, 2009.
- [8] R. Farmani, G. A. Walters, and D. A. Savic, "Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 131, no. 3, pp. 161–171, 2005.
- [9] I. Gupta, A. Gupta, and P. Khanna, "Genetic algorithm for optimization of water distribution systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 14, no. 5, pp. 437–446, 1999.
- [10] C. Bragalli, C. D'Ambrosio, J. Lee, A. Lodi, and P. Toth, "On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach," *Optimization and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 219–246, 2012.
- [11] R. Uma, "Optimal design of water distribution network using differential evolution," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 5, no. 11, pp. 1515–1520, 2016.
- [12] R. Mansouri and M. Mohamadizadeh, "Optimal design of water distribution system using central force optimization and differential evolution," vol. 7, no. 3.
- [13] A. De Corte and K. Sørensen, "Hydrogen," available online:
- [14] M. Carnero, J. Hernández, and M. Sánchez, "A new meta-heuristic based approach for the design of sensor networks," *Computers Chemical Engineering*, vol. 55, pp. 83–96, 2013.
- [15] C. Bermúdez, C. Salto, and G. Minetti, "Designing a multi-period water distribution network with a hybrid simulated annealing," in *XLVIII JAIIO: XX Simposio Argentino de Inteligencia Artificial (ASAI 2019)*. Universidad Nacional de Salta, 2019, pp. 39–52.
- [16] N. Kohl, "Exact methods for time constrained routing and related scheduling problems," 1995.
- [17] B. Ombuki, B. Ross, and F. Hanshar, "Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows," *Applied Intelligence*, vol. 24, pp. 17–30, 02 2006.
- [18] V. F. Yu, H. Susanto, P. Jodiawan, T.-W. Ho, S.-W. Lin, and Y.-T. Huang, "A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with parcel lockers," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20 764–20 782, 2022.
- [19] J.-F. Cordeau and G. Laporte, *Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem*. Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 145–163. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/0-387-23667-8_6