

Título: Optimización Multi-objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real

Autor: Dr. Javier López

Fecha : 29 de mayo de 2013

Directores: Prof. Lic. Laura C. Lanzarini, Prof. Dr. Guillermo Leguizamón

FACULTAD DE INFORMATICA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Resumen de tesis presentada para obtener el grado de Doctorado en Ciencias Informáticas

Motivación

Resolver problemas es una motivación importante. Que esos problemas se encuentren entre los problemas más complejos que existen, es un impulso adicional para enfrentarlos.

La optimización de problemas es un terreno fértil en un mundo que se caracteriza por contar con recursos escasos (naturales, económicos, tecnológicos, infraestructura, sociales, tiempo, etc.). Hacer el mejor uso posible de estos recursos en una tarea, a la vez, importante y difícil. Ofrecer soluciones de calidad, aunque no necesariamente sean las mejores, implica que los recursos excedentes, frutos de la optimización, puedan utilizarse en nuevos productos o servicios.

La gran mayoría del software que utilizan las empresas tiene como misión principal la automatización de tareas repetitivas. Una minoría de aplicaciones de software se utiliza como soporte a la toma de decisiones de un decisor humano. Una porción ínfima de artefactos de software son capaces de ofrecer cual es la decisión adecuada para un problema complejo.

Es en este último grupo donde se encuentran las técnicas estudiadas en esta tesis. La implementación en el mundo real de algoritmos de búsqueda y optimización se hace necesaria y evidente a medida que aumenta la complejidad de los procesos, las empresas y gobiernos sufren una presión constante para ser más competitivos y eficientes, y los recursos disponibles se presentan como escasos ante una demanda en permanente aumento.

Las metaheurísticas están pensadas para ofrecer una solución a este tipo de problemas pertenecientes a la clase de complejidad NP. Si bien son soluciones aproximadas, no exactas, en general son lo suficientemente buenas como para que su utilidad sea valiosa.

Resumen

Cuando hablamos de optimización en el ámbito de las ciencias de la computación hacemos referencia al mismo concepto coloquial asociado a esa palabra, la concreción de un objetivo utilizando la menor cantidad de recursos disponibles, o en una visión similar, la obtención del mejor objetivo posible utilizando todos los recursos con los que se cuenta.

Los métodos para encontrar la mejor solución (óptima) varían de acuerdo a la complejidad del problema enfrentado. Para problemas triviales, el cerebro humano posee la capacidad de resolverlos (encontrar la mejor solución) directamente, pero a medida que aumenta la complejidad del problema, se hace necesario contar con herramientas adicionales.

En esta dirección, existe una amplia variedad de técnicas para resolver problemas complejos. Dentro de estas técnicas, podemos mencionar las técnicas exactas. Este tipo de algoritmos son capaces de encontrar las soluciones óptimas a un problema, pero son computacionalmente muy costosas. Como contrapartida, requiere que el problema a resolver cumpla con condiciones bastante restrictivas.

Existen además un conjunto muy amplio de técnica aproximadas, conocidas como metaheurísticas. Estas técnicas se caracterizan por integrar de diversas maneras procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio de búsqueda del problema. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales, especialmente en espacios de búsqueda complejos.

Este tipo de procedimientos se caracterizan por ser aplicables a cualquier tipo de problemas, sin requerir ninguna condición particular a cumplir por los mismos. Estas técnicas no garantizan en ningún caso la obtención de los valores óptimos de los problemas en cuestión, pero se ha demostrado que son capaces de alcanzar muy buenos valores de soluciones en períodos de tiempo cortos. Además, es posible aplicarlas a problemas de diferentes tipos sin mayores modificaciones, mostrando su robustez y su amplio espectro de uso.

La mayoría de estas técnicas están inspiradas en procesos biológicos y/o físicos, y tratan de simular el comportamiento propio de estos procesos que favorecen la búsqueda y detección de soluciones mejores en forma iterativa. La más difundida de estas técnicas son los algoritmos genéticos, basados en el mecanismo de evolución natural de las especies.

Existen diferentes tipos de problemas, y multitud de taxonomías para clasificar los mismos. En el alcance de este trabajo nos interesa diferenciar los problemas en cuanto a la cantidad de objetivos a optimizar. Con esta consideración en mente, surge una primera clasificación evidente, los problemas mono-objetivo, donde existe solo una función objetivo a optimizar, y los problemas multi-objetivo donde existe más de una función objetivo. En el presente trabajo se estudia la utilización de metaheurísticas evolutivas para la resolución de problemas complejos, con uno y con más de un objetivo. Se efectúa un análisis del estado de situación en la materia, y se proponen nuevas variantes de algoritmos existentes, validando que las mismas mejoran resultados reportados en la literatura.

En una primera instancia, se propone una mejora a la versión canónica y mono-objetivo del algoritmo PSO, luego de un estudio detallado del patrón de movimientos de las partículas en el espacio de soluciones. Estas mejoras se proponen en las versiones de PSO para espacios continuos y para espacios binarios. Asimismo, se analiza la implementación de una versión paralela de esta técnica evolutiva.

Como segunda contribución, se plantea una nueva versión de un algoritmo PSO multiobjetivo (MOPSO Multi Objective Particle Swarm Optimization) incorporando la posibilidad de variar dinámicamente el tamaño de la población, lo que constituye una contribución innovadora en problemas con más de una función objetivo.

Por último, se utilizan las técnicas representativas del estado del arte en optimización multi-objetivo aplicando estos métodos a la problemática de una empresa de emergencias médicas y atención de consultas domiciliarias. Se logró poner en marcha un proceso de asignación de móviles a prestaciones

médicas basado en metaheurísticas, logrando optimizar el proceso de asignación de móviles médicos a prestaciones médicas en la principal compañía de esta industria a nivel nacional.

Objetivos

A continuación, se enumeran los objetivos de la presente tesis.

1. Estudiar el estado de avance actual de las metaheurísticas basadas en Inteligencia de Enjambres.
2. Evaluar las ventajas de la paralelización de las mismas.
3. Proponer mejoras incrementales a los algoritmos del tipo Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO - Particle Swarm Optimization), en sus versiones para espacios continuos y para espacios binarios.
4. Estudiar los conceptos centrales de la optimización multi-objetivo.
5. Proponer mejoras a los algoritmos del tipo MOPSO (Multi - Objective Particle Swarm Optimization), comparando los resultados con metaheurísticas representativas del estado del arte.
6. Diseñar, desarrollar e implementar una herramienta de software para optimizar la atención domiciliaria de una empresa de emergencias médicas, basada en metaheurísticas evolutivas multi-objetivo.

Contribuciones

Entre las contribuciones del presente trabajo podemos destacar:

1. Relevamiento general de las técnicas de optimización.
2. Análisis de la optimización global (mono-objetivo) y con más de un objetivo (multi-objetivo), incluyendo para cada una aplicaciones y medidas de desempeño.
3. Implementación de una versión paralela del algoritmo PSO, en una red de computadoras heterogéneas y de bajo costo.
4. Desarrollo de una nueva versión del algoritmo PSO para espacios continuos con el agregado de un procedimiento de búsqueda local, mejorando los resultados reportados por la versión original.
5. Propuesta de mejora sobre el procedimiento de actualización de velocidad sobre el algoritmo PSO aplicado a espacio binarios.
6. Propuesta de una nueva versión de un algoritmo Optimización por Cúmulo de Partículas aplicado a problemas con más de un objetivo, agregando la posibilidad de variación del tamaño de la población de acuerdo a la complejidad del problema. Comparación de esta versión con las versiones de MOPSO con mejores resultados reportados en la literatura, y con otras metaheurísticas referentes en optimización multi-objetivo.
7. Puesta en marcha de un proceso de optimización automático, en una empresa del mundo real de la industria de la salud, logrando mejoras sustanciales en las actividades afectadas.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS

Publicaciones en Revistas

- **Variable Population MOPSO applied to Medical Visits.** López, Lanzarini, Fernández Bariviera. *Journal Fuzzy Economic Review*. Vol XVII, nro 1. International Association for Fuzzy Set Management and Economy (SIGEF). Mayo 2012. Pags.3-14. ISSN 1136-0593
- **A new Binary PSO with velocity control.** Lanzarini L, López J., Maulini J., De Giusti A. *Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*. Junio 2011, Volume 6728, págs.111-119. ISSN 0302-9743. Springer Berlin / Heidelberg.
- **VarMOPSO: Multi-Objective Particle Swarm Optimization with Variable Population Size.** López J., Lanzarini L., De Giusti A. *Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*. Vol 6433, págs. 60-69. ISSN 0302-9743. Springer Berlin / Heidelberg. Noviembre 2010.

Publicaciones en Congresos Internacionales

- **Evolutionary Multiobjective Optimization for Emergency Medical Services.** Javier López, Laura Lanzarini, Armando De Giusti. Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2011. Dublin – Irlanda. July 12-16, 2011
- **Particle Swarm Optimization with Oscillation Control.** López J., Lanzarini L., De Giusti A. Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation GECCO'09. Pages: 1751-1752.ACM. New York. USA 2009. ISBN: 978-1-60558-325-9.

Publicaciones en Workshops de la Especialidad

- **Técnicas de Optimización. Aplicaciones en Minería de Datos, y Robótica Evolutiva.** Lanzarini, Hasperué, Corbalán, López, Estrebou, Ronchetti, Maulini y Villa Monte. Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2012). Area Agentes y Sistemas Inteligentes. Posadas. Mayo 2012.
- **Sistemas Inteligentes. Aplicaciones en Optimización de Procesos, Minería de Datos, Procesamiento de Señales y Robótica Evolutiva.** Lanzarini, Hasperué, Corbalán, López, Estrebou, Ronchetti, Maulini y Villa Monte Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2011). Area Agentes y Sistemas Inteligentes. Rosario Santa Fe. Mayo 2011.
- **Minería de Datos utilizando estrategias adaptativas. Aplicaciones en optimización de procesos y modelización.** Lanzarini, López, Hasperué, Corbalán, Grossi, Maulini, Villa Monte. X Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2010). Area Agentes y Sistemas Inteligentes. Mayo de 2010. Santa Cruz. Argentina.
- **Metaheurísticas poblacionales aplicadas a la resolución de problemas complejos.** Lanzarini, López. XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2009), Area Agentes y Sistemas Inteligentes. Mayo de 2009. San Juan.

Estructura de la Tesis

La presente investigación se estructura en tres partes principales:

- a) Aspectos Teóricos
- b) Optimización por Cúmulo de Partículas. Nuevas Variantes
- c) Caso de Estudio

Aspectos Teóricos

La primera de estas partes está dividida en tres capítulos. En el primero de ellos, la investigación se centra en el estudio, definición y análisis del concepto de optimización, diferenciando entre la optimización local y la optimización global. En esta parte del documento se describen los conceptos básicos relacionados con los procedimientos de búsqueda y optimización, aplicables a cualquier técnica creada para este fin.

Luego se efectúa una categorización de las técnicas de optimización existentes, introduciendo y definiendo el concepto de metaheurísticas. Se hace referencia a la computación evolutiva en general, se hace hincapié en los Algoritmos Genéticos (AGs), la primera y más utilizada de las técnicas en este campo de estudio. Luego se presentan las principales dificultades que presentan los problemas de optimización.

A continuación se detallan los tipos de optimización existentes según la cantidad de funciones objetivos a optimizar. En este capítulo se analizan, además, los procedimientos utilizados para efectuar medición de performance de algoritmos de optimización estocásticos.

Para finalizar, se hace una revisión del teorema de No Free Lunch, de alta relevancia para este tópico, y se analiza el impacto del mismo en los problemas de optimización.

Optimización por Cúmulo de Partículas. Nuevas Variantes

En la segunda parte de documento se profundiza el estudio en la metaheurística de Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO), dentro del ámbito de la inteligencia de enjambres, haciendo referencia a sus antecedentes y destacando las mejoras principales incorporadas sobre la estructura del algoritmo base.

A continuación, se describen nuevas y originales propuestas de algoritmos del tipo PSO aplicadas a espacios continuos y binarios, y a problemas mono-objetivo y multi-objetivo.

En primer lugar, se propone una variante paralela del algoritmo PSO, para ejecutar en redes de computadoras homogéneas, comparando el rendimiento con la versión canónica del algoritmo y realizando mediciones de speed-up alcanzado.

Luego, se presenta una versión que mejora el proceso de aproximación final de las partículas a los puntos óptimos locales del espacio de soluciones. Este objetivo se logra con la incorporación de un procedimiento de búsqueda local del tipo determinístico, que se aplica solamente en aquellos casos donde las partículas oscilan alrededor de algún punto óptimo local (global).

A continuación se expone una variante del algoritmo PSO aplicado a funciones con dominios binarios, presentándose una novedosa y eficiente ecuación de actualización de la velocidad y ubicación de las partículas.

Por último, se expone una versión del algoritmo de Optimización por Cúmulo de Partículas aplicado, en esta ocasión, a problemas multi-objetivo. Se introduce el concepto de población de tamaño variable, una variante muy poca explorada en este tipo de problemas.

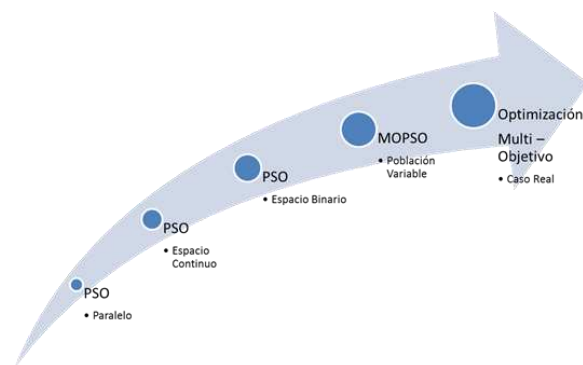


Figura 1. Hoja de ruta. Nuevas variantes metaheurística PSO

Todas estas propuestas se evaluaron en forma exhaustiva, realizando comparaciones de rendimiento con algoritmos representantes del estado del arte, utilizando funciones de prueba y un estricto análisis estadístico.

Caso de estudio

La tercera parte del documento se focaliza en la aplicación de metaheurísticas evolutivas a problemas del mundo real con más de un objetivo, y está dividido en tres capítulos.

Primero, se describe cómo es el proceso de negocio de una compañía de emergencias y prestaciones médicas domiciliarias. Se realiza un relevamiento detallado de los procesos de negocio directamente relacionados con el presente trabajo.

La empresa es Unidad Coronaria Móvil Quilmes (UCMQ), del grupo Ayuda Médica. Esta compañía es la principal empresa de emergencias y atención domiciliaria a nivel nacional. La actividad central de este tipo de empresas es la asignación de móviles a prestaciones. Para este tipo de problema, de naturaleza logística, es totalmente aplicable la utilización de algoritmos de optimización estocásticos.

La actividad se caracteriza por requerir servicios de alta calidad, con elevados parámetros de cumplimiento, y se desarrolla a su vez en un entorno muy competitivo. El mercado exige que las compañías sean altamente eficientes, y tengan que maximizar el uso de sus recursos disponibles para lograr el cumplimiento de la demanda de servicios en los términos requeridos.

La necesidad de respuesta en tiempo real y la sensibilidad de la actividad configuran un desafío interesante para abordar con las técnicas alcanzadas por la presente tesis.

Estas compañías proveen servicios médicos para el inmediato y eficiente cuidado médico de los pacientes que sufren una enfermedad o sufrieron algún tipo de herida y/o lastimadura. Ellas son el segundo eslabón en la cadena de emergencia, el primero es la familia o persona que acompaña al paciente en el momento que se produce la necesidad de atención médica, y el tercero es el hospital o centro médico y sus instalaciones.

Cada incidente que se reporta a este tipo de compañías se clasifica basado en su severidad en algunas de las siguientes categorías:

- Rojo: riesgo de muerte inminente.
- Amarillo: emergencia seria, sin riesgo de muerte inminente.
- Verde: visita médica domiciliaria, evento de baja criticidad.
- Azul: traslado programado.

Como se puede apreciar, la actividad es altamente sensible dado que en las prestaciones con categoría roja o amarilla los tiempos de llegada a la resolución de una prestación pueden definir la diferencia entre la vida y la muerte. Para las prestaciones de categoría verde, el tiempo de llegada es un factor importante, pero en ningún caso es determinante en la salud a largo plazo de la persona.

Por lo tanto, es importante hacer una primera diferenciación en cuanto a los tipos de problemáticas, las prestaciones rojas y amarillas que representan emergencias médicas y las verdes relacionadas con consultas domiciliarias. Para el caso de las emergencias médicas, el proceso de despacho (vehicle dispatching) se resume en enviar el móvil adecuado disponible que se encuentre más cerca del lugar de la emergencia. De esta forma, en este tipo de problemática el principal desafío consiste en lograr un nivel de cobertura (simple o doble) adecuado previo a la generación del incidente y así asegurar que cualquier emergencia dentro del área de servicio se resuelva dentro de los tiempos máximos establecidos.

Para el caso de las prestaciones no urgentes (verdes) el problema es de naturaleza distinta, ya que no es tan importante la ubicación previa de los móviles, sino más bien el desafío principal está relacionado con contar con un proceso de despacho optimizado, que minimice los tiempos desde que la persona llama por teléfono hasta su atención médica, y que pueda brindarse con un esquema de costos sustentable para la empresa proveedora del servicio. Este problema puede considerarse como una variante del clásico Vehicle Routing Problem (VRP), siendo uno de los problemas de optimización combinatoria más importantes, introducido por Dantzig and Ramser hace más de cinco décadas. Este problema pertenece al conjunto de los problemas NP-Hard.



Figura 2. Ayuda Médica es la principal compañía de emergencias domiciliarias de Argentina

En el siguiente capítulo se describe la solución propuesta, y se detalla cómo la misma se integra con el resto de las herramientas de software de la empresa. El objetivo del proyecto consiste en la

incorporación, en la plataforma actual de software de la compañía, de una herramienta informática para automatizar el proceso de Despacho (Asignación de móviles a Prestaciones). Este capítulo es importante para entender el contexto de aplicación de la técnica de optimización elegida, así como para entender los trabajos previos requeridos para aplicar la misma en este caso del mundo real. Uno de los requerimientos del negocio fue la incorporación de cartografía digital a los efectos de identificar en un mapa las ubicaciones de todos los móviles en tiempo real, así como las ubicaciones de las prestaciones médicas a atender.

A continuación el trabajo se enfoca en la solución algorítmica específica propuesta, y en los experimentos y mediciones efectuados para respaldar la elección realizada. Se utilizó un algoritmo de optimización multi-objetivo paralelo, que optimiza en forma simultánea el problema de asignación óptima de móviles a prestaciones, minimizando los tiempos de llegada y reduciendo, a su vez, el uso de móviles de terceros. El algoritmo será el encargado de seleccionar y asignar el móvil que debe atender cada prestación, optimizando los tiempos de llegada para la atención del paciente, aumentando la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles, estandarizando el proceso de despacho, permitiendo definir procesos de trabajo homogéneos y con altos estándares de calidad independientemente de las personas que lo operen.

En paralelo se utilizan 3 técnicas de optimización con dos variantes de cada uno, y existe un proceso final que agrupa las soluciones de las seis técnicas seleccionando aquellas que son óptimas (conforman el frente de Pareto). El algoritmo ofrece una solución cada 5 minutos analizando el estado en tiempo real de móviles y prestaciones, informa la solución óptima al sistema central que se encarga de realizar las asignaciones a los móviles médicos.

Conclusiones Finales

Este trabajo se centra en el estudio y aplicación de metaheurísticas evolutivas aplicadas a problemas del mundo real. Estos algoritmos de optimización son, en su concepción matemática más elemental, algoritmos probabilísticos que generan muestras del espacio de búsqueda, intentando encontrar patrones de interés.

A partir del procesamiento de la información obtenida, se define la forma en que se direcciona la búsqueda. Esta elección está basada en el fuerte supuesto que las regularidades encontradas pueden servir de guía para encontrar los óptimos globales de la función.

Respecto de estas actividades de laboratorio realizadas en el ámbito de la presente tesis podemos destacar los siguientes puntos:

- Existen alternativas de mejoras a las diferentes técnicas existentes. Para poder proponer una versión con rendimiento superior, se hace necesario estudiar y entender la lógica propia de la técnica bajo estudio, y proponer mejoras orientadas a suplir falencias o mejorar puntos específicos de cada algoritmo.
- Las mejoras propuestas implican, en algunos de los casos, aumentar la complejidad computacional de la técnica original. En estos casos se plantea un interesante *trade-off* entre resultados obtenidos y esfuerzo insumido cuya determinación de conveniencia dependerá de cada caso en particular.

- La metaheurística Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO) se muestra como una técnica flexible, que se puede aplicar tanto a espacios de búsquedas continuas como binarios, problemas mono-objetivo y multi-objetivo, versiones secuenciales y paralelas, en todos los casos con buenos resultados de desempeño, y sin grandes variaciones en sus componentes originales.
- La adaptación del comportamiento de la metaheurística en función del problema a optimizar produce resultados positivos, dado que muchos de los parámetros de configuración de la misma son dependientes del problema.

La última parte de este trabajo de investigación trata sobre la aplicación de metaheurísticas evolutivas a un problema del mundo real. El caso de estudio se mostró sumamente interesante, dada la complejidad del problema en cuestión, así como la sensibilidad de la actividad de negocio de la empresa. Bajo el amparo de un contrato de transferencia entre la universidad y la empresa privada, fue posible desarrollar esta actividad alcanzando los objetivos propuestos.

Creemos importante destacar los siguientes aspectos del trabajo realizado:

- Es de central importancia dedicar tiempo al entendimiento general del proyecto por parte de los involucrados. Este tipo de aplicaciones no son de uso habitual, aún en el ámbito de empresas con uso amplio de tecnología, y la comprensión del proyecto por parte de los niveles de dirección es parte fundamental del proceso.
- Es fundamental encarar este tipo de proyectos en forma integral. Existen muchos problemas de optimización a resolver en las compañías, este es un caso acabado de los mismos, pero es importante entender que normalmente no se cuenta de antemano con toda la información que requieren los algoritmos de optimización para ser aplicados. Por lo tanto, es una parte principal del proyecto recabar la información faltante, e instrumentar los mecanismos para que la misma sea recogida en forma precisa y regular como parte de los procesos de negocios estándares de la empresa.
- Los problemas del mundo real son más complejos que los problemas de laboratorio. Se presentan dificultades relacionadas con resistencia al cambio, falta de entendimiento, carencia de comunicación, intereses creados, los que requieren ser gestionados para evitar el fracaso del proyecto.
- Las instancias de los problemas del mundo real son desconocidas, y diferentes cada vez. Es una buena práctica experimentar con diferentes instancias reales del problema así como utilizar diferentes técnicas metaheurísticas, dado que a priori no es posible conocer cuál técnica se ajusta mejor al problema a optimizar.
- Se debe aprovechar la capacidad de procesamiento disponible, paralelizando los procesos de optimización, utilizando las metaheurísticas que mejor desempeño mostraron en la etapa de experimentación. En este caso de estudio se detectaron tres metaheurísticas con dos variantes cada una con buenos resultados en las diferentes instancias. Por lo tanto se decidió ofrecer como solución al problema el frente de Pareto compuesto por las 6 variantes, lo que maximiza la robustez de la solución implementada.
- Ofrecer al tomador de decisión el frente de Pareto obtenido, dado que permite que el mismo adquiera el conocimiento del problema y entienda el trade-off entre los objetivos en conflicto.

Líneas de Investigación Futuras

Luego del camino recorrido y del aprendizaje adquirido, surgen naturalmente líneas de investigación complementarias tanto en los ámbitos teóricos de experimentación en laboratorio como en casos del mundo real.

1. Complejidad computacional: En las variantes de algoritmos del tipo PSO y MOPSO presentados en esta tesis se agregaron procedimientos complementarios a las versiones originales que en la mayoría de los casos aumentaron sensiblemente la complejidad computacional del algoritmo. Sería adecuado investigar oportunidades de mejora en la implementación de los mismos tendientes a minimizar la complejidad de los algoritmos.
2. Parámetros auto adaptables: Si bien esta línea de investigación es bastante amplia dentro de la rama de metaheurísticas evolutivas, creemos que es central para lograr algoritmos eficientes optimizando problemas complejos. Variar parámetros estándar de los algoritmos en función de la evolución de la búsqueda (coeficientes de aceleración, ponderación de los factores cognitivo y social) o aspectos más relevantes como el tamaño de la población o incluso el tipo de metaheurística es una línea de investigación con resultados prometedores. Este paradigma de pensamiento intenta utilizar soluciones robustas, probadas, pero que además sean capaces de maximizar la adaptación al problema en ciernes.
3. Relación algoritmo / clase de problema: Esta línea de investigación se hace necesaria para entender por qué algoritmos con muy buenos resultados en algunos de los conjuntos de funciones de prueba presentan una pobre performance en una clase particular de problemas. En el ámbito de esta tesis se puede apreciar que todos los algoritmos del tipo MOPSO presentaron un bajo rendimiento en las instancias del problema del mundo real. Sin duda, la modelización de esta realidad configuró una clase particular de problemas donde los algoritmos multi-objetivo basados en PSO se ven superado por otras técnicas de búsqueda y optimización. En este caso en particular, si bien los experimentos realizados no fueron suficientes para aseverar esta afirmación, algunos indicios parecen indicar que los espacios de búsqueda con redundancia, como el seleccionado, disminuyen la capacidad de optimización de los algoritmos del tipo MOPSO, probablemente por su rápida convergencia a sectores específicos del espacio de búsqueda.
4. Caso de estudio: Dado el éxito del proyecto desarrollado y la aceptación del mismo por parte de la compañía de emergencias, creemos que existen sendas oportunidades para seguir aplicando algoritmos de optimización en esta industria. Por ejemplo, la ubicación de los móviles de alta complejidad en función de la demanda en tiempo real (Ambulance Location Problem) es un problema típico para resolver con estas técnicas, así como la determinación de la cantidad de móviles y la ubicación de las bases de acuerdo a la demanda de servicios real e histórica.