

LOGISTICA VERDE DE RESIDUOS TECNOLÓGICOS UNA RECOLECCIÓN INTELIGENTE Y SOSTENIBLE

D. Pandolfi¹, J. Rasjido¹, A. Villagra¹, S. Orozco¹, D. Perez¹, V. Varas, M. Bilbao, F. Brandan
G. Leguizamon¹²

{dpandolfi, jrasjido, avillagra, sorozco, dperez, vvaras, mbilbao, fbrandan}@uaco.unpa.edu.ar, legui@unsl.edu.ar

¹Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEM)
Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) - Unidad Académica Caleta Olivia
Universidad Nacional de la Patagonia Austral

²Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Computacional (LIDIC)
Departamento de Informática - Universidad Nacional de San Luis

RESUMEN

Una ciudad inteligente es una ciudad donde el desempeño de sus componentes fundamentales (economía, movilidad, medioambiente, salud, gobernanza, etc.), están construidas sobre la base de nuevas capacidades donde sus ciudadanos pueden afrontar de manera inteligente los desafíos futuros de sostenibilidad urbana. La creciente demanda en el uso las tecnologías de la información y comunicación (TIC) han revolucionado nuestra vida cotidiana, sin embargo, han contribuido a aumentar las preocupaciones ambientales y sociales.

La recuperación de residuos tecnológicos requiere de estrategias inteligentes de recolección que minimicen los costos asociados, maximicen el reuso de materias primas y la reparabilidad de los bienes para la prolongación de su vida útil. Este trabajo consiste en generar rutas recolección de residuos tecnológicos dado una cantidad de clientes por atender, un conjunto de vehículos de recogida, permitiendo minimizar ciertos factores que ayuden a la empresa a obtener beneficios.

Palabras clave: Ciudades Inteligentes, Residuos Tecnológicos, Problema de enrutamiento de vehículos, Inteligencia Computacional.

CONTEXTO

La línea de trabajo se lleva a cabo en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEM), Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) de la Unidad Académica Caleta Olivia Universidad Nacional de la Patagonia Austral, en el marco del Proyecto de Investigación 29/B252 “Rutas inteligentes en la recolección de residuos tecnológicos”. Este proyecto se desarrolla en cooperación con el LIDIC de la UNSL, y el Grupo NEO de la UMA (España).

1. INTRODUCCIÓN

El paradigma de la economía circular plantea que los residuos al final del ciclo de vida útil de un producto pueden ser materias primas idóneas para unos nuevos productos. *Great Recovery* es un proyecto con el apoyo de *Innovate UK* (Londres, Reino Unido) que busca trabajar con la basura y los residuos que se generan a diario, para generar nuevos procesos de economía circular. Los equipos eléctricos y electrónicos (EEE) se convierten en uno de los grupos más importantes de residuos que contienen materiales fáciles de reciclar. Los desechos electrónicos son conocidos como RAEE (en español, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), o *e-waste*, o bien WEEE (en inglés, *Waste Electrical and Electronic Equipment*).

Los WEEE, contienen muchas sustancias que son tóxicas y potencialmente peligrosas para el medio ambiente y la salud humana (Oguchi et al., 2012). La reducción, reciclaje y eliminación de los desechos finales de los WEEE se ha convertido en uno de los principales objetivos para el desarrollo sostenible de la creciente industria tecnológica. La tasa de WEEE está creciendo a un ritmo alarmante, especialmente en los países desarrollados, donde los mercados están saturados con grandes cantidades de nuevos productos electrónicos. En 2013, un informe de SEPI (*Solving the e-waste Problem Initiative*), una iniciativa financiada por Naciones Unidas alertó que la cifra de WEEE se había elevado hasta cerca de los 49 millones de toneladas, un promedio de 7 kilos por cada uno de los 7.000 millones de habitantes del planeta Tierra. A la luz de estos datos, no resulta muy difícil hacerse una idea de la importancia que adquiere el reciclaje de este tipo de residuos.

Las empresas de recolección de residuos aplican diversos métodos de recolección, y pueden dividirse en estacionarios y móviles (Baxter et al., 2016). El objetivo tradicional de la gestión de distribución o recolección de productos consiste en minimizar los costos de todo el sistema. *Green Logistics* (GL) se ha convertido en una tendencia en la gestión de la distribución de bienes y la recolección de productos al final de su vida útil. Con su enfoque en maximizar el valor económico y ambiental mediante el reciclaje y el control de emisiones, GL contribuye al desarrollo sostenible de la industria, pero también requiere un esquema de transporte más completo cuando se realizan servicios de logística (Lin et al. 2014 (a) (b)).

Las metaheurísticas (MHs) son métodos que integran 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. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales,

especialmente en espacios de búsqueda complejos. En otras palabras, las MHs proveen de un marco general que permite crear nuevos híbridos a través de la combinación de conceptos derivados de: heurísticas clásicas, inteligencia artificial, evolución biológica, sistemas naturales, mecánica estadística, etc.

Boussaïd et al. 2013, desarrollan un estudio de varios algoritmos de optimización inspirados en las metáforas del comportamiento de enjambre en la naturaleza, conocida como Inteligencia Colectiva, (SI, *Swarm Intelligence*). Ejemplo de SI son Optimización de Colonias de Hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*), la Optimización de Cúmulo de Partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*), la Optimización de Forrajeo Bacteriano (BFOA, *Bacterial Foraging Optimization Algorithm*), Optimización de Colonias de Abejas (BCO, *Bee Colony Optimization*), Sistemas Inmunes Artificiales (AIS, *Artificial Immune Systems*) y Optimización Basada en Biogeografía (BBO, *Biogeography-Based Optimization*).

En particular, ACO fue propuesta fue propuesta por Dorigo et al. (1996, 1991) como una metaheurística inspirada en el comportamiento de una colonia de hormiga en el proceso de forrajeo y aplicada principalmente para la solución de problemas de optimización combinatoria.

Los algoritmos Genéticos Celulares (cGAs) son una subclase de un Algoritmo Genético con una población estructurada espacialmente, es decir, los individuos de la población pueden aparearse solo con sus vecinos. Los cGAs, se diseñaron inicialmente para trabajar en máquinas paralelas, formadas por muchos procesadores que ejecutaban simultáneamente las mismas instrucciones sobre diferentes datos (máquinas SIMD - El primer modelo de cGA fue propuesto por Robertson en 1987 (Alba y Dorronsoro 2009)).

El problema de recolección estacionaria se lleva a cabo en puntos de recolección específicos de desechos, ubicados en lugares popula-

res o en los alrededores de los lugares de residencia. La elección de la ubicación de dichos centros y la elección de un recorrido óptimo representa distintos problemas de decisión. Así mismo, la recolección móvil, propone nuevos medios de recolección de WEEE a pedido y principalmente está asociado a residuos tecnológicos medianos o grandes (Nowakowski et al., 2017).

Las distintas estrategias de recolección de e-waste pueden asociarse al conocido problema de enrutamiento de vehículos (VRP, *Vehicle Routing Problem*). Dantzig y Ramser (1959), formalizaron el VRP junto con sus numerosas variantes, y posteriormente Lenstra y Kan (1981) demostraron que dicho problema combinatorio es NP-Hard. En general, VRP consiste en asignar una cantidad de vehículos homogéneos a varios clientes, donde cada cliente tiene una cierta ubicación y demanda de productos (homogéneos). El objetivo de la optimización es entregar los bienes demandados a todos los clientes al tiempo que minimiza la suma de los costos (longitudes) de las rutas de los vehículos.

Existen diferentes variantes del VRP (Toth y Vigo, 2014), que incluyen restricciones adicionales y la incorporación de múltiples variables. Algunas restricciones más importantes son: a) cada vehículo tiene capacidad limitada (CVRP), b) todos los clientes deben ser atendidos dentro de una cierta ventana de tiempo (VRPTW), c) el proveedor utiliza muchos depósitos para suministrar a los clientes (*Multiple Depot* MDVRP) d) los clientes pueden devolver algunos productos (VRPPD) e) los clientes pueden recibir servicio por diferentes vehículos (SDVRP) f) algunos valores (como el número de clientes, sus demandas, el tiempo de servicio o el tiempo de viaje) son arbitrarios (VRP estocástico - SVRP) g) las entregas se pueden realizar en algunos días (VRP periódico - PVRP).

En la actualidad el problema de recolección o distribución de productos a partir de un depó-

sito original (punto de origen) y una cantidad de clientes con una demanda por atender, juega un papel importante en empresas logísticas ya que deben planificar inteligentemente las rutas de manera tal que signifiquen considerables ahorros en costos tales como: el consumo de combustible, horas hombre, entre otros; que ayudarán a una mejor rentabilidad para los negocios hoy en día. En relación con una creciente sensibilidad ambiental los problemas de enrutamiento de vehículos presentan una extensa disponibilidad bibliográfica de los problemas de enrutamiento verde de vehículos (GVRP). Los diferentes tipos de problemas de enrutamiento de VRP en logística inversa, describen perfectamente la complejidad en los casos del mundo real.

En este artículo trabajamos la variante de VRP con capacidad limitada (CVRP), en el que cada vehículo tiene una capacidad uniforme de un único artículo. Definimos el CVRP sobre un grafo no dirigido $G = (V, E)$ donde $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ es un conjunto de vértices y $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i < j\}$ es un conjunto de ejes.

El vértice v_0 es el depósito, y es desde donde m vehículos de capacidad Q deben abastecer a todas las ciudades o clientes, representados por un conjunto de n vértices $\{v_1, \dots, v_n\}$.

Definimos en E una matriz $C = (c_{ij})$ de costo, distancia o tiempo de viaje no negativos entre los clientes v_i y v_j . Cada cliente v_i tiene una demanda no negativa de artículos q_i y tiempos de entrega δ_i (tiempo necesario para descargar todos los artículos). Siendo v_1, \dots, v_m una partición de V , una ruta R_i es una permutación de los clientes en V_i especificando el orden en el que se visitan, comenzando y terminado en el depósito v_0 . El costo de una ruta dada $R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_{k+1}\}$, donde $v_j \in V$ y $v_0 = v_{k+1} = 0$ (0 indican el depósito), viene dada por la ecuación (1):

$$Cost(R_i) = \sum_{j=0}^k c_{i,j+1} + \sum_{j=0}^k \delta_j q_j \quad (1)$$

y el costo de la solución al problema (S) es:

$$FCVRP(S) = \sum_{i=1}^m Cost(R_i) \quad (2)$$

El CVRP consiste en determinar un conjunto de m rutas (i) de costo total mínimo - como especifica la ecuación (2); (ii) empezando y terminando en el depósito v_0 ; de forma que (iii) cada cliente es visitado una sola vez por un sólo vehículo, sujeto a las restricciones (iv) de que la demanda total de cualquier ruta no exceda Q_i ; y (v) la duración total de cualquier ruta no supera el límite preseleccionado D_i . Todos los vehículos tienen la misma capacidad y transportan el mismo tipo de artículo. El número de vehículos puede ser un valor de entrada o una variable de decisión. En este estudio, la longitud de las rutas se minimiza independientemente del número de vehículos utilizados.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Esta línea de trabajo se enfoca en la generación de rutas recolección que permitan minimizar ciertos factores económicos y ambientales y maximizar los beneficios referidos a al reciclaje y tratamiento de WEEE. De los objetivos económicos podemos mencionar: minimizar el tiempo de recolección, kilómetros recorridos, maximizar el ahorro de combustible en los vehículos, minimizar la cantidad de vehículos, todo lo cual llevaría a obtener menores costos. Un objetivo económico adicional está dado por la valoración de la recuperación las materias primas tales como material ferroso, cobre, y metales preciosos, etc. De los beneficios ambientales podemos mencionar: la disminución en la emisión de gases efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O) y los gases de contaminación ambiental (CO , SO_2 , PM , NO_x). Tanto los objetivos económicos como ambientales promueven una mejor calidad de servicio e imagen, para las empresas y los gobiernos locales

3. RESULTADOS OBTENIDOS / ESPERADOS

Como objetivo general se espera modelar, resolver e implementar un amplio y variado conjunto de servicios inteligentes de la ciudad y producir un mayor impacto en Ciencia e Industria.

Como objetivos específicos se pretende: (a) Estudiar el estado de tecnologías y técnicas de Inteligencia Computacional para resolver problemas de VRP. (b) Proponer instancias de problemas relacionados a recolección de WEEE. (c) Proponer y seleccionar elementos de medición relacionados a los problemas identificados. (d) Diseñar y construir prototipos de software relacionados a los problemas.

Actualmente se han generado cuatro instancias de pruebas para para 75, 105, 150 y 210 locaciones de recogida de WEEE de cuatro localidades (Caleta Olivia, Comodoro Rivadavia, Trelew y Río Gallegos). Las instancias se han probado con dos algoritmos de inteligencia computacional (ACO y eGA) los resultados preliminares fueron publicados en Pandolfi et al. 2019.

Para elegir los vehículos más adecuados para la colección, analizamos las siguientes variables: total de km recorridos, Costo total de uso vehículo, Total de Combustible consumido, Total de CO_2 emitido y Tiempo Total de horas de Trabajo.

En general, con las instancias iniciales y teniendo en cuenta la cantidad de km recorridos y la cantidad de horas de trabajo, los resultados indican que los vehículos de alta carga con un mayor proceso de automatización tienen un mejor rendimiento. Para la variable de consumo de combustible y, por lo tanto, la variable de emisión de CO_2 , los vehículos más pequeños sin automatización han mostrado mejores resultados. Finalmente, solo para la variable de costo del vehículo, el vehículo con una capacidad de 22 m3 de carga es la mejor opción.

En trabajos futuros analizaremos en distintas ciudades y se propondrán nuevas funcio-

nes de optimización teniendo en cuenta las variables consideradas en este estudio.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El equipo de trabajo se encuentra formado por cuatro investigadores con distintos niveles de posgrado, tres Doctores en Ciencias de la Computación, dos Magíster en Ciencias de la Computación, tres Ingenieros en Sistemas y un estudiante de la Carrera Ingeniería en Sistemas.

Esta línea de investigación proporcionará un marco propicio para la iniciación y/o finalización de estudios de posgrado de los integrantes docentes. De igual forma, será un ámbito adecuado para la realización de tesis de grado. En ese sentido, dos integrantes de este proyecto de investigación está desarrollando su Tesis de Maestría en temáticas afines y un integrante está desarrollando su Tesis de doctorado. Además, se cuenta con un becario alumno de la carrera de Ingeniería en Sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- E. ALBA, y B. DORRONSORO. (2009). *Cellular genetic algorithms* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.
- J. BAXTER, K.A., LYNG, C. ASKHAM, O.J. HANSEN (2016). "High-quality collection and disposal of WEEE: environmental impacts and resultant" issues. *Waste Manage.* 57, 17–26.
- I BOUSSAÏD, J. LEPAGNOT, P. SIARRY, A survey on optimization metaheuristics, *Information Sciences*, Volume 237, 2013, Pages 82–117, ISSN 0020v-0255.
- G.B. DANTZIG, J. RAMSER, (1959). The truck dispatching problem, *Manage. Sci.* 6 (1) (1959) 80–91.
- M. DORIGO, V. MANIEZZO, A. COLORNI, (1991) Positive Feedback as a Search Strategy, Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1991.
- M. DORIGO, V. MANIEZZO, A. COLORNI, (1996) The ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B* 26 29–41.
- C. LIN, K.L. CHOY, G.T.S. HO, T.W. Ng (a), A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations, *Expert Systems with Applications*, Volume 41, Issue 7, 2014, Pages 3284-3296, ISSN 0957-4174.
- C. LIN, K.L. CHOY, G.T.S. HO, S.H. CHUNG, H.Y. LAM (b), Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends, *Expert Systems with Applications*, Volume 41, Issue 4, Part 1, 2014, Pages 1118-1138, ISSN 0957-4174.
- P. NOWAKOWSKI, A. KRÓL, B. MRÓWCZNSKA (2017), Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation, *Waste Management*, Volume 69, 2017, Pages 377-392, ISSN 0956-053X.
- M. OGUCHI, H. SAKANAKURA, A. TERAZONO (2012). Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Sci. Total, Environ.*
- D. PANDOLFI, J. RASJIDO, A. VILLAGRA, G. LEGUIZAMON (2019), Following the green footprint of technological waste: A smart and sustainable collection, *RPIC - Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*. ISBN 9789871648.
- P. TOTH, D. VIGO (Eds), (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics.