

# Exact and metaheuristic approaches for Network Design Problems

N. González-Blanco 

*Departamento de Métodos Cuantitativos. Sevilla. Universidad Loyola. [ngonzalez@uloyola.es](mailto:ngonzalez@uloyola.es)*

## Citar como:

González-Blanco, N. (2024). Exact and metaheuristic approaches for Network Design Problems. Boletín de Estadística e Investigación Operativa. 40(2), 56-59.

## Abstract

El Diseño de Redes juega un papel importante para entender y optimizar los flujos de información, recursos y servicios. En esta tesis, realizada en cotutela junto con la Universidad Libre de Bruselas, estudiamos problemas de Diseño de Redes desde el punto de vista de la Optimización Combinatoria, buscando encontrar propiedades y métodos efectivos que mejoren el proceso de obtención de soluciones óptimas o al menos buenas. Los problemas tratados diseñan una red que sirve a cierta parte de un conjunto de pares de demanda origen/destino. Además se ha considerado la existencia de una red alternativa que puede ser utilizada por este conjunto de demanda, de manera que coopere con la red que se va a diseñar o que compita con la misma. Abordamos la resolución de todos los problemas propuestos a partir de la teoría de la Descomposición de Benders, diseñando e implementando lo que actualmente se conoce como Branch-and-Benders-cut. Además, se han considerado enfoques metaheurísticos para algunos de los problemas en cuestión.

## Directores:

- Bernard Fortz (*HEC Liège, Management School of the University of Liège*)
- Martine Labbé (*Université libre de Bruxelles*)
- Juan A. Mesa (*Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla*)

**Keywords:** Optimización Combinatoria, Problemas de diseño de redes, Problemas de transporte, Problemas de cubrimiento en redes,  $\lambda$ -Cent-Dian, Descomposición de Benders, Metaheurísticas, Pareto-Optimalidad.

## 1 Resumen de la tesis

Como consecuencia de la globalización, las interacciones entre países, empresas, personas, etc., se han incrementado durante las últimas décadas. Estas interacciones complejas y multifacéticas pueden ser modeladas matemáticamente a través de estructuras conocidas como redes, que son esenciales para entender y optimizar los flujos de información, recursos y servicios. Por lo tanto, el Diseño de Redes juega un papel importante para facilitar y mejorar tales interacciones. Sin embargo, la mayoría de los problemas de Diseño de Redes son intrínsecamente complejos y difíciles de resolver. Ante esta dificultad, nuestro objetivo en esta tesis (ver González-Blanco (2023)) ha sido estudiarlos desde el punto de vista de la Optimización Combinatoria y encontrar propiedades y métodos efectivos, tanto enfoques exactos como aproximados (metaheurísticos) que mejoren el proceso de obtención de soluciones óptimas, o al menos buenas, para aplicaciones prácticas.

En esta tesis hemos estudiado algunos problemas de Diseño de Redes, los cuales agrupamos en dos categorías principales, detalladas más adelante, basados en la característica principal y específica de cada uno. Una constante en todos los problemas es la consideración de que la demanda está dada por un conjunto de pares de puntos origen/destino (O/D). Es decir, cada demanda  $g^w$  tiene que pasar de un nodo de origen (O) a un nodo de destino (D), ver Figura 1. Los problemas tratados diseñan una red que sirve/cubre a cierta parte de este conjunto de pares de demanda. Otra característica que comparten es la de la existencia de una red alternativa que puede ser utilizada por este conjunto de demanda. Esta red tiene asignada una utilidad  $u^w$  que puede ser entendida en términos de distancia, coste o tiempo. Su existencia se ha tratado de dos formas distintas. En algunos problemas se ha destacado la posible competencia existente entre la red que se va a diseñar y la red alternativa actual, mientras que en otros, se ha considerado la cooperación entre ambas redes.

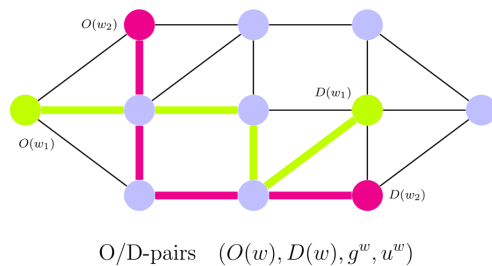


Figura 1. Ejemplo de instancia para los problemas estudiados en esta tesis.

Centrándonos en la característica principal de cada problema, por un lado, hemos tratado con problemas que hemos agrupado en la categoría de Cobertura para el Diseño de Redes (ver Los Capítulos 2, 3 y 4). Estos problemas buscan diseñar una red de tal forma que se maximice la proporción de la demanda cubierta o se asegure que un cierto porcentaje de la demanda total queda servido. Motivados por las aplicaciones a la vida real, cabe destacar el trabajo realizado en el Capítulo 3, el cuál muestra la siguiente aplicación práctica para el Diseño de Redes en el área del transporte. Normalmente, cuando se considera la construcción de una línea de tránsito rápido en un área metropolitana, ya existe un sistema de tránsito lento (como por ejemplo, un sistema de autobuses) que cubre parcialmente la demanda de la nueva línea. Por lo tanto, frecuentemente el modo lento debe ser cancelado o sus rutas modificadas. En la práctica, el proceso de diseño de una línea de tránsito rápido y la reubicación de un sistema de líneas de transporte lento se planifica según un método secuencial. En primer lugar, se diseña la línea de tránsito rápido teniendo en cuenta los flujos privados y públicos, y posiblemente encuestas sobre movilidad, con el fin de predecir la utilización futura de la nueva infraestructura y/o otros criterios. Luego, en una segunda etapa, se rediseña la red de rutas de autobuses. Sin embargo, este proceso secuencial puede llevar a una solución subóptima. Por ello, nosotros presentamos una formulación para el problema particular de diseñar, de manera simultánea, una línea de tránsito rápido y reubicar una línea lenta ya existente, con el objetivo de maximizar la demanda cubierta/servida en una situación de cooperación entre ambos tipos de transporte. Para este trabajo nos hemos centrado en el caso de la ciudad de Sevilla. En Bucarey et al. (2022) y González-Blanco et al. (2021) están publicados algunos de los resultados de estos capítulos.

Por otro lado, hemos extendido las nociones de  $\lambda$ -Cent-Dian y Centro-Generalizado, ya existentes en Teoría de Localización de Instalaciones, al área de Diseño de Redes. Los problemas agrupados en esta categoría están enfocados para diseñar redes que conecten un conjunto dado de pares de demanda origen/destino de manera que minimicen la máxima longitud/distancia (peor camino) dentro de esa red, la longitud/distancia promedio, una combinación lineal de ambos objetivos o la diferencia entre ellos. Estos objetivos pueden ser de interés para algunas de las necesidades existentes en la actualidad en las que se consideran las nociones de eficiencia y equidad. Esto es, el problema del  $\lambda$ -cent-dian estudia el equilibrio entre ambas nociones. Por ello, hemos investigado las propiedades de las redes solución obtenidas desde el punto de vista de la equidad y la eficiencia, pero también desde la optimalidad de Pareto y de otras medidas de desigualdad como el porcentaje de demanda cubierta o la desviación media absoluta de las longitudes de los caminos.

El caso particular en el que consideramos minimizar la diferencia entre la longitud máxima y la longitud media da lugar a un problema bi-nivel. La teoría de optimización binivel es una rama específica de la Optimización Matemática que aborda problemas en los cuales una decisión de optimización superior (llamado problema líder) afecta y está afectada por otra decisión inferior (llamado problema inferior/seguidor) de optimización. Resolver problemas bi-nivel es típicamente más desafiante que los problemas de optimización de un solo nivel. En nuestro caso, en el nivel superior se tiene el problema de minimización de la diferencia de los objetivos y como nivel inferior está el diseño de caminos entre pares de orígenes y destinos de manera que no se incremente de forma artificial la función objetivo. Para más detalles ver el Capítulo 5 (también en Bucarey et al. (2024)) de esta tesis.

Ya comentamos que los problemas de diseño de redes son difíciles de resolver desde una perspectiva computacional. Por ello, a lo largo del desempeño de esta tesis se han desarrollado métodos de preprocesamiento de cada problema a resolver para agilizar el proceso de obtención de una solución antes de centrarnos en los procedimientos y enfoques propios de resolución. Por un lado, hemos abordado todos los problemas propuestos a partir de la teoría de la Descomposición de Benders, diseñando e implementando para cada uno lo que se conoce actualmente como un algoritmo de Branch-and-Benders-cut. Se han desarrollado algunas estabilizaciones para mejorar la convergencia de este

método de acuerdo a las características de cada problema. Ha sido un desafío aplicar esta teoría para el problema propuesto en el Capítulo 3 debido a sus dimensiones, causadas por la consideración de características propias de la aplicación en la vida real. Debido a la complejidad teórica y computacional asociada a la teoría de la Descomposición de Benders, por otro lado, también se han considerado enfoques metaheurísticos para algunos de los problemas en cuestión. Hemos desarrollado un algoritmo de Recocido Simulado (del inglés Simulated Annealing) y otro algoritmo de Búsqueda Adaptativa en el caso en el que se consideran vecindarios de gran tamaño (Adaptive Large Neighborhood Search).

El capítulo final de la tesis concluye con un resumen de los principales resultados obtenidos y con una descripción de futuras extensiones de la investigación realizada.

## Agradecimientos

Esta tesis doctoral ha sido financiada por los proyectos de investigación competitivos MTM2015-67706-P (contrato FPI) y PID2019-106205-GB-I00, que incluyen financiación del FEDER, así como mediante financiación proveniente del grupo de investigación FQM-241. Además, ha sido realizada en cotutela junto con la Université Libre de Bruxelles.

## Acerca de la autora



**Natividad González-Blanco** es Profesora Ayudante Doctora en la Universidad Loyola, en Sevilla. Se graduó y realizó el máster en Matemáticas en la Universidad de Sevilla. Posteriormente, en 2023 se doctoró en Matemáticas por la Universidad de Sevilla y en cotutela por la Université Libre de Bruxelles. Además, ha realizado numerosas estancias de investigación en la Université Libre de Bruxelles, así como en el centro de investigación INRIA Lille - Nord Europe. Sus trabajos combinan las disciplinas de la Investigación Operativa y Ciencias de la Computación, contribuyendo a los campos de la Optimización Matemática.

## Bibliografía

- Bucarey, V., Fortz, B., González-Blanco, N., Labbé, M., and Mesa, J. A. (2022). Benders decomposition for network design covering problems. *Computers & Operations Research*, 137:105417.
- Bucarey, V., González-Blanco, N., Labbé, M., and Mesa, J. A. (2024).  $\lambda$ -cent-dians and generalized-center for network design. Preprint en arXiv.

González-Blanco, N. (2023). *Exact and metaheuristic approaches for Network Design Problems*. PhD thesis, Universidad de Sevilla y Universidad Libre de Bruselas.

González-Blanco, N., Lozano, A. J., Marianov, V., and Mesa, J. A. (2021). An integrated model for rapid and slow transit network design (short paper). In *21st Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2021)*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik.

