

Resumen

Esta Tesis Doctoral demuestra que la realidad de las redes de transporte que caracterizan los problemas de rutas reales de las empresas, es muy compleja y asimétrica; y esto queda reflejado en las matrices de distancias (tiempos o costes) entre pares de localizaciones que son la base de todo problema de rutas.

En esta investigación, se cuantifica la medida en la que el grado de asimetría de las matrices de distancias depende de factores como el territorio y la localización de los clientes; y se subraya la importancia de la obtención de las matrices de distancias reales asimétricas y la barrera de entrada que ello supone.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es cuantificar en qué medida la asimetría tiene un efecto sobre la eficiencia y eficacia de las principales heurísticas y meta-heurísticas reconocidas en la resolución de dos casos fundamentales de los problemas de rutas: el TSP y el CVRP. Adicionalmente, también se estudia el impacto de otros factores (el territorio, la localización, el número de clientes, la demanda y la capacidad máxima) en los resultados (tiempo computacional y bondad de la solución).

Mediante la realización de multitud de experimentos computacionales y análisis estadísticos de los resultados (ANOVA entre otros), se demuestra que todas las técnicas estudiadas se ven afectadas en mayor o menor medida por la asimetría y otros factores; y que las soluciones a los problemas simétricos poco o nada tienen que ver con las soluciones en el contexto asimétrico (ni cuantitativa, ni cualitativamente).

Con todo ello, se puede inferir que la asimetría tiene un efecto muy importante sobre todos los problemas de rutas de vehículos, y por tanto debe ser considerada como un factor clave de cualquier desarrollo e investigación de aplicación en el contexto real de las empresas.

Palabras clave: *asimetría, problemas de rutas de vehículos, TSP, CVRP, SIG, matrices*

Resum

Esta Tesi Doctoral demostra que la realitat de les xarxes de transport que caracteritzen els problemes de rutes reals de les empreses, és molt complexa i asimètrica; i açò queda reflectit en les matrius de distàncies (temps i cost) entre parells de localitzacions que són la base de tot problema de rutes.

En esta investigació, es quantifica la mesura en què el grau d'asimetria de les matrius de distàncies depèn de factors com el territori i la localització dels clients; i se subratlla la importància de l'obtenció de les matrius de distàncies reals asimètriques i la barrera d'entrada que això suposa.

L'objectiu principal d'esta Tesi Doctoral és quantificar en quina mesura la asimetria té un efecte sobre l'eficiència i eficàcia de les principals heurístiques i meta-heurístiques reconegudes en la resolució de dos casos fonamentals dels problemes de rutes: el TSP i el CVRP. Addicionalment, també s'estudia l'impacte d'altres factors (el territori, la localització, el nombre de clients, la demanda i la capacitat màxima) en els resultats (temps computacional i bondat de la solució).

Per mitjà de la realització de multitud d'experiments computacionals i anàlisis estadístiques dels resultats (ANOVA entre altres), es demostra que totes les tècniques estudiades es veuen afectades en major o menor mesura per la asimetria i altres factors; i que les solucions als problemes simètrics poc o res tenen a veure amb les solucions en el context asimètric (ni quantitativa, ni qualitativament).

Amb tot això, es pot inferir que la asimetria té un efecte molt important sobre tots els problemes de rutes de vehicles, i per tant ha de ser considerada com un factor clau de qualsevol desenrotllament i investigació d'aplicació en el context real de les empreses

Paraules clau: *asimetria, problemes de rutes de vehicles, TSP, CVRP, SIG, matrius*

Abstract

This PhD thesis shows that the reality of the vehicle routing problems that characterize real-world business is very complex and asymmetric, and this is reflected in the distance matrix (time or cost) between pairs of locations that are basis for all routing problems.

This research quantifies the relationship between the asymmetry degree of the distance matrix and factors such as territory and the customers location. It also underscores the importance of obtaining the real and asymmetric distance matrix.

The main objective of this thesis is to quantify the extent to which the asymmetry has an effect on the efficiency and effectiveness of the main heuristics and meta-heuristics in solving recognized two fundamental cases of routing problems: the TSP and CVRP. Additionally, it also examines the impact of other factors (territory, the location, number of customers, demand and capacity) in the results (computational time and goodness of the solution).

By performing many computational experiments and statistical analysis of results (ANOVA among others) is demonstrated that all the techniques studied are affected by the asymmetry and other factors. The solution to symmetric problems differs from asymmetric ones (either quantitatively or qualitatively).

Therefore we can infer that the asymmetry has a major impact on all vehicle routing problems, and it must be considered as a key factor in any research and development application in the real business context.

Keywords: asymmetry, vehicle routing problems, TSP, CVRP, GIS, matrix

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estructura	5
2. Los problemas de rutas de vehículos	9
2.1. Descripción de los problemas de rutas	10
2.1.1. La red de transporte	10
2.1.2. Los clientes y su servicio	12
2.1.3. Los almacenes o depósitos	14
2.1.4. La flota de vehículos	15
2.1.5. Las rutas	15
2.2. Importancia y aplicación práctica de los problemas de rutas	16
2.3. Antecedentes e interés científico	23
2.4. Aspectos y variantes de los problemas de rutas	28
2.5. Problemas básicos en la literatura	34
2.6. Conclusiones	37
3. Modelos básicos de problemas de rutas	39
3.1. Problemas de rutas de vehículos (VRP)	40
3.1.1. Notación	42
3.2. El viajante de comercio (TSP)	43
3.3. Múltiples viajantes de comercio (m-TSP)	47
3.4. El problema clásico de rutas de vehículos	51
3.5. Vehículos capacitados (CVRP)	54
3.5.1. Extensiones al CVRP	58

3.6. Ventanas horarias (VRPTW)	60
3.6.1. Extensiones al VRPTW	64
3.7. Recogida y entrega (VRPPD)	65
3.8. Conclusiones	70
4. Asimetría: El caso del TSP	71
4.1. Justificación y objetivos	72
4.2. Algoritmos para el TSP.	74
4.2.1. NN - <i>nearest neighbor algorithm</i> (1956)	75
4.2.2. <i>2-Opt heuristic</i> (1958)	76
4.2.3. Lin y Kernighan (1973).	80
4.2.4. <i>Concorde TSP solver</i> (2003)	82
4.2.5. LK de Keld Helsgaun - LKH (1998).	85
4.3. Transformación de ATSP en TSP	86
4.3.1. Matriz asimétrica	87
4.3.2. Transformación de la matriz asimétrica	87
4.4. El mundo real es asimétrico	89
4.4.1. Los sistemas de información geográfica	89
4.4.2. Localización y medición de distancias entre puntos	94
4.4.3. Estimación de las distancias por carretera	97
4.4.4. La asimetría y los GIS	101
4.4.5. La desigualdad triangular	109
4.4.6. Medición del grado de asimetría	113
4.5. Cuestiones e hipótesis para la investigación.	120
4.6. Experimentos.	121
4.6.1. Caracterización de las instancias	122
4.6.2. Estudio detallado de la caracterización de las instancias	125
4.6.3. Estudio de las variables respuesta	135
4.6.4. Análisis de la varianza - ANOVA.	141
4.6.5. Diseño factorial	142
4.6.6. Diseño experimental - DOE	143
4.6.7. Resolución.	145
4.6.7.1. Generación de localizaciones	148
4.6.7.2. Cálculo de matrices	148
4.6.7.3. Algoritmos y cálculos de resolución	150
4.6.7.4. Procesado post-resolución	152
4.6.8. Análisis de los resultados	153
4.7. Conclusiones	153

5. Matrices asimétricas	155
5.1. El coste de la asimetría	156
5.1.1. Tiempo total de cálculo de las matrices asimétricas	158
5.1.2. Tiempo total de cálculo y tamaño de la matriz asimétrica	160
5.1.3. Tiempo total de cálculo y localización	161
5.1.4. Tiempo total de cálculo y territorio	163
5.1.5. Tiempo promedio de cálculo de las matrices asimétricas	166
5.1.6. Tiempo promedio de cálculo y tamaño de la matriz asimétrica	168
5.1.7. Tiempo promedio de cálculo y territorio	169
5.1.8. Tiempo promedio de cálculo y localización	171
5.2. La asimetría en las matrices de distancias	174
5.2.1. Asimetría y territorio	175
5.2.2. Asimetría y localización	183
5.2.3. Asimetría, territorio y localización	190
5.3. Conclusiones	196
6. Análisis de las soluciones al caso del TSP	199
6.1. Tiempos de resolución de los algoritmos	200
6.1.1. Análisis de la varianza del tiempo ($A \leftrightarrow CO$ y $M \leftrightarrow A$)	202
6.1.2. Análisis de la varianza del tiempo ($M \leftrightarrow A$ y $M \leftrightarrow T$)	208
6.1.3. Análisis de la varianza del tiempo ($M \leftrightarrow T$, $A \leftrightarrow CO$ y $A \leftrightarrow LK$)	212
6.1.4. Análisis de la varianza del tiempo ($M \leftrightarrow A$, $A = CO$ y $A = HE$)	216
6.1.5. Conclusiones a los análisis de varianza para el tiempo	219
6.2. Bondad de las soluciones de los algoritmos	225
6.2.1. Análisis de la varianza de la bondad ($A = CO$, $A = LK$, $A = HE$ y $M \leftrightarrow A$, $M \leftrightarrow T$)	227
6.2.2. Análisis de la varianza de la bondad ($A = CO$, $A = LK$, $A = HE$ y $M = T$)	231
6.2.3. Conclusiones a los análisis de varianza de la bondad	233
6.3. Comparación cualitativa y cuantitativa de las soluciones simétricas (TSP) y asimétricas (ATSP)	236
6.3.1. Análisis cuantitativo	238
6.3.2. Análisis cualitativo	247
6.3.3. Análisis gráfico	253
6.4. Conclusiones	260
7. Contraste e inferencia del TSP asimétrico	263
7.1. Algoritmos para el ATSP	263
7.1.1. Algoritmo de ramificación y poda de Fischetti et al. (2003)	264
7.1.2. Heurística mejorada GKS/TBCOP de Goldengorin et al. (2006)	265

7.2. Ampliación de los experimentos	265
7.3. Tiempos de resolución de los algoritmos	266
7.4. Bondad de las soluciones	270
7.5. Evaluación cuantitativa y cualitativa	273
7.6. Conclusiones	275
8. Asimetría: El caso del CVRP	277
8.1. Justificación y objetivos	277
8.2. Algoritmos para el CVRP	278
8.2.1. Algoritmo de Clarke y Wright (1964)	282
8.2.2. Algoritmo de barrido - <i>sweep algorithm</i> (1974)	286
8.2.3. <i>General Heuristic</i> de Pisinger y Røpke (2007)	289
8.2.4. EAX (<i>edge assembly crossover</i>) de Nagata (2007)	292
8.2.5. Heurísticas de mejora - <i>improvement heuristics</i>	294
8.3. Cuestiones e hipótesis para la investigación.	296
8.4. Experimentos.	297
8.4.1. Caracterización de las instancias	297
8.4.2. Estudio detallado de la capacidad máxima	300
8.4.3. Estudio de las variables respuesta	302
8.4.4. Diseño factorial	303
8.4.5. Diseño experimental y resolución	304
8.4.5.1. Algoritmos y cálculos de resolución	306
8.5. Conclusiones	307
9. Análisis de las soluciones en el caso del CVRP	309
9.1. Tiempos de resolución de los algoritmos.	309
9.1.1. Análisis de la varianza del tiempo (PO=1)	311
9.1.2. Tiempo de post-optimización	320
9.1.3. Tiempo de post-optimización (A<->CW)	325
9.1.4. Conclusiones a los análisis de varianza para el tiempo	327
9.2. Bondad de la solución de los algoritmos	334
9.2.1. Efecto de la post-optimización	336
9.2.2. Análisis de la varianza de la bondad (PO=1)	339
9.2.3. Análisis de la varianza de la bondad (PO=1, A=CW y A=SW)	340
9.2.4. Análisis de la varianza de la bondad (PO=1, A=NA y A=RO)	343
9.2.5. Conclusiones a los análisis de varianza de la bondad	347

9.3. Análisis de Nagata con parada a tiempo	348
9.4. Comparación cuantitativa y cualitativa de las soluciones CVRP y ACVRP	352
9.4.1. Análisis cuantitativo	354
9.4.2. Análisis gráfico	361
9.5. Conclusiones	368
10. Conclusiones	369
10.1. Aspectos relevantes de la investigación	371
10.2. Publicaciones	375
10.3. Líneas futuras de investigación	377
Referencias	383