

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estructura	5
<b>2. Los problemas de rutas de vehículos</b>	<b>9</b>
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
<b>3. Modelos básicos de problemas de rutas</b>	<b>39</b>
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
<b>4. Asimetría: El caso del TSP</b> . . . . .	<b>71</b>
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

<b>5. Matrices asimétricas</b>	<b>155</b>
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
<b>6. Análisis de las soluciones al caso del TSP</b>	<b>199</b>
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
<b>7. Contraste e inferencia del TSP asimétrico</b>	<b>263</b>
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
<b>8. Asimetría: El caso del CVRP</b> . . . . .	<b>277</b>
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
<b>9. Análisis de las soluciones en el caso del CVRP</b> . . . . .	<b>309</b>
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
<b>10. Conclusiones</b>	<b>369</b>
10.1. Aspectos relevantes de la investigación . . . . .	371
10.2. Publicaciones . . . . .	375
10.3. Líneas futuras de investigación . . . . .	377
<b>Referencias</b>	<b>383</b>