

## TABLA DE CONTENIDOS

	página
<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Tabla de Contenidos</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción al problema . . . . .	1
1.2. Objetivo general . . . . .	2
1.3. Objetivos específicos . . . . .	2
1.4. Delimitación . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Modelos de optimización . . . . .	4
2.1.1. Modelos de optimización clásicos . . . . .	5
2.2. Algunos problemas clásicos de optimización en redes . . . . .	6
2.2.1. Árbol de cobertura mínimo . . . . .	6
2.2.2. Camino más corto . . . . .	9
2.3. El problema de Steiner en redes no dirigidas . . . . .	12
2.3.1. Formulación matemática del problema de Steiner en redes . . . . .	14
2.3.2. Aplicaciones relacionadas al problema de Steiner en redes . . . . .	15
2.4. Criterios de evaluación algorítmica . . . . .	17
2.4.1. Complejidad computacional . . . . .	17
2.4.2. Complejidad algorítmica . . . . .	19
2.5. Estrategias para generar la solución inicial . . . . .	20

2.5.1.	Inserción . . . . .	20
2.5.2.	Conexión . . . . .	20
2.6.	Heurísticas para generar solución inicial . . . . .	20
2.6.1.	(H1) Inserción arbitraria . . . . .	20
2.6.2.	(H2) ACM + poda . . . . .	20
2.6.3.	(H3) Inserción más barata . . . . .	21
2.6.4.	(H4) Heurística repetitiva de caminos más cortos . . . . .	21
2.6.5.	(HR) Heurística de inserción más barata aleatoria . . . . .	22
2.7.	Metaheurísticas . . . . .	22
2.7.1.	Introducción . . . . .	22
2.7.2.	Criterios de clasificación de metaheurísticas . . . . .	23
2.7.3.	Métricas de análisis de rendimiento de metaheurísticas . . . . .	25
2.7.4.	Vecindad . . . . .	25
2.7.5.	Estructura de vecindarios conocidos para el problema de Steiner . . . . .	26
2.7.6.	Óptimos globales y locales . . . . .	27
2.7.7.	Indicadores calidad de soluciones de una metaheurística . . . . .	28
2.8.	Definiciones de metaheurísticas conocidas . . . . .	28
2.8.1.	Búsqueda local . . . . .	28
2.8.2.	VNS . . . . .	30
2.8.3.	GRASP . . . . .	35
2.8.4.	Otras metaheurísticas conocidas . . . . .	37
2.9.	Estrategias de mejoramiento de soluciones de GRASP . . . . .	37
2.9.1.	Path Relinking . . . . .	37
2.10.	Reducciones aplicadas a instancias del problema de Steiner en redes . . . . .	39
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>43</b>
3.1.	Metodología de desarrollo . . . . .	43
3.2.	Instancias de pruebas . . . . .	44
3.2.1.	Instancias tipo OR . . . . .	44
3.2.2.	Instancias tipo I . . . . .	45
3.3.	Metodología de las pruebas . . . . .	45
3.3.1.	Detalle de los parámetros definidos en cada metaheurística . . . . .	46
3.3.2.	Rango de pruebas de parámetros definidos . . . . .	48
3.3.3.	Criterio de evaluación de las pruebas realizadas . . . . .	49

3.4.	Descripción de la estación de trabajo . . . . .	49
3.5.	Software usado . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Diseño</b>	<b>52</b>
4.1.	Diseño de la solución . . . . .	52
4.1.1.	Diseño del problema . . . . .	52
4.1.2.	Bibliotecas de <i>C++</i> usadas . . . . .	52
4.1.3.	Estructuras de datos especiales usadas . . . . .	53
4.1.4.	Nuevas vecindades propuestas . . . . .	54
4.1.5.	Heurísticas de soluciones iniciales propuestas y usadas . . . . .	55
4.1.6.	Heurística de solución inicial no iterativa modificada . . . . .	55
4.1.7.	Detalles de la implementación de algoritmos . . . . .	56
4.2.	Formato tablas resúmenes de resultados . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>Resultados y Análisis de Resultados</b>	<b>60</b>
5.1.	Resultados de las reducciones . . . . .	60
5.1.1.	Pruebas reducciones instancias C . . . . .	61
5.1.2.	Pruebas reducciones instancias D . . . . .	61
5.1.3.	Pruebas reducciones instancias E . . . . .	62
5.2.	Análisis pruebas reducciones . . . . .	62
5.2.1.	Instancias C . . . . .	62
5.2.2.	Instancias D . . . . .	62
5.2.3.	Instancias E . . . . .	62
5.2.4.	Análisis de todas las reducciones . . . . .	63
5.3.	Resultados pruebas solución inicial parámetro aleatoriedad . . . . .	63
5.4.	Análisis resultado parámetro aleatoriedad solución inicial . . . . .	64
5.5.	Resultados pruebas parámetro aleatoriedad búsqueda local . . . . .	65
5.5.1.	Análisis resultados instancias I320 y C . . . . .	65
5.6.	Resultados pruebas parámetro tasa metaheurística tipo BL . . . . .	66
5.7.	Análisis resultado parámetro tasa BL . . . . .	66
5.7.1.	Resultado pruebas parámetro tasa instancias I640, D y E . . . . .	67
5.8.	Resultados pruebas VND . . . . .	67
5.8.1.	Análisis resultados VND . . . . .	68
5.8.2.	Resultados VND instancias I640, D y E . . . . .	69

5.9. Resultados de pruebas RVNS . . . . .	69
5.9.1. Análisis resultados RVNS . . . . .	70
5.9.2. Resultados RVNS instancias I640, D y E . . . . .	71
5.10. Resultados pruebas BVNS . . . . .	72
5.10.1. Análisis resultados BVNS . . . . .	73
5.10.2. Resultados BVNS instancias I640, D y E . . . . .	74
5.11. Resultados pruebas GVNS . . . . .	75
5.11.1. Análisis resultados GVNS . . . . .	76
5.11.2. Resultados GVNS instancias I640, D y E . . . . .	77
5.12. Resultados pruebas GRASP . . . . .	78
5.12.1. Análisis resultados parámetro número iteraciones GRASP . . . . .	78
5.12.2. Resultados GRASP instancias I640, D y E . . . . .	79
5.13. Resultados pruebas GRASP + mejor VND . . . . .	80
5.13.1. Resultados GRASP + VND instancias I320 y C . . . . .	80
5.14. Análisis resultados pruebas GRASP + mejor VND . . . . .	80
5.14.1. Resultados GRASP + mejor VND instancias I640, D y E . . . . .	81
5.15. Resultados pruebas GRASP + mejor BVNS (agit. 1) . . . . .	81
5.15.1. Resultados GRASP + BVNS instancias I320 y C . . . . .	82
5.15.2. Análisis resultados pruebas GRASP + mejor BVNS agit. 1 . . . . .	82
5.15.3. Resultados GRASP + mejor BVNS instancias I640 y D . . . . .	82
5.16. Resultados pruebas PR parámetro tamaño de pozo . . . . .	83
5.16.1. Resultados tamaño pozo PR instancias I320 y C . . . . .	83
5.16.2. Análisis resultados PR parámetro tamaño pozo . . . . .	84
5.16.3. Resultados PR parámetro tam. pozo instancias I640, D y E . . . . .	84
5.17. Resultados pruebas PR parámetro umbral de distancia . . . . .	85
5.17.1. Resultados PR umbral distancia instancias I320 y C . . . . .	86
5.17.2. Análisis resultados pruebas PR parámetro umbral de distancia . . . . .	86
5.17.3. Resultados PR umb. distancia instancias I640, D y E . . . . .	87
5.18. Comparaciones finales de rendimiento metaheurísticas . . . . .	88
5.19. Comparaciones de resultados estado del arte . . . . .	90
<b>6. Conclusiones</b>	<b>92</b>
6.1. Aportes de la memoria al estado del arte . . . . .	92
6.2. Conclusiones generales . . . . .	93

6.3. Trabajo futuro . . . . .	94
<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>100</b>
7.1. Anexo 01: Resumen tablas resultados . . . . .	100
7.1.1. Resultados pruebas parámetro porcentaje aleatoriedad solución inicial . . . . .	100
7.1.2. Resultados pruebas parámetro porcentaje aleat. BL . . . . .	105
7.1.3. Resultados parámetros tasa búsqueda local . . . . .	108
7.1.4. Resultados pruebas VND . . . . .	110
7.1.5. Resultados pruebas RVNS . . . . .	113
7.1.6. Resultados pruebas BVNS . . . . .	119
7.1.7. Resultados pruebas GVNS . . . . .	125
7.1.8. Resultados pruebas GRASP . . . . .	131
7.2. Anexo 02: Diagrama de clases y detalles de los métodos y atributos .	134
7.2.1. Diagrama de clases . . . . .	134
7.2.2. Descripción de las clases con sus atributos y métodos . . . . .	137
7.3. Anexo 03: Planificación de las actividades del trabajo . . . . .	151
7.4. Anexo 04: Orden vecindades . . . . .	152
7.4.1. Orden vecindad escogida según parámetro vecindad escogida .	152
7.4.2. Orden vecindades VNS según parámetro orden vecindad . . .	152
7.5. Anexo 05: Detalles tablas anexas . . . . .	152
7.6. Anexo 06: Modo de uso del programa . . . . .	153
7.6.1. Detalles valores parámetros según metaheurística escogida . .	153
7.7. Anexo 07: Detalles datos gráficos resumen resultados . . . . .	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

	página
2.1. El proceso clásico de toma de decisiones [34] . . . . .	5
2.2. Árbol de cobertura mínima . . . . .	6
2.3. Ejemplo de solución válida para el problema de Steiner en redes . . . . .	13
2.4. Clases de complejidad en un problema de decisión [34] . . . . .	18
2.5. Diseño de espacio de una metaheurística [34] . . . . .	23
2.6. <b>VNS descendente, VND</b> [24] . . . . .	32
2.7. <b>VNS reducida, RVNS</b> [24] . . . . .	33
2.8. <b>VNS básica (BVNS)</b> [24] . . . . .	34
2.9. <b>VNS general (GVNS)</b> [24] . . . . .	35
2.10. Cuarta reducción [34] . . . . .	41
5.1. Calidad solución v/s metaheurística empleada . . . . .	88
5.2. Zoom calidad solución v/s metaheurística empleada . . . . .	88
5.3. Cant. óptimos globales obtenidos v/s Metaheurística empleada . . . . .	89
5.4. Tiempo empleado v/s Metaheurística empleada . . . . .	90
7.1. Resumen diagrama de clases . . . . .	134
7.2. Diagrama de clases detallado parte 1 . . . . .	135
7.3. Diagrama de clases detallado parte 2 . . . . .	136

## ÍNDICE DE TABLAS

	página
4.1. Formato resultados . . . . .	57
5.1. Resultados test reducciones instancias C . . . . .	61
5.2. Resultados test reducciones instancias D . . . . .	61
5.3. Resultados test reducciones instancias E . . . . .	62
5.4. Resumen resultados parámetro aleatoriedad solución inicial . . . . .	64
5.5. Resumen resultados pruebas aleatoriedad búsqueda local instancias C320 . . . . .	65
5.6. Análisis resultados parámetro aleatoriedad búsqueda local instancias C320 . . . . .	65
5.7. Resumen resultados pruebas parámetro tasa metaheurística tipo BL .	66
5.8. Resumen mejores vecindades por cada tipo de instancia . . . . .	66
5.9. Resultados búsqueda local parámetro tasa instancias I640, D y E . .	67
5.10. Resumen resultados VND . . . . .	68
5.11. Resumen análisis VND . . . . .	68
5.12. Resumen resultados pruebas RVNS Agitación 0 . . . . .	70
5.13. Resumen resultados pruebas RVNS Agitación 1 . . . . .	70
5.14. Resumen análisis RVNS . . . . .	70
5.15. Resumen resultados pruebas BVNS Agitación 0 . . . . .	73
5.16. Resumen resultados pruebas BVNS Agitación 1 . . . . .	73
5.17. Resumen análisis BVNS . . . . .	73
5.18. Resumen resultados pruebas GVNS Agitación 0 . . . . .	75
5.19. Resumen resultados pruebas GVNS Agitación 1 . . . . .	76
5.20. Resumen análisis GVNS . . . . .	76
5.21. Resumen resultados pruebas GRASP instancias I320 y C . . . . .	78
5.22. Resumen análisis GRASP (num. iteraciones = 90) . . . . .	78
5.23. Resultados GRASP + mejor VND instancias I320 y C . . . . .	80
5.24. Resultados GRASP + mejor BVNS instancias I320 y C . . . . .	82
5.25. Resultados umbral distancia instancias I320 y C . . . . .	86
5.26. Comparación resultados actuales v/s resultados Ribeiro [8] . . . . .	90
7.1. Pruebas parámetro aleatoriedad tipo BL I320 . . . . .	105

7.2. Pruebas parámetro aleatoriedad tipo BL C . . . . .	106
7.3. Pruebas parámetro aleatoriedad tipo BL C y I320 juntas . . . . .	107
7.4. Pruebas parámetro tasa tipo BL instancias I320 y C . . . . .	108
7.5. Resultados búsqueda local vecindad key path . . . . .	109
7.6. Resultados VND instancias I320 . . . . .	110
7.7. Resultados VND instancias C . . . . .	111
7.8. Resultados VND instancias C320 . . . . .	112
7.9. resultados RVNS instancias I320 agitación 0 . . . . .	113
7.10. Resultados RVNS instancias I320 agitación 1 . . . . .	114
7.11. Resultados RVNS instancias C agitación 0 . . . . .	115
7.12. Resultados RVNS instancias C agitación 1 . . . . .	116
7.13. Resultados RVNS instancias C320 agitación 0 . . . . .	117
7.14. Resultados RVNS instancias C320 agitación 1 . . . . .	118
7.15. Resultados BVNS instancias I320 agitación 0 . . . . .	119
7.16. Resultados BVNS instancias I320 agitación 1 . . . . .	120
7.17. Resultados BVNS instancias C agitación 0 . . . . .	121
7.18. Resultados BVNS instancias C agitación 1 . . . . .	122
7.19. Resultados BVNS instancias C320 agitación 0 . . . . .	123
7.20. Resultados BVNS instancias C320 agitación 1 . . . . .	124
7.21. Resultados GVNS instancias I320 agitación 0 . . . . .	125
7.22. Resultados GVNS instancias I320 agitación 1 . . . . .	126
7.23. Resultados GVNS instancias C agitación 0 . . . . .	127
7.24. Resultados GVNS instancias C agitación 1 . . . . .	128
7.25. Resultados GVNS instancias C320 agitación 0 . . . . .	129
7.26. Resultados GVNS instancias C320 agitación 1 . . . . .	130
7.27. Resultados GRASP instancias I320 . . . . .	131
7.28. Resultados GRASP instancias C . . . . .	132
7.29. Resultados GRASP instancias C320 . . . . .	133
7.30. Planificación actividades . . . . .	151
7.31. Tabla orden vecindades según vecindad escogida . . . . .	152
7.32. Tabla orden vecindades VNS según parámetro orden vecindad . . . . .	152
7.33. Tabla parámetros según metaheurística escogida . . . . .	153
7.34. Tabla resumen gap promedios obtenidos por cada metaheurística testeada . . . . .	155



7.35. Tabla resumen cantidad de valores óptimos obtenidos por cada metaheurística testada . . . . .	156
--	-----