

Trabajo Fin de Máster

Organización Industrial y Gestión de Empresas

Optimización de las misiones de un dron para la monitorización de objetivos con técnicas metaheurísticas Tabu Search

Autor: Enrique Terriza Díaz

Tutor: José Luis Andrade Pineda

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Organización Industrial y Gestión de Empresas

Optimización de las misiones de un dron para la monitorización de objetivos con técnicas metaheurísticas Tabu Search

Autor:

Enrique Terriza Díaz

Tutor:

José Luis Andrade Pineda

Profesor Sustituto Interino en Dpto. Organización y Gestión de Empresas I
Gestor de Proyectos de Transferencia I+D+i en Grupo Robótica, Visión y Control

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Optimización de las misiones de un dron para la monitorización de objetivos con técnicas metaheurísticas Tabu Search

Autor: Enrique Terriza Díaz

Tutor: José Luis Andrade Pineda

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero agradecer a José Luis Andrade Pineda su apoyo, constancia y dedicación, son muchos meses de trabajo que culminan con este proyecto. Sin duda, ha sido un camino duro, aunque el esfuerzo ha merecido la pena, tanto en el ámbito profesional como personal.

Me gustaría agradecer a mi familia y pareja Laura, el haber estado ahí en los momentos más duros y complicados de manera incondicional, aportándome esa energía y fuerza que se necesita para continuar persiguiendo unas metas que hoy se materializan en este trabajo. Vuestro apoyo y confianza me ha ayudado a ser la persona que soy, por todo ello, os doy las Gracias.

Por último, agradecer a mi amigo Álvaro su ánimo y comprensión durante estos meses, sirviendo de respiro en momentos complicados.

Enrique Terriza Díaz

Sevilla, 2020

En los últimos años, el dron o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) se ha convertido en objeto de múltiples estudios que dan cobertura a los problemas de monitorización de objetivos o logística de redes de distribución. Al no estar condicionado por las restricciones que imponen las infraestructuras actuales, su uso permite mejorar la eficiencia, seguridad y fiabilidad del servicio. Además, los últimos avances tecnológicos como el desarrollo de materiales más ligeros y chasis más robustos, mejores sensores y algoritmos de control o la paulatina mejoría en la capacidad de las baterías, han acelerado su uso a gran escala.

En este TFM, un único dron debe monitorizar a un conjunto de clientes distribuidos en un plano, realizando múltiples misiones no coincidentes en el tiempo, minimizando el número de baterías y la distancia total recorrida. El problema está sujeto a restricciones de capacidad de batería y disco duro del dron. El consumo de energía se modeliza como una función lineal que considera dos tipos de movimientos: traslación entre objetivos y hovering sobre el objetivo. Este proyecto contribuye con una herramienta heurística parametrizable que resuelve el problema planteado de forma eficiente.

La herramienta consiste en una aplicación C++ en la que se ha desarrollado una metaheurística basada en el método Gradual Tabu Search. Se presenta evaluación experimental de la eficiencia de la herramienta para generar soluciones aproximadas a este problema NP-hard de forma eficiente. Tal y como veremos, de la heurística resultarán: la cantidad de viajes y la secuencia óptima del dron para cumplir con las exigencias de problema. Para un dataset de 8 escenarios representativos, se realiza análisis de sensibilidad sobre los parámetros del algoritmo con el fin de mejorar la identificación de las características respecto de la calidad de la solución aproximada resultante y de los tiempos de computación.

Abstract

In recent years, the drone or UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) is one of the most innovative solutions, used in studies of targets monitoring and delivery on the last kilometre. Nowadays, it does not have networking constraints as traditional vehicles, so they could be an efficiency, security, and reliability solution. In addition, the last events in technology such as lighter and stronger materials for frame, sensing and coordinating algorithms, battery capacity are expected to accelerate large-scale UAV adoption.

In that work, a drone must check a path of customers distributed in an area, doing multiple missions in a different frame time, minimizing the number of batteries and the flight distance travelled. Operating conditions are defined as constraints: battery and hard disk memory capacities. The energy consumption is a linear function of two kinds of movements: translation between objectives and hovering over the objective. The project contributes with a changing metaheuristic tool which solves the presented model efficiently.

The tool is a C++ application which has a metaheuristic development based on the Gradual Tabu Search method. Efficiency experimental results are shown as a useful tool to achieve optimal solutions for NP-Hard problems. Throughout the work, we will solve a dataset of 8 scenarios getting: UAV tours quantity and UAV routes which meet the problem requirements. Moreover, some tests are made over algorithm parameters to identify the characteristics which improve the solution quality and computational time.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción y Objetivos del Proyecto	1
2 Revisión de la Literatura	7
3 Descripción del Problema	13
3.1 Vehículo empleado: Dron	13
3.2 Tareas del dron	14
3.3 Entorno o infraestructura	15
3.4 Plan de servicio	15
4 Resolución Heurística del Problema	19
4.1 Aspectos económicos	19
4.2 Aspectos técnicos	21
4.3 Método de Resolución según un Tabu Search (TS)	21
4.3.1 Solución inicial	22
4.3.2 Vecindad	22
4.3.3 Ruta eficiente	24
4.3.4 Lista Tabu	25
4.3.5 Criterios parada	27
4.4 Método de Resolución según un Gradual Tabu Search (GTS)	28
4.4.1 Generador de nueva semilla	29
4.4.2 Criterios parada	30
4.5 Implementación del GTS para MTCDVRP	30
5 Experimentación	47
5.1 Escenario 1: n51-Demand160-Endurance200	47
5.2 Escenario 2: n65-Demand200-Endurance365	50
5.3 Escenario 3: n76-Demand280-Endurance180	52
5.4 Escenario 4: n80-Demand100-Endurance320	54
5.5 Escenario 5: n101-Demand400-Endurance2700	56
5.6 Escenario 6: n121-Demand200-Endurance720	58
5.7 Escenario 7: n151-Demand200-Endurance351	60
5.8 Escenario 8: n199-Demand200-Endurance420	62
5.9 Recopilación de Resultados en los Escenarios	64
5.10 Análisis de sensibilidad modelo Tabu Search: Lista Tabu	64
5.11 Análisis de sensibilidad modelo evolutivo: Nivel Saturación del UAV	65
6 Conclusiones	69
Anexo	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1 Características del dron M200.	13
Tabla 4–1 Ejemplo de aplicación de la lista Tabú a un problema de 15 nodos y $\text{Tabu}_{\text{Length}} = 5$.	25
Tabla 5–1 Mejor resultado obtenido, Escenario 1 (n51-D160-E200).	48
Tabla 5–2 Mejor resultado obtenido, Escenario 2 (n65-D200-E365).	50
Tabla 5–3 Mejor resultado obtenido, Escenario 3 (n76-D280-E180).	52
Tabla 5–4 Mejor resultado obtenido, Escenario 4 (n80-D100-E320).	54
Tabla 5–5 Mejor resultado obtenido, Escenario 5 (n101-D400-E2700).	56
Tabla 5–6 Mejor resultado obtenido, Escenario 6 (n121-D200-E720).	58
Tabla 5–7 Mejor resultado obtenido, Escenario 7 (n151-D200-E351).	60
Tabla 5–8 Mejor resultado obtenido, Escenario 8 (n199-D200-E420).	62
Tabla 5–9 Resultados de las simulaciones de los 8 escenarios.	64
Tabla 5–10 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado sobre el parámetro $\text{Tabu}_{\text{length}}$.	65
Tabla 5–11 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado sobre los parámetros $\text{Weight}_{\text{QQ}}$ y $\text{Weight}_{\text{MM}}$.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Ciclo de trabajo del UAV durante una misión.	14
Figura 3.2 Plan de servicio de 5 misiones para cumplir con 31 clientes.	15
Figura 4.1 Modelo Tabu Search.	22
Figura 4.2 Construcción heurística para la generación de una solución inicial.	22
Figura 4.3 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Cross Exchange.	23
Figura 4.4 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Relocate Operator.	23
Figura 4.5 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Exchange Operator.	23
Figura 4.6 Cálculo de la vecindad aplicando el criterio Cross Exchange 2-edge.	24
Figura 4.7 Ejemplo de ruta ineficiente k , generada por el modelo Tabu Search.	24
Figura 4.8 Cálculo de diferentes configuraciones de una ruta y selección de la óptima.	24
Figura 4.9 Comprobación de la configuración de una ruta con los históricos.	25
Figura 4.10 Comprobación de la solución en la lista Tabu.	25
Figura 4.11 Criterios de parada del método Tabu.	28
Figura 4.12 Proceso de evolución gradual [21].	28
Figura 4.13 Modelo evolutivo aplicado al Tabu Search.	29
Figura 4.14 New Path Generator del modelo evolutivo Tabu Search.	29
Figura 4.15 Criterios de parada del modelo evolutivo Tabu Search.	30
Figura 4.16 Estructura de archivos en Visual Studio para resolver el problema MTCDVRP.	31
Figura 4.17 Estructura del modelo de optimización en Visual Studio para resolver el problema MTCDVRP.	32
Figura 4.18 Fichero input datos de partida, ejemplo para un escenario de 51 nodos	33
Figura 4.19 Distribución de nodos e identificación de la ruta 1 en el plano bidimensional para un escenario de 51 nodos	34
Figura 4.20 Solución inicial (subproblema 0, iteración TS 0) generada por el método GTS para un escenario de 51 nodos.	34
Figura 4.21 Solución (subproblema 0, iteración TS 1) para un escenario de 51 nodos.	35
Figura 4.22 Solución completa del subproblema 0 para un escenario de 51 nodos.	41
Figura 4.23 Solución completa del subproblema 0 para un escenario de 51 nodos.	42
Figura 4.23 Finalización del programa al alcanzar el límite de ciclos no mejora para un escenario de 51 nodos.	43
Figura 5.1 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 1 (n51-D160-E200).	48
Figura 5.2 Representación de las rutas del UAV, Escenario 1 (n51-D160-E200).	49
Figura 5.3 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 1 (n51-D160-E200).	49
Figura 5.4 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 2 (n65-D200-E365).	50
Figura 5.5 Representación de las rutas del UAV, Escenario 2 (n65-D200-E365).	51

Figura 5.6 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 2 (n65-D200-E365).	51
Figura 5.7 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 3 (n76-D280-E180).	52
Figura 5.8 Representación de las rutas del UAV, Escenario 3 (n76-D280-E180).	53
Figura 5.9 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 3 (n76-D280-E180).	53
Figura 5.10 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 4 (n80-D100-E320).	54
Figura 5.11 Representación de las rutas del UAV, Escenario 4 (n80-D100-E320).	55
Figura 5.12 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 4 (n80-D100-E320).	55
Figura 5.13 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 5 (n101-D400-E2700).	56
Figura 5.14 Representación de las rutas del UAV, Escenario 5 (n101-D400-E2700).	57
Figura 5.15 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 5 (n101-D400-E2700).	57
Figura 5.16 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 6 (n121-D200-E720).	58
Figura 5.17 Representación de las rutas del UAV, Escenario 6 (n121-D200-E720).	59
Figura 5.18 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 6 (n121-D200-E720).	59
Figura 5.19 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 7 (n151-D200-E351).	60
Figura 5.20 Representación de las rutas del UAV, Escenario 7 (n151-D200-E351).	61
Figura 5.21 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 7 (n151-D200-E351).	61
Figura 5.22 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 8 (n199-D200-E420).	62
Figura 5.23 Representación de las rutas del UAV, Escenario 8 (n199-D200-E420).	63
Figura 5.24 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 8 (n199-D200-E420).	63
Figura 7.1 Log completo resultante de abordar el algoritmo GTS en la aplicación C++ al escenario ilustrativo de 51 nodos.	81

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

*Si quieres vivir una vida feliz, vincúlala a un objetivo,
no a personas o a objetos.*

- Albert Einstein -

El objeto del presente proyecto es la definición de la misión de reconocimiento por dron (UAV) de una serie de localizaciones dispersas en un área extensa. En concreto, la planificación y secuenciación óptima de los vuelos a realizar de modo que todos los puntos/localizaciones sean sobrevolados y grabados por un espacio de tiempo diferente en cada uno de ellos. Asumiendo que existe un punto desde el que se inician y finalizan los vuelos (que en nuestro caso no consideramos necesariamente centrado en el área a cubrir, aunque esto sea una de las configuraciones típicas), el propósito es la optimización de las misiones de vuelo del UAV considerando los aspectos técnicos-económicos del problema. Desde el punto de vista técnico, deben modelarse aspectos relevantes en la operación de este UAV como son la capacidad de batería y el espacio de disco duro para la grabación durante el tiempo que se sobrevuelan las localizaciones objetivo. Por otro lado, el factor económico se incorporará por minimización de costes fijos (usando como cost-driver el número de baterías a usar) y de costes variables por consumo de energía (cuya relación es directamente proporcional a la distancia recorrida en cada uno de los vuelos).

En este trabajo fin de máster (TFM), partimos de un problema a resolver según el siguiente enunciado:

“Nos encontramos ante un conjunto de clientes que se distribuyen en un plano y a los que hay que dar servicio, el cual consiste en su monitorización por un UAV. La distancia entre ellos es lo suficientemente significativa como para considerar que el UAV se desplaza entre los nodos a una velocidad de traslación constante y realiza una parada (no se para totalmente, sino que reduce su velocidad, y vuela en maniobra de hovering) cuando alcanza el objetivo, momento en el que se activa la cámara y realiza la grabación. Finalizada la cobertura del cliente, se desactiva el dispositivo de grabación y se desplaza hacia otro cliente. Dos términos se contabilizan en el consumo de batería: traslación entre objetivos y hovering sobre el objetivo. Cuando los recursos del UAV se saturan (falta de batería para continuar desplazándose o falta de memoria en disco para continuar grabando), éste regresa a la estación central o depot para su puesta a punto (reemplazo de batería y descarga del disco duro) y quedar equipado de nuevo con el 100% de los recursos (batería llena y disco vacío) para una nueva misión (o ruta de servicio) del UAV. Se busca realizar el trabajo con los mínimos recursos (número de baterías del UAV, equivalente al número de misiones/rutas a realizar por el UAV) y el mínimo consumo de energía (recorriendo la menor distancia posible)”.

El trabajo comienza con una revisión del estado del arte del problema en estudio (**Capítulo 2**). El problema de planificación y secuenciación planteado es una variante del tipo VRP (*Vehicle Routing Problem*), donde se dispone de un único vehículo que puede realizar múltiples viajes con limitaciones de capacidad y distancia total recorrida MTC DVRP (*Multi Trip Capacity Distance Vehicle Routing Problem*).

En el **Capítulo 3** se exponen las particularidades de la infraestructura (clientes distribuidos en un plano con una estación central o depot) y el tipo de vehículo empleado (drón con recursos limitantes de batería y disco duro), así como las condiciones a cumplir en la confección de las rutas del plan de vuelo.

Dado que, según se justifica con posterioridad, el modelado matemático de este caso de estudio resultaría en un

problema NP-hard, nos decantamos por no presentar expresamente la formulación del problema MILP (*Mixed-Integer Linear Programming*), pues su resolución exacta no es fructífera para los tamaños reales manejados en este TFM (conjunto de clientes ≥ 30). En el **Capítulo 4** se presenta la aportación principal de este TFM: una metaheurística basada en una variante del método TS (denominada Gradual Tabu Search) caracterizada por un proceso de evaluación gradual y con el que somos capaces de generar soluciones aproximadas a este caso de estudio en tiempo computacional razonable.

En el **Capítulo 5** se presenta la experimentación que se ha realizado para validar la metaheurística desarrollada para el MTC DVRP en un dataset de escenarios que exhiben características diversas: como la ubicación del depot (centrada, parcialmente centrada o incluso desplazada a un área sin localizaciones que servir en su entorno) o la disposición de las localizaciones a servir en el área de trabajo (cuasi-uniformemente dispersas, u organizadas como en clusters de clientes). En total, se han utilizado 8 escenarios, en base a los que se ha realizado también un análisis de sensibilidad de los parámetros del algoritmo heurístico desarrollado con objeto de optimizar el uso de la herramienta (compromiso entre la solución aproximada encontrada y el tiempo computacional).

Por último, en el **Capítulo 6** se presentan brevemente las conclusiones.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

El problema de enrutado de vehículos (VRP) definido por Dantzig and Ramser [1] es ampliamente conocido en el ámbito científico dado su uso en multitud de aplicaciones prácticas. Se trata de minimizar el coste total de transporte o distancia recorrida, satisfaciendo la necesidad de unos clientes conocidos y localizados en posicionares fijas de un plano, mediante una flota de vehículos localizados en una estación de partida (*depot*). El problema base no considera restricciones habituales que se dan en la práctica, como la limitación de la carga útil de un vehículo, consumo de combustible o tiempos de entrega en cliente. Para una recopilación de los estudios realizados para las muchas variantes del VRP referimos a Toth and Vigo [2].

Sin embargo, con las nuevas realidades de los medios de transporte y el manejo de mercancías, nuevos problemas logísticos han dado lugar a nuevas variantes del VRP. Mor and Speranza [3] realiza una revisión más actualizada de los modelos VRP e identifica nuevas vías de trabajo para mejorar la toma de decisiones tácticas de una empresa. Son decisiones que pueden surgir, decidir si se entrega el material a todos los clientes o no, si es posible no satisfacer la demanda de un cliente en una sola entrega, además de decidir cuándo se empieza una ruta.

Una de las variantes que resulta de interés en este proyecto es el problema MTVRP (*Multiple Trip Vehicle Routing Problem*), donde se permite que los vehículos puedan realizar viajes de ida (clientes) y vuelta (depot) durante una jornada de trabajo para realizar el set up del vehículo y así disponer del 100% de su capacidad para llevar a cabo nuevas misiones. El primer estudio de este tipo se debe a Fleischmann [4], que para una serie de problemas de distribución consideraba una flota de vehículos heterogénea y el tiempo de entrega de la mercancía en cliente. Para ciertos casos de estudio donde se necesite optimizar la flota y la jornada de trabajo esté poco saturada, se puede recurrir a utilizar un solo vehículo que realice múltiples viajes (Cattaruzza et al) [5] pues el comportamiento matemático del problema MTVRP y VRP con flota de vehículos homogénea es el mismo, y tan sólo habría que tener en cuenta que hay que considerar los tiempos de comienzo de ruta para que no se pueden solapar los comienzo de las misiones. Cattaruzza et al [6] presentan un amplio resumen de los diferentes trabajos realizados en este ámbito, agrupándolos en función al número de índices utilizados para desarrollar la formulación matemática; 4 índices (par de nodos, vehículos y misiones), 3 índices (par de nodos y vehículos o misiones) y 2 índices (par de nodos).

Otra variante relevante para nuestro caso de estudio es el DVRP (*Distance Vehicle Routing Problem*), que considera como restricción la distancia máxima que el vehículo puede recorrer. La mayoría de los modelos desarrollados para este problema, incluyen variables asociadas a los nodos y su resolución requiere de gran capacidad computacional al tratarse de un problema combinatorio duro (NP-Hard). Kara [7] presenta una formulación basada en programación lineal entera con variables de flujos que proporciona mejores soluciones y, por lo tanto, se convierte en un referente base para posteriores estudios. Estudios como el de Sundar et al [8], que resuelve el que identifica como FCMVRP (*Fuel Constrained Multiple Vehicle Routing Problem*), combina las dos variantes mencionadas hasta el momento: (i) limitación en consumo de combustible (equivalente a la distancia a recorrer por el vehículo) y (ii) viajes al depot para recargar los vehículos, con la peculiaridad de disponer de múltiples estaciones para éste fin. En realidad, existe una variedad de estudios que consideran más de una estación MDVRP (*Multiple Depots Vehicle Routing Problem*) donde la distancia entre clientes es muy grande y la ecuación de costes se invierte, es decir, los costes variables penalizan mucho más que los costes fijos (disponer de una nuevo depot). Montoya et al [9] recopila en su artículo las publicaciones más importantes realizadas entre 1988 y 2014.

Puesto que en nuestro TFM se da una limitación en la capacidad de grabación en disco, son estudios relevantes para nosotros los que abordan el CVRP (*Capacity Vehicle Routing Problem*) en que se limita la capacidad de

carga del vehículo. Las variantes MDVRP y CVRP se combinan en Molina et al [10], donde se formula el problema MTCVRP (*Multiple Trip Capacity Vehicle Routing Problem*) para dar respuesta a problemas relacionados con la logística humanitaria. En este caso de estudio, es vital disponer de una capacidad de respuesta rápida para minimizar los daños sufridos ante desastres como terremotos, tsunamis, o huracanes entre otros, buscando minimizar los tiempos de vuelo, máxima latencia (tiempo requerido para rescatar al último afectado) y número de vehículos en cuya operativa se permite realizar múltiples viajes.

Dentro de las aplicaciones más comunes del MTRVP, hay que destacar los problemas de cobertura como el que se presenta en el artículo de Chauhan [11], donde se dispone de una flota de UAVs y un conjunto de potenciales estaciones o depots que hay que definir con objeto maximizar la demanda servida a un conjunto de clientes, en concreto, aplicado al caso de estudio de un área metropolitana del estado de Portland, USA. Por otro lado, nos encontramos problemas de planificación de rutas (path-planning) como es el caso de Choi et al [12] quien aplica el modelo de Kara [7] en la resolución del problema en el que un dron tiene que grabar a un conjunto de clientes, para ello, el dron realiza una captura de imágenes durante la trayectoria descrita. En este problema se busca minimizar la distancia total recorrida por el UAV, considerando penalizaciones por giro o cambios de rumbo del vehículo, pues son maniobras altamente ineficientes en el consumo de la energía de las baterías. Por último, nos encontramos con la última milla en aplicaciones de distribución de mercancías (last mile delivery). Dorling et al [13] consideran que la energía consumida por los rotores del dron es aproximadamente lineal al peso de la batería y la carga transportada e incorpora este modelo a la función de coste del problema MTRVP. Troudi et al [14] desarrollan un modelo de optimización para el problema VRP teniendo en cuenta la autonomía y el consumo de energía de los UAVs e incluyendo una función de costes considerando dos políticas de optimización: reducir la distancia recorrida y el número de UAVs para la entrega de mercancías en zonas urbanas. Poikonen [15] propone un modelo para la resolución del problema MVDPR (Multi-Visit Drone Routing Problem) en que un tándem entre camión y UAV intenta aprovechar las bondades de ambas tipologías de vehículos (camiones que utilizan el combustible diésel y drones). Para el UAV se asume que despega desde el camión con mercancía para entregar a un conjunto de clientes, se considera el consumo de batería en función a la carga transportada, y que antes de quedarse sin batería se regresa al camión para reponer baterías cargadas, recoger nueva mercancía y partir hacia una nueva localización de clientes. El camión se comporta pues como un depot móvil que optimiza la distancia total a recorrer por el UAV. Murray and Raj [16] desarrollan un algoritmo para el mismo problema, pero considerando una flota de UAVs heterogénea.

Finalmente, nos concentramos en revisar los métodos de resolución reportados para el problema MTRVP. Múltiples estudios plantean una formulación exacta que se apoya en software comercial para su resolución. Karaoglan [17] desarrolla una formulación MIP (*Mixed Integer Programming*) y un algoritmo exacto basado en el método Branch and Cut que se apoya en una heurística para obtener una buena solución inicial. No obstante, la mayoría de los científicos optan por métodos de resolución aproximados, al tratarse de un problema combinatorio cuya resolución se complica cuando el tamaño del problema es considerable (conjunto de clientes ≥ 30). Dentro de los procedimientos metaheurísticos conocidos, en este TFM hemos explotado las posibilidades del método TS (*Tabu Search*), el cual guía un procedimiento heurístico de búsqueda local en la búsqueda de optimalidad global. Su filosofía se basa en derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. El marco de memoria adaptativa de la búsqueda Tabu no sólo explota la historia del proceso de resolución del problema, sino que también exige la creación de estructuras para hacer posible tal explotación. Cordeau and Laporte [18] desarrollan el modelo UTS (*Unified Tabu Search*) en el que las restricciones del problema se incluyen en la función objetivo utilizando un coeficiente, el cual toma el valor cero en caso de que la solución encontrada al explorar la vecindad sea factible. El problema se relaja explorando los espacios de soluciones factibles y en cada iteración, se selecciona la mejor solución encontrada y se prohíbe el uso del par escogido durante las próximas iteraciones. Moccia et al [19] generalizan la aplicación de uso de la heurística UTS a las diferentes variantes del VRP, para ello desarrollan un nuevo modelo ITS (*Incremental Tabu Search*) en el que aplican una nueva estructura en la creación de la vecindad, evaluando todas las posibles combinaciones de clientes entre rutas para encontrar la solución óptima. Estudios como el de Gendreau and Potvin [20] investigan sobre la mejora de la efectividad (mejor solución encontrada) y eficiencia (velocidad para encontrar una solución) utilizando diferentes estrategias para la definición de la vecindad, actualización de la lista Tabu o terminación de la búsqueda, mientras que Suzuki et Cortes [21] analizan como afecta al rendimiento del TS la modificación de la naturaleza del problema durante el proceso de optimización, concepto que hasta el momento, se consideraba fijo. Esta idea se conoce como evolución secuencial y gradual y se inspira en la transmisión de enfermedades entre especies, donde un virus presente en un ambiente A, no puede evolucionar directamente hacia un ambiente B (muy diferente), pero si indirectamente a través de su evolución hacia otras áreas parcialmente similares.

En lo que sigue, se aborda la resolución del problema de monitorización de objetivos usando un UAV. Este problema se aborda siguiendo a Cattaruzza [6], como un MTC DVRP (*Multi Trip Capacity Distance Vehicle Routing Problem*) que además se enriquece con otras consideraciones como las de Choi [12] y Dorling [13]. Como novedad, se incluye en la ecuación de costes el consumo de batería como función lineal del movimiento de traslación (travelling) y grabación del objetivo (hovering). Resulta un problema duro incluso para instancias de tamaño medio, por lo que en este TFM se desarrolla una heurística que genera una buena solución inicial y a partir de ahí, un TS al que se le incorpora el concepto de evolución gradual de Suzuki and Cortes [21]. La heurística creada, en las iteraciones de nuevos subproblemas aplica un factor que fuerza la exploración de espacios de soluciones que, de otra forma, no se alcanzaría por la propia naturaleza del problema.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este proyecto, un único UAV se encarga de servir a un conjunto de clientes (**targets**), realizando múltiples viajes/misiones/rutas cuyo origen y fin se establece en una única estación de servicio (**depot**). La correcta definición de este servicio debe atender a:

- *Las características del UAV.*
- *Las tareas que realizar por el UAV.*
- *El entorno en el que se mueve el UAV.*
- *La forma en la que se configura el servicio.*

3.1 Vehículo empleado: Dron

Un dron o UAV es un vehículo controlado remotamente, que se eleva por la fuerza de giro que proporcionan sus motores unidos a las hélices. En función al número de hélices nos encontramos con cuadricópteros, sexacópteros u octacópteros si tienen 4, 6 u 8 hélices respectivamente. Los drones permiten incorporar un GPS para poder fijar un rumbo de forma automática y que éstos de forma autónoma corrijan su vuelo y lo ajusten hasta llegar al punto indicado sin necesidad de control por parte del piloto, simplemente se observa lo que recoge la cámara que se envía en tiempo real o se graba dependiendo del caso. El tipo de dron empleado en trabajos de monitorización, utilizan cámaras de alta calidad 4k, donde cada minuto de grabación supone aproximadamente 375 Mb de memoria física en disco duro. A continuación, en la **Tabla 3-1** se recogen las especificaciones del dron M200, un UAV profesional utilizado para las inspecciones de infraestructuras. La información se ha consultado en la web del distribuidor Dji Global [22].

Tabla 3-1 Características del dron M200.

Característica	Parámetro
Velocidad max (Modo S)	82,8 km/h
Velocidad max (Modo P)	61,2 km/h
Velocidad max (Modo A)	82,8 km/h
Número baterías	2
Modelo batería	TB50
Capacidad	4.280 mAh
Modelo batería op.	TB55
Capacidad batería op.	7.660 mAh
Carga max. (2 TB50)	2,34 kg
Carga max. (2 TB55)	1,61 kg
Tiempo max. Vuelo sin carga (TB50)	27 min
Tiempo max. Vuelo sin carga (TB55)	38 min
Tiempo max. Vuelo cargado (TB50)	13 min
Tiempo max. Vuelo cargado (TB55)	24 min
Motor	DJI3515

En este proyecto, se tienen en cuenta los recursos limitantes del UAV como son el **consumo de energía de la batería**, que depende del consumo de energía de los rotores y peso del UAV, y **espacio de almacenamiento de disco duro de la cámara**, que depende del tipo de video y tiempo empleado en la grabación. Al encontramos ante un problema de enrutado (asignación de recursos) y no de diseño, se independiza el modelo de las características propias del UAV utilizado, considerando el consumo de energía como una función directamente proporcional a la distancia total recorrida, de igual forma que el consumo de espacio de disco lo es al tiempo de grabación.

3.2 Tareas del dron

En este proyecto, el objetivo del problema planteado es minimizar el número de baterías y distancia total recorrida por el UAV. En base a este objetivo, las tareas del UAV durante el plan de vuelo se pueden dividir en 2 tipos; tareas de valor añadido que dependen de las condiciones del problema y tareas de no valor añadido pero necesarias que se pueden considerar constantes para nuestro modelo y, por lo tanto, abstraerse del estudio.

Se definen dos tareas de valor añadido; travelling y hovering, ambos aplican de forma directa en la función objetivo en cuanto a distancia recorrida y restricciones de limitación de recursos del dron; nivel de batería y espacio de disco duro. El **travelling** es el movimiento rectilíneo de traslación entre dos nodos a una velocidad de crucero, para ello los motores deben aportar empuje y generar sustentación. Por otro lado, el **hovering** es el movimiento curvilíneo alrededor de un nodo a una velocidad de sobrevuelo, donde los motores únicamente deben generar sustentación. Se puede establecer una relación directamente proporcional entre estos dos tipos de velocidades, lo cual se convertirá en parámetro de entrada al modelo. En ambas trayectorias, se considera que el UAV mantiene una velocidad constante, por lo tanto, el consumo de energía es lineal con la distancia recorrida sin importar el tramo en el que se encuentre éste (inicio, fin o transcurso de la ruta).

El resto de las tareas que puede realizar un UAV como son las acciones de; despegue o aterrizaje y reemplazo de baterías o memoria de disco duro de la cámara, se consideran de no valor añadido (independientes al modelo) por los siguientes motivos:

1. El UAV realiza siempre sus misiones a la misma altura (nivel de vuelo), por lo tanto, no es necesario considerar los desplazamientos ascendente ni descendente del UAV.
2. Todas las misiones se realizan en una misma jornada de trabajo por un único UAV. No es objetivo del proyecto definir la hora de inicio y fin de cada vuelo, por lo que no se tienen en cuenta los recursos y el tiempo empleado en la puesta a punto del UAV durante su estancia en el depot.

A continuación, en la **Figura 3.1** se representa un esquema básico de las diferentes tareas que realiza un UAV durante una misión.

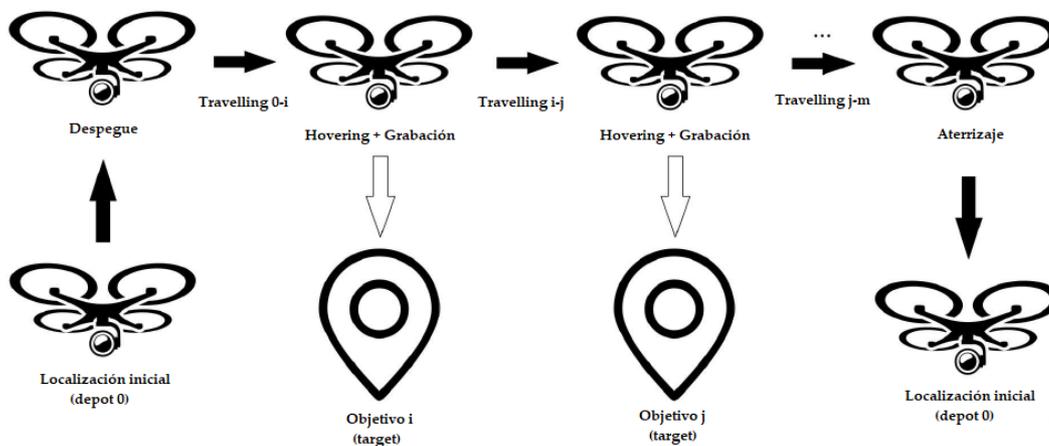


Figura 3.1 Ciclo de trabajo del UAV durante una misión.

3.3 Entorno o infraestructura

En este Proyecto, el entorno de trabajo en el que el UAV se desplaza lo componen dos tipos de nodos según su naturaleza; clientes o targets y estación central o depot. Los **targets** son los nodos a los que el UAV debe dar servicio, el cual consiste en visitar y monitorizar. Cada cliente i , se ubica en el plano bidimensional 2D, por lo tanto, son conocidas sus coordenadas cartesianas (x_i, y_i) . Además, cada cliente tiene asociada una demanda (D_i) , equivalente al tiempo de exploración que el UAV debe realizar sobre éste. El **depot** es la estación central donde se realiza el despegue y aterrizaje, así como las tareas de mantenimiento del UAV. De igual forma, es conocida la ubicación del depot en el plano (x_0, y_0) y éste siempre será el inicio y fin del trayecto en cada servicio, así como el lugar donde se reemplazan las baterías y tarjetas de memoria de la cámara, con objeto de poder disponer de la totalidad de los recursos del UAV para realizar un nuevo vuelo.

3.4 Plan de servicio

En este trabajo, el plan de servicio consiste en asignar los clientes a una determinada misión del UAV con el objetivo de realizar el ejercicio recorriendo la menor distancia posible, satisfaciendo las restricciones del problema.

Desde el comienzo de la misión en el depot, se van incluyendo aquellos clientes que van cumpliendo con las condiciones del problema, hasta el momento en el que el UAV debe regresar de nuevo al depot para cerrar la misión, y dar comienzo a otra nueva mientras existan clientes que no hayan sido servidos. Se pueden dar tres condiciones por la que el UAV regrese al depot; nivel de batería insuficiente, saturación del espacio de memoria del disco y servicio completado (todos los targets han sido servidos).

En la **Figura 3.2**, se representa el plan de servicio de un UAV que realiza 5 misiones para satisfacer las necesidades de un conjunto de 31 clientes y un único depot. Se puede observar rutas de todo tipo, por ejemplo, en la ruta 3, el UAV solo visita a 2 objetivos debido a su alta demanda, mientras que en la ruta 5, el UAV visita a 8 clientes¹.

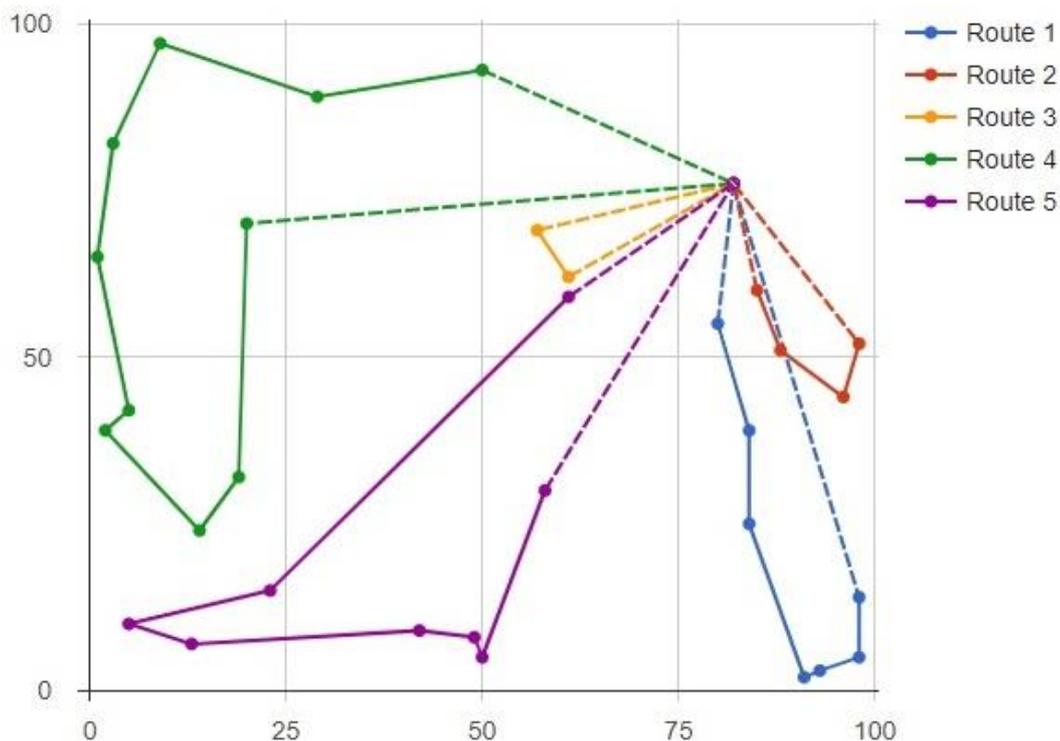


Figura 3.2 Plan de servicio de 5 misiones para cumplir con 31 clientes.

¹ La línea marcada en discontinua representa la salida y regreso del UAV al depot.

Para la configuración del servicio, se deben cumplir las restricciones que a continuación se enumeran:

1. Todos los clientes deben ser satisfechos.
2. Cada objetivo se visita una única vez y se realiza una cobertura de reconocimiento al completo. No es posible realizar una cobertura parcial y completarse en una siguiente misión.
3. Toda ruta comienza y acaba en el depot.
4. La distancia recorrida por el UAV durante una misión no puede superar la capacidad de batería. Como se ha comentado en el **Apartado 3.2**, dos tipos de movimientos aplican consumo de energía; travelling y hovering. Cuando se evalúa si un nuevo nodo formará parte de la trayectoria, se calculan estos dos conceptos de consumo, además del regreso del UAV al depot. Si dicha distancia es inferior a la capacidad, se procede a incluir al nodo en la misión, en caso contrario se evalúa un nuevo nodo o se regresa al depot (sino el UAV no tendría suficiente energía para regresar al depot).
5. El espacio de disco necesario para la grabación de objetivos durante una misión no puede superar a la capacidad de la tarjeta de memoria de la cámara del UAV. Cuando se evalúa si un nuevo nodo formará parte de la trayectoria, se calcula el espacio de la tarjeta de memoria disponible. Si hay suficiente memoria, se procede a incluir al nodo en la misión, en caso contrario se evalúa un nuevo nodo o se regresa al depot (sino el UAV llegaría a su objetivo y no tendría suficiente memoria para realizar la grabación).

4 RESOLUCIÓN HEURÍSTICA DEL PROBLEMA

El problema objeto de este TFM se ha planteado como un MTC DVRP definido sobre un grafo $G = (N, A)$, compuesto por un conjunto nodos $N = \{0, 1, 2, \dots, n+1\}$ y un conjunto de arcos $A = \{(i,j) : i,j \in N, i \neq j\}$. El conjunto $N^C = \{1, 2, \dots, n\}$, representa el conjunto de clientes o targets $N^C = \{1, 2, \dots, n\}$, a los que satisfacer su demanda D_i , mientras que $N^D = \{0, n+1\}$ representa los puntos que sirven como inicio y fin (un depot, a modo de estación central) de cada una de las misiones $K = \{1, 2, \dots, k\}$, que un único UAV puede realizar durante una jornada de trabajo/servicio.

En este capítulo, se presentan primero la definición de la función objetivo para la configuración del servicio, para proceder después al detalle de nuestro algoritmo metaheurístico que en base a una novedosa versión del método Tabu Search resuelve de forma eficiente este duro problema.

4.1 Aspectos económicos

El objetivo principal de aplicar la metodología desarrollada al problema de estudio es obtener el número de rutas y su secuencia que ofrece un menor coste, es decir, minimizar el valor presente de los costes totales (4-1).

$$\text{Min}(z) = C_{fix} + C_{var} \quad (4-1)$$

Donde:

1. z es el coste total del servicio, en €/servicio.
2. C_{fix} son los costes fijos, en €/servicio.
3. C_{var} son los costes variables, en €/servicio.

Los **costes fijos** son aquellos que permanecen invariables frente a pequeños cambios en los niveles de actividad del servicio. Según las condiciones descritas, la única variable a considerar en los costes fijos es el número de baterías necesarias para satisfacer las necesidades del problema. Tal y como se ha confeccionado el modelo, cada ruta/misión equivale al uso de un set de baterías², de modo que cuando en nuestro enfoque indicamos que el UAV regresa al depot, de forma implícita debe asumirse que al llegar se le reemplaza el set de baterías para estar listos para poder iniciar cualquier otra misión de vuelo³. La propia naturaleza del problema penaliza la apertura de nuevas rutas (mayor distancia total a recorrer), es decir, la necesidad de una batería adicional, por lo tanto, no se consideran los costes fijos en el modelo.

Por otro lado, los **costes variables** son aquellos que dependen del nivel de actividad del servicio como es el consumo de energía del UAV en cada vuelo. Este tipo de servicio es propio de empresas cuyos costes variables lo asocian al tiempo necesario para realizar el trabajo y recarga de las baterías empleadas. El coste de la energía y el tiempo son directamente proporcional a la distancia total recorrida, motivo por el cual nos centramos en

² Se presupone el uso de una flota de drones idénticos, que equipan un set de baterías idéntico. Tras cada misión, se sustituirán todas las baterías en el set instalado por un nuevo set de baterías totalmente cargadas.

³ Sin embargo, el tiempo necesario para este cambio del set de baterías se considera despreciable, con relación al resto de tiempos considerados. Por ello, no se ha incluido en el modelo.

minimizar este concepto (4-2).

$$\text{Min}(z) = \sum_k \sum_i \sum_j (c_{ij} \times x_{ijk}) \quad (4-2)$$

Donde:

- z es el coste total del servicio, en metros/servicio.
- c_{ij} son los costes variables, en metros/servicio.
- x_{ijk} son las variables binarias que se activan (toman valor 1) cuando el UAV recorre el arco (i, j) durante la misión k , en caso contrario, no se activa (toma valor 0).

Tal y como se comenta en el apartado 3.2, el UAV realiza dos tipos de movimientos, lo cual implica dos términos de distancias a controlar en cada desplazamiento. A continuación, se desglosan los costes variables del servicio (4-3):

$$c_{ij} = d_{ij} + h_j \quad \forall i, j \in N \quad (4-3)$$

Donde:

- d_{ij} es la distancia recorrida por el UAV durante el periodo de traslación (travelling) desde el nodo i al nodo j , en metros.
- h_j es la distancia recorrida por el UAV durante el periodo de sobrevuelo (hovering) sobre el nodo j , en metros.

El travelling se calcula según la distancia euclídea (4-4), mientras que el hovering se define como una función dependiente de la demanda requerida en el nodo de destino j , y la relación entre la velocidad de ambos movimientos (4-5).

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad \forall i, j \in N \quad (4-4)$$

$$h_j = V^t \times Dem_to_Dist \times D_j \quad \forall j \in N \quad (4-5)$$

Donde:

- x_i es la coordenada cartesiana del nodo i sobre el eje X , en metros.
- x_j es la coordenada cartesiana del nodo j sobre el eje X , en metros.
- y_i es la coordenada cartesiana del nodo i sobre el eje Y , en metros.
- y_j es la coordenada cartesiana del nodo j sobre el eje Y , en metros.
- V^t es la velocidad de travelling, en metros/segundo.
- **Dem_to_Dist** es el factor que indica cuanto más de distancia equivalente recorrida debe computarse por tantos D_j segundos de sobrevuelo, en relación con los metros que se habría recorrido en caso de una simple traslación.
- D_j es la demanda del nodo j , en segundos.

En este modelo, las posiciones y demandas de cada nodo son **inputs** del problema, es decir, dependen del caso de estudio analizado, mientras que la velocidad de traslación y el factor **Dem_to_Dist** del UAV son constantes del modelo, aunque se pueden modificar sus valores para estudiar diferentes variantes (testear diferentes modelos

de UAVs) de un mismo escenario. Esto último no es objeto de este trabajo.

4.2 Aspectos técnicos

En este Proyecto, se consideran dos restricciones que limitan el uso del UAV durante una misión.

$$\sum_i \sum_j (c_{ij} \times x_{ijk}) \leq E \quad \forall k \in K \quad (4-6)$$

$$\sum_i \sum_j (D_j \times x_{ijk}) \leq R \quad \forall k \in K \quad (4-7)$$

Donde:

- c_{ij} son los costes variables, en metros/servicio.
- x_{ijk} son las variables binarias que se activan (toman valor 1) cuando el UAV recorre el arco (i, j) durante la misión k, en caso contrario, no se activa (toma valor 0).
- E es el nivel máximo de distancia a recorrer (Endurance), en metros que deriva la limitación en capacidad de las baterías que equipa cada UAV.
- D_j es la demanda del nodo j, en segundos.
- R es la capacidad de almacenamiento de disco duro, o el nivel máximo de demanda a satisfacer, en segundos.

Por lo tanto, cualquier misión k que realiza el UAV debe cumplir con las restricciones de capacidad de batería E (4-6), y demanda del objetivo R (4-7).

4.3 Método de Resolución según un Tabu Search (TS)

Tal y como se muestra en la **Figura 4.1**, el algoritmo Tabu Search comienza con una fase de inicialización, donde se construye una solución factible s , que dé comienzo al proceso de iteración. A continuación, se genera la vecindad V o conjunto de soluciones factibles, seleccionando la mejor de todas s' . Para evitar bucles internos, se construye la lista Tabu donde se almacena aquellas combinaciones que han proporcionado óptimos locales con objeto de prohibirlas durante las próximas iteraciones (memoria a corto plazo). Por último, con la nueva solución s' , se repite el proceso en una nueva iteración hasta que se cumple el criterio de parada establecido, momento en el cual, el algoritmo devuelve la mejor solución encontrada S_{best} .

Se dice que una solución es completa, cuando se determinan las cuatro variables del vector que la componen:

1. RR_k es un vector que identifica la secuencia de clientes visitados por el UAV durante la ruta k, adimensional.
2. QQ_k es la demanda cubierta por el UAV durante la ruta k, en segundos.
3. MM_k es la distancia recorrida por el UAV durante la ruta k, en metros.
4. LL es la distancia total recorrida por el UAV, en metros.

En los siguientes apartados, se desarrolla en profundidad cada una de las etapas de las que consta el modelo.

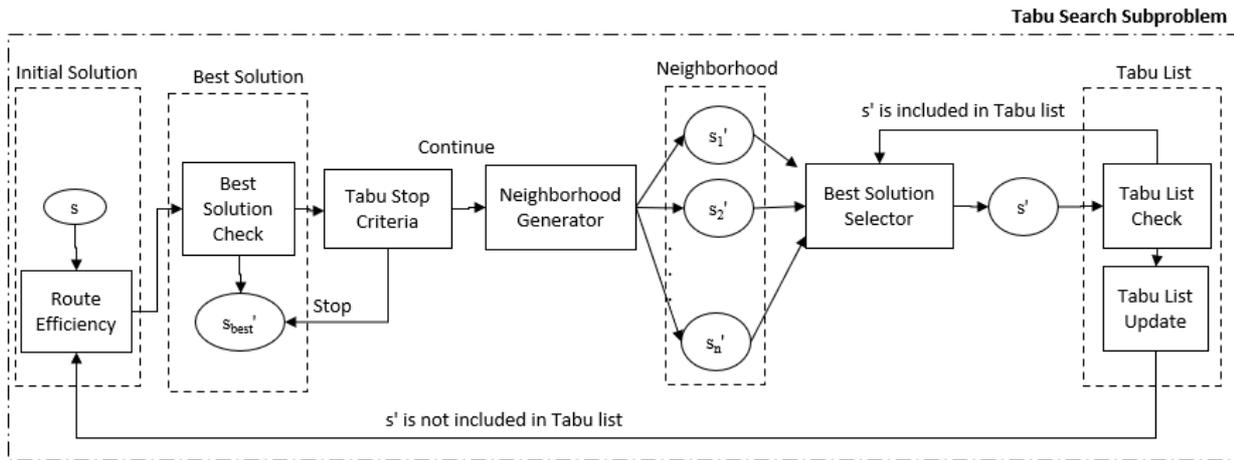


Figura 4.1 Modelo Tabu Search.

4.3.1 Solución inicial

La solución inicial del problema s , identifica un conjunto de rutas factibles para iniciar la iteración del modelo Tabu. En este proyecto, se opta por realizar una construcción heurística que mejore la eficiencia computacional, acercándose lo máximo posible a una solución óptima. Tal y como se representa en la **Figura 4.2**, el algoritmo consiste en iniciar una ruta k , saturarla de targets i , utilizando el criterio de mínima distancia, de forma que se seleccione y evalúe el nodo más cercano j al nodo de partida i . Si el nodo j cumple con las exigencias del modelo planteadas en el **Apartado 4.2** (batería y memoria de disco), éste se incorpora a la ruta k y se repite el proceso iterativo, en caso contrario, se desecha la incorporación y se cierra la ruta retornando al depot ($i=0$), para iniciar una nueva misión k' . El proceso de iteración se detiene, cuando todos los clientes han sido satisfechos.

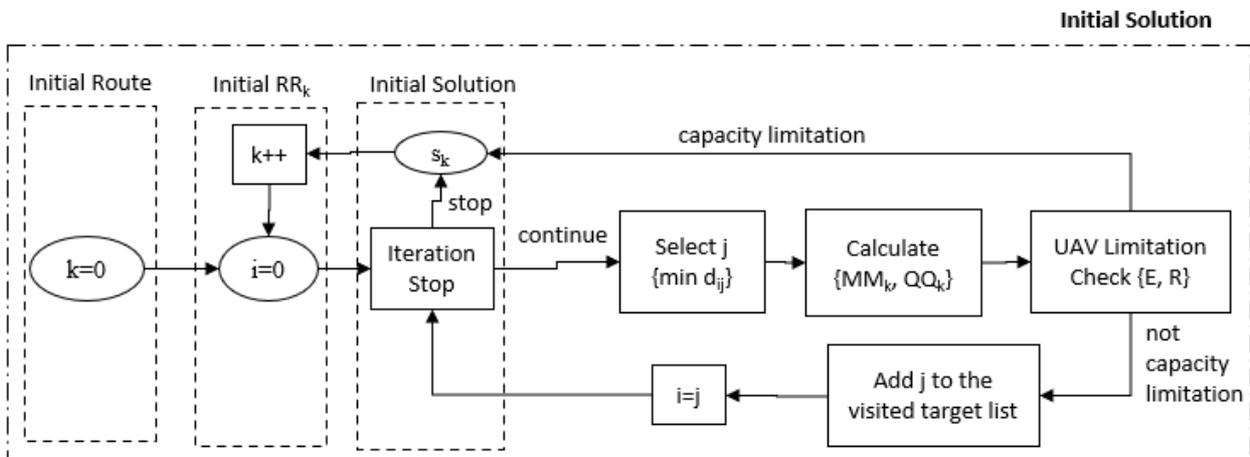


Figura 4.2 Construcción heurística para la generación de una solución inicial.

4.3.2 Vecindad

La vecindad V en el método Tabu, consiste en la definición de la región de soluciones factibles a evaluar, generadas a partir de una solución s , **input** al proceso iterativo. La operativa habitual empleada en los problemas VRP para determinar la vecindad se representa en la **Figura 4.3** y consiste en romper dos arcos (**edges**) no adyacentes de una solución (**ab**), con objeto de generar dos sub-trayectorias (**a-b**) y reconectarlas para generar una nueva solución (**aB**)⁴.

⁴ Cuando un arco cambia de dirección, se identifica la trayectoria con letra mayúscula.

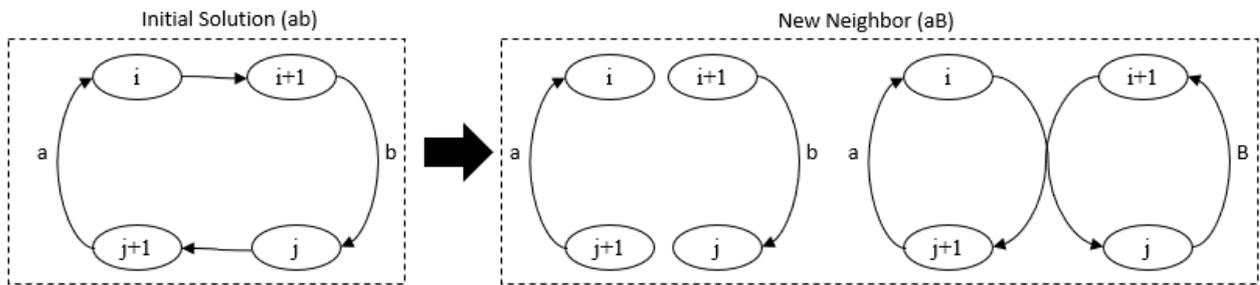


Figura 4.3 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Cross Exchange.

En el proceso de generación de vecinos hay que tomar dos tipos de decisiones; definir el parámetro **K-edges**, y establecer el criterio de reconexión de los nodos que pertenecen a los arcos destruidos. El parámetro K-edges es el número de arcos a descomponer de la ruta para crear la nueva solución. Su valor depende del número de nodos que componen la ruta **N**, manteniendo una relación exponencial con el número de vecinos a generar. Normalmente, se utiliza el criterio **2-edges**, que proporciona buenas soluciones con tiempos computacionales reducidos. Respecto al tipo de construcción de nuevas trayectorias, 3 criterios diferentes nos podemos encontrar:

1. **Cross Exchange:** se reconectan dos clientes de dos rutas diferentes. Tal y como se muestra en la Figura 4.3, se eliminan los arcos $(i, i+1)$ y $(j, j+1)$, para inserta los arcos (i, j) y $(i+1, j+1)$.
2. **Relocate Operator:** se mueve un cliente de una ruta a otra. Tal y como se muestra en la Figura 4.4, se eliminan los arcos $(i, i+1)$, $(i+1, i+2)$ y $(j, j+1)$, para inserta los arcos $(j, i+1)$, $(i+1, j+1)$ y $(i, i+1)$.
3. **Exchange Operator:** se intercambian dos nodos de dos rutas diferentes. Tal y como se muestra en la Figura 4.5, se eliminan los arcos $(i, i+1)$, $(i+1, i+2)$ y $(j, j+1)$, $(j+1, j+2)$ para insertar los arcos $(i, j+1)$, $(j+1, i+2)$ y $(j, i+1)$, $(i+1, j+2)$.

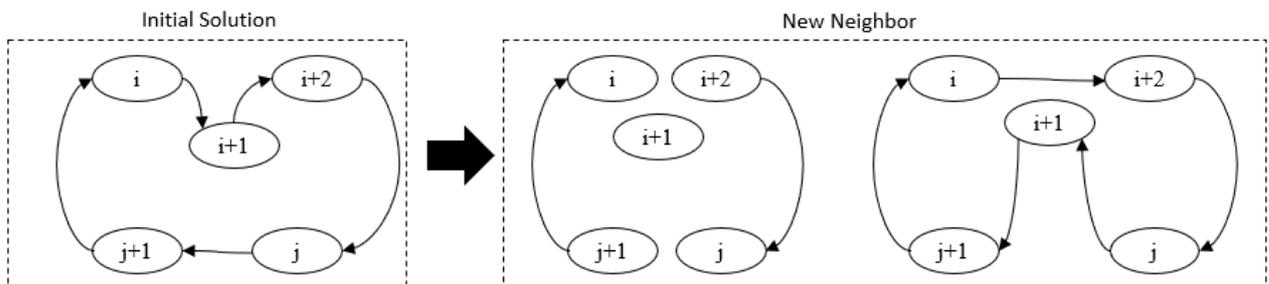


Figura 4.4 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Relocate Operator.

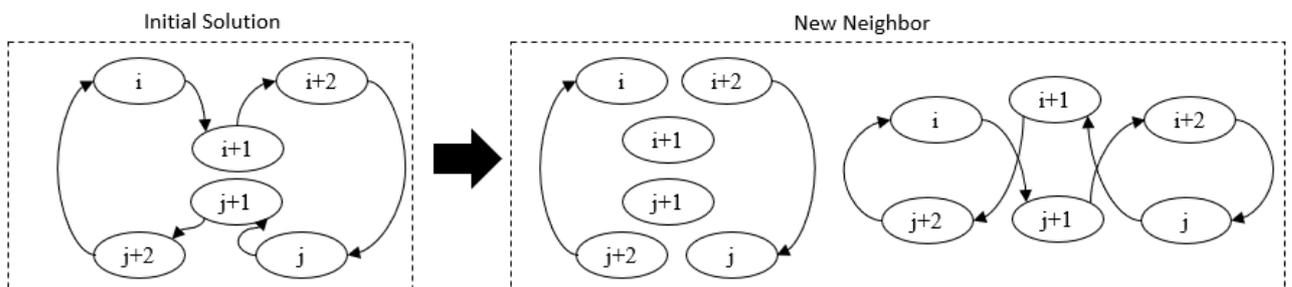


Figura 4.5 Construcción básica de vecinos en problemas VRP, criterio Exchange Operator.

En este proyecto, durante el proceso iterativo **n** de cálculo de la vecindad, se generan todas las combinaciones posibles **M**, entre los diferentes clientes de todas las rutas, aplicando el criterio **Cross Exchange 2-edges** (Figura 4.6), seleccionando el mejor vecino generado a partir de un intercambiado (**edge**) que no se encuentra en la lista tabú y cumple con las restricciones del UAV.

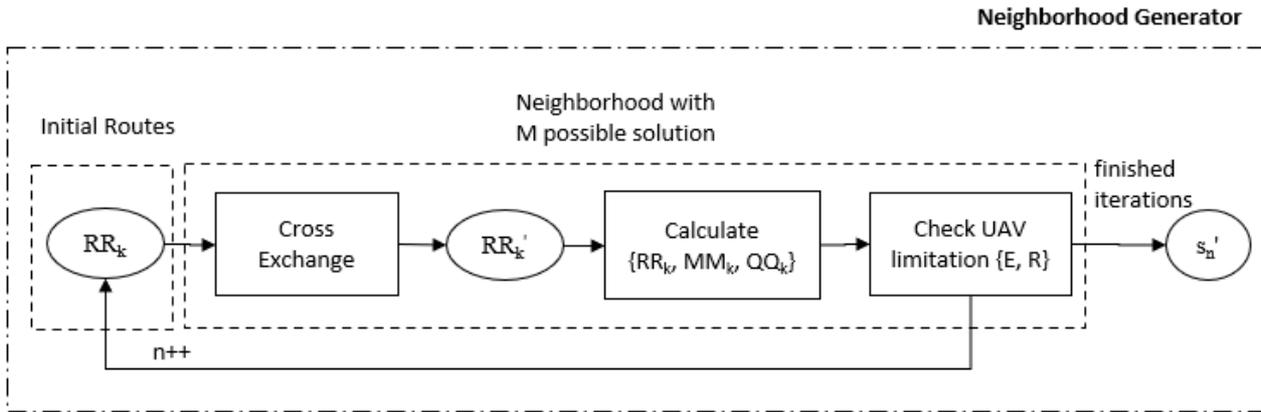


Figura 4.6 Cálculo de la vecindad aplicando el criterio Cross Exchange 2-edge.

4.3.3 Ruta eficiente

Como se ha explicado en el **Apartado 4.3.2**, la vecindad se genera por intercambio de pares de clientes entre rutas. Las soluciones que emergen de este método no tienen por qué ser óptimas al tratarse de un intercambio errático. Con objeto de resolver la ineficiencia que causa el cruce de tramos en la ruta (**Figura 4.7**), se incluyen dos funciones; simulación de las diferentes configuraciones de una ruta (**Figura 4.8**) y comprobación de la ruta con los históricos (**Figura 4.9**), seleccionado en ambos casos la ruta óptima (k').

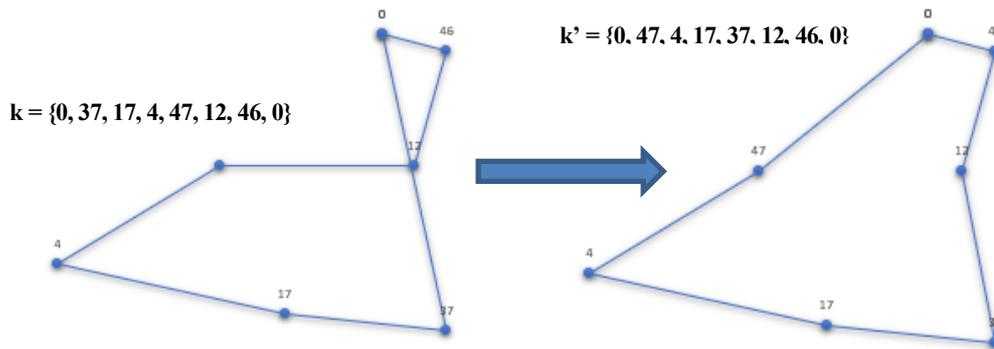


Figura 4.7 Ejemplo de ruta ineficiente k, geenrada por el modelo Tabu Search.

En el primero de los casos, se calcula un número de combinaciones posibles en función al tamaño de la ruta (RR_k), se crean las diferentes configuraciones (s'_n) y se calcula la distancia a recorrer (MM_k) en cada caso, seleccionando la menor de todas (s'). Realizado el proceso para todas las rutas k que realiza el UAV, se calcula la nueva distancia total recorrida (LL').

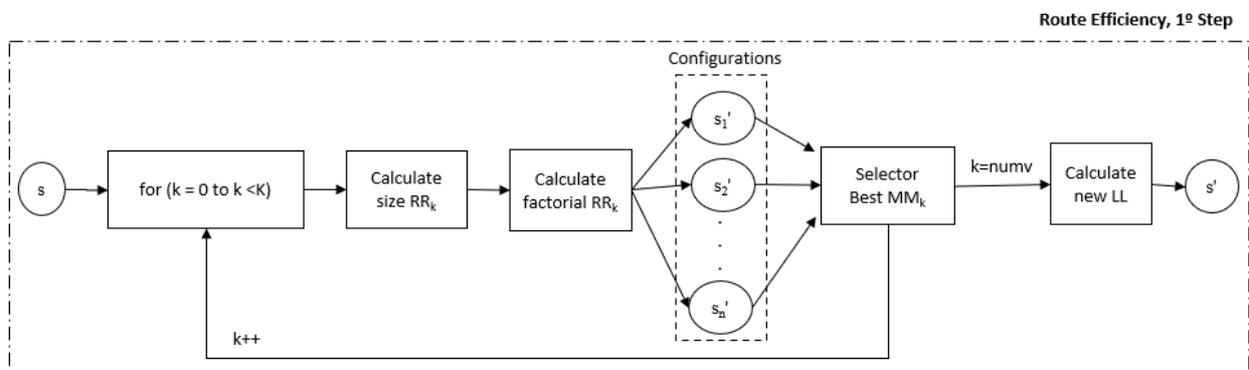


Figura 4.8 Cálculo de diferentes configuraciones de una ruta y selección de la óptima.

Por otro lado, cada configuración de ruta generada durante el proceso iterativo se almacena en un vector (CRR_k y CMM_k) que sirve de referencia para comprobar si la ruta chequeada es la óptima (histórico de rutas). Para ello, se ordenan los clientes de la ruta de menor a mayor, en ambos casos, y si éstos coinciden, se selecciona la

ruta con menor distancia recorrida (MM'_k). Por último, se calcula la distancia total recorrida (LL').

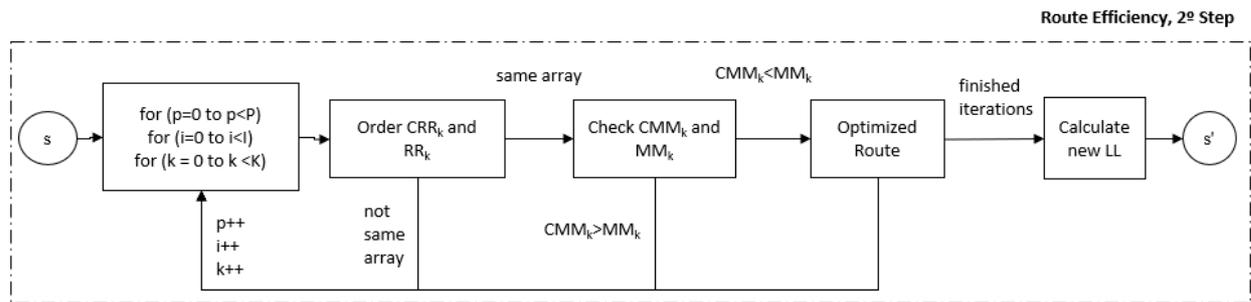


Figura 4.9 Comprobación de la configuración de una ruta con los históricos.

4.3.4 Lista Tabu

El concepto de lista Tabú aporta gran valor al proceso iterativo en la búsqueda de óptimos globales, al prohibir el uso de soluciones ya utilizadas y así, evitar bucles internos en la búsqueda de nuevas regiones factibles. Cuando un par de intercambio (**edge**) entre dos rutas cumple con la mejora de la solución, se anota el par (**edge_{removed}**) de ambas rutas en una lista (**T**), que siempre se chequea como condición de selección de una nueva solución, tal y como se muestra en el diagrama de la **Figura 4.10**.

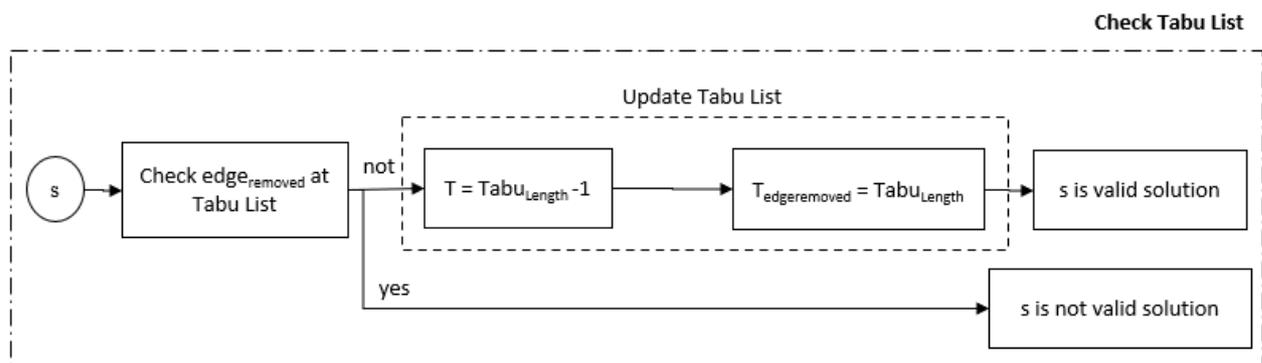


Figura 4.10 Comprobación de la solución en la lista Tabu.

El bloqueo de cada par de intercambio en la lista Tabú no es permanente, ya que se entiende que después de ciertas iteraciones, la región factible de soluciones ha evolucionado. Hay diferentes criterios para establecer el número de repeticiones de la lista Tabú (**Tabu_{Length}**). En este proyecto, se opta por dimensionar este parámetro en función del tamaño del problema o número de targets **N** (4-8).

$$Tabu_{Length} = f(N) \tag{4-8}$$

En la **Tabla 4-1**, se presenta un ejemplo del proceso iterativo para un problema de 15 nodos, capacidad de batería (*E*) de 200 metros y de disco (*R*) 100 segundos y parámetro de la lista tabú (*Tabu_{Length}*) igual a 5. Se observa como los pares de nodos eliminados (*Edge_{removed}*), se añaden a la lista tabú para que no se puedan utilizar en las próximas iteraciones, y como se va reduciendo este valor en los siguientes pasos.

Tabla 4-1 Ejemplo de aplicación de la lista Tabú a un problema de 15 nodos y *Tabu_{Length}* = 5.

Initial Solution (s)		
LL = 708,25 m		
RR ₁ = {0,12,5,11,0}	MM ₁ = 144,00 m	QQ ₁ = 69 seg
RR ₂ = {0,6,14,4,13,0}	MM ₂ = 185,77 m	QQ ₂ = 68 seg
RR ₃ = {0,1,8,7,0}	MM ₃ = 139,51 m	QQ ₃ = 49 seg
RR ₄ = {0,2,3,9,0}	MM ₄ = 175,91 m	QQ ₄ = 57 seg
RR ₅ = {0,15,10,0}	MM ₅ = 63,05 m	QQ ₅ = 15 seg

Iteration 1 (s₁)

LL = 703,51 m

edge_{removed} = {(5,11), (3,9)}

edge_{added} = {(5,9), (3,11)}

RR₁ = {0,12,5,9,0}	MM₁ = 144,23 m	QQ₁ = 61 seg
RR ₂ = {0,6,14,4,13,0}	MM ₂ = 185,77 m	QQ ₂ = 68 seg
RR ₃ = {0,1,8,7,0}	MM ₃ = 139,51 m	QQ ₃ = 49 seg
RR₄ = {0,2,3,11,0}	MM₄ = 170,94 m	QQ₄ = 65 seg
RR ₅ = {0,15,10,0}	MM ₅ = 63,05 m	QQ ₅ = 15 seg

Iteration 2 (s₂)

LL = 700,71 m

edge_{removed} = {(9,0), (3,11)}

edge_{added} = {(9,11), (3,0)}

RR₁ = {0,12,5,9,11,0}	MM₁ = 174,49 m	QQ₁ = 80 seg
RR ₂ = {0,6,14,4,13,0}	MM ₂ = 185,77 m	QQ ₂ = 68 seg
RR ₃ = {0,1,8,7,0}	MM ₃ = 139,51 m	QQ ₃ = 49 seg
RR₄ = {0,2,3,0}	MM₄ = 137,87 m	QQ₄ = 46 seg
RR ₅ = {0,15,10,0}	MM ₅ = 63,05 m	QQ ₅ = 15 seg

Initial Solution (Tabu List)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0																
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																

Iteration 1 (Tabu List)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0																
1																
2																
3																
4																
5										5		5				
6																
7																
8																
9			5													
10																
11						5										
12																

13															
14															
15															

		Iteration 2 (Tabu List)															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0											5						
1																	
2																	
3													5				
4																	
5											4		4				
6																	
7																	
8																	
9	5			4													
10																	
11			5			4											
12																	
13																	
14																	
15																	

4.3.5 Criterios parada

Al tratarse de un algoritmo iterativo (**Figura 4.11**), es necesario establecer unos criterios de parada que den fin al proceso de búsqueda de la solución aproximada. En este proyecto, se utilizan tres criterios:

1. **Iteraciones en el ciclo Tabu Search:** se trata de un contador cuyo valor se incrementa unitariamente en cada ciclo completo del Tabu Search, de forma que cuando se alcanza la cota superior de iteraciones I , se para el algoritmo proporcionando la mejor solución encontrada hasta el momento (S_{best}). En este proyecto, se opta por dimensionar este parámetro en función del tamaño del problema N (4-9).
2. **Iteraciones de ciclos no mejora:** se trata de un contador cuyo valor se incrementa unitariamente en cada ciclo completo del Tabu Search si no se mejora la mejor solución encontrada hasta ese momento, de forma que cuando se alcanza la cota superior de iteraciones IE , se para el algoritmo proporcionando la mejor solución encontrada hasta el momento (S_{best}). Este Contador se reinicia cuando la solución se mejora. En este proyecto, se opta por dimensionar este parámetro en función del tamaño del problema N (4-10).
3. **Tiempo máximo de simulación:** se trata de un contador de tiempo, que finaliza la simulación cuando alcanza el límite permitido T , proporcionando la mejor solución encontrada hasta el momento (S_{best}). En este proyecto, se opta por dimensionar este parámetro en **390 segundos**.

$$I = f(N) \quad (4-9)$$

$$IE = f(N) \quad (4-10)$$

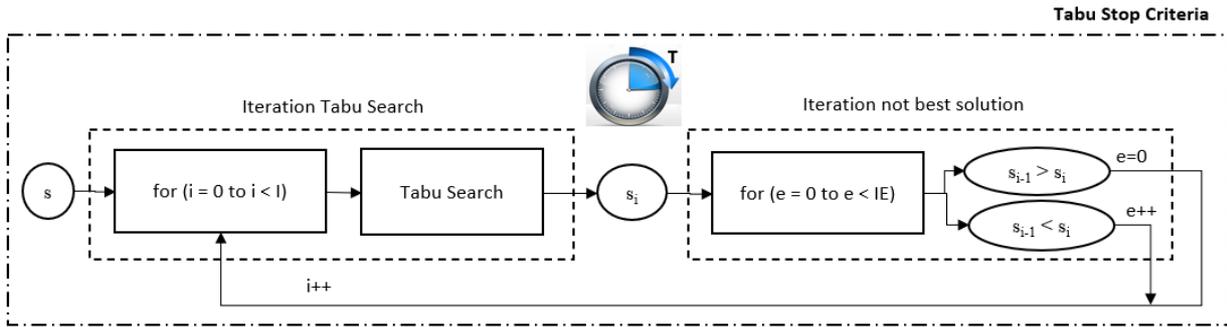


Figura 4.11 Criterios de parada del método Tabu.

4.4 Método de Resolución según un Gradual Tabu Search (GTS)

Suzuki et Cortes [21] plantean en su artículo una estrategia diferente (Figura 4.12) a incorporar en el método Tabu que consiste en crear una serie de problemas más sencillos de resolver, de forma que la solución obtenida S_1 , del primer problema P_1 , se introduce en el siguiente problema P_2 , de mayor tamaño, para ayudar a encontrar un resultado óptimo. Este proceso se realiza de forma consecutiva hasta resolver el problema focal P_m , utilizando la solución encontrada en S_{m-1} . Este concepto de transmisión de soluciones de una región factible a otra es lo que se conoce como proceso de evolución gradual y nos proporciona una estrategia diferente para converger en soluciones de calidad y de forma más rápida.

La estrategia de diversificación en el método Tabu se dice que es asimétrica, ya que en la exploración de nuevas soluciones se aplican criterios arbitrarios, mientras que, en este planteamiento, la evolución se realiza en base a criterios que muestran evidencias de que ese camino proporcionará una solución óptima y, por lo tanto, se aleja de la estrategia de prueba y error (estrategias simétricas).

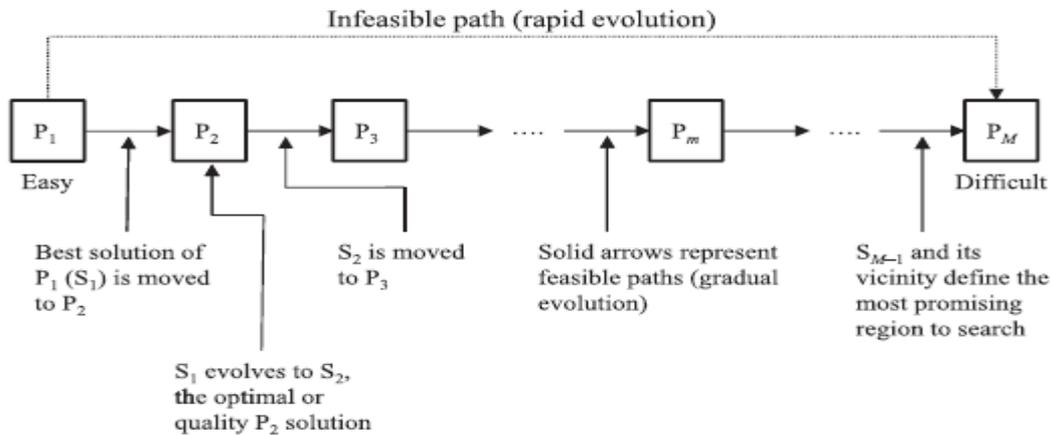


Figura 4.12 Proceso de evolución gradual [21].

En este proyecto, el modelo se apoya en este concepto de forma que en el momento que se resuelve un subproblema aplicando el Tabu Search P , se aplica el criterio de selección (Figura 4.13), para explorar una nueva región de soluciones (**New Path Generator**), que proporcione otra semilla alejada de la actual solución que permita la evolución del algoritmo⁵.

⁵ Para la definición del número de rutas posibles del UAV, se utiliza el mismo algoritmo empleado para determinar la solución inicial.

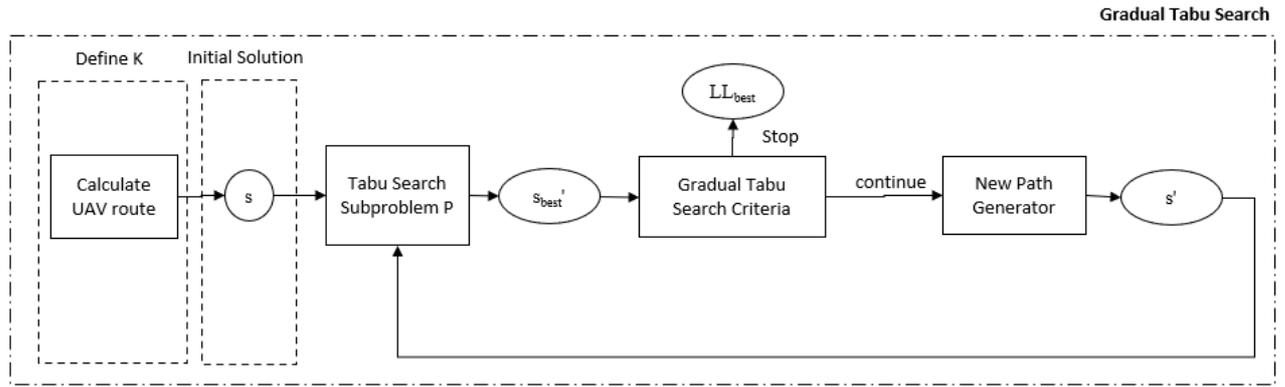


Figura 4.13 Modelo evolutivo aplicado al Tabu Search.

4.4.1 Generador de nueva semilla

El objetivo del algoritmo es alterar la mejor solución encontrada en el subproblema P_{m-i} , y generar una nueva semilla s' , que aplique como solución inicial en el algoritmo Tabu Search. Esta semilla se determina en función a los siguientes parámetros:

- **Saturación de la ruta en capacidad de almacenamiento;** se define como el porcentaje del tiempo de grabación empleado por el UAV en la ruta k , respecto a su capacidad de memoria en disco R .
- **Saturación de la ruta en capacidad de batería;** se define como el porcentaje de los metros recorridos por el UAV en la ruta k , respecto a su capacidad de batería E .

Para cada ruta, se calcula el nivel de saturación del UAV $Weight_k$, (4-11) y se escoge aquella con mínimo índice **RouteSeed** (4-12), manteniéndola fija en la generación de la solución inicial del siguiente subproblema s' . Cada porcentaje de saturación de almacenamiento y batería se pondera según dos parámetros, **inputs** del modelo (**WeightQQ** y **WeightMM**), pudiéndose modificar sus valores para estudiar diferentes variantes de un mismo escenario.

$$Weight_k = WeightQQ \times \frac{QQ_k}{R} + WeightMM \times \frac{MM_k}{E} \quad \forall k \in K \quad (4-11)$$

$$RouteSeed = Min(Weight_k) \quad (4-12)$$

El seleccionar la peor ruta de la solución encontrada al aplicar el Tabu Search, proporciona al modelo la exploración de nuevas regiones factibles que, en otras condiciones, nunca hubiera sido objeto de análisis (Figura 4.14). Por otro lado, al utilizar la misma heurística para calcular la solución inicial s , el proceso iterativo puede entrar en bucle si la semilla seleccionada se ha planteado en anteriores subproblemas. Para evitar esto, se almacenan todas las semillas generadas (**CWeight**) y se incluye una comprobación del **MinWeight_k**.

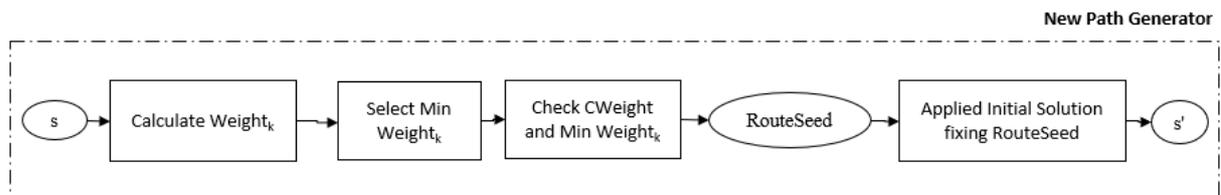


Figura 4.14 New Path Generator del modelo evolutivo Tabu Search.

4.4.2 Criterios parada

De igual forma que se ha explicado en el **Apartado 4.3.5**, al tratarse de un algoritmo iterativo (**Figura 4.15**), es necesario establecer unos criterios de parada que den fin al proceso de búsqueda de la solución aproximada. En este caso, se utiliza un único criterio:

1. **Iteraciones en el ciclo Gradual Tabu Search:** se trata de un contador cuyo valor se incrementa unitariamente en cada ciclo completo del Gradual Tabu Search, de forma que cuando se alcanza la cota superior de iteraciones P , se para el algoritmo proporcionando la mejor solución encontrada hasta el momento (S_{best}). En este proyecto, se opta por dimensionar este parámetro en función del tamaño del problema N (4-13).

$$P = f(N) \quad (4-13)$$

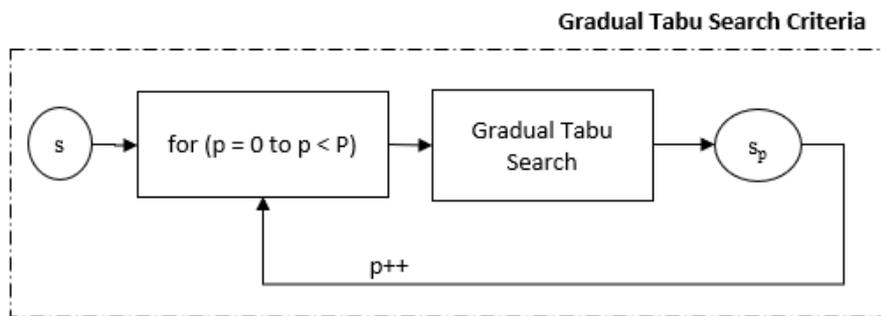


Figura 4.15 Criterios de parada del modelo evolutivo Tabu Search.

4.5 Implementación del GTS para MTCDVRP

En este proyecto, se opta por usar C++ como código fuente. El proyecto generado en *Visual Studio Community 2017*, como entorno de desarrollo IDE (*Integrated Development Environment*) usado bajo plataforma Windows que facilita al programador el desarrollo de un software o programa.

La aplicación desarrollada para testar y validar el rendimiento del método GTS para abordar nuestro problema en estudio se ha creado como un proyecto **cpp** que se estructura de la siguiente forma:

- **Archivos de encabezado** donde contener las declaraciones para hacer mención con la directiva **#include** en todos los archivos .cpp u otros archivos de encabezado que requieran de dicha declaración. La directiva **#include** inserta una copia del archivo de encabezado directamente en el archivo donde se haga la llamada antes de la compilación. El proyecto consta de los siguientes archivos:
 - **Head.h:** contiene la declaración de las bibliotecas y los parámetros del problema estudiado MTCDVRP. Además, se definen los parámetros del algoritmo cuyos valores son manipulables por el usuario.
 - **AuxFunction.h:** contiene el desarrollo de las funciones auxiliares que se emplearán en el resto de los ficheros.
 - Lectura de datos de entrada (*ReadInt*),
 - Cálculo de la posición del valor mínimo de un array 2D (*PosMin_Array2D*),
 - Definición de los datos de entrada del problema (*DVRP_Inputs*),
 - Cálculo del factorial de un array (*factorial*),
 - Organización de los datos de un array 1D de menor a mayor (*OrdenArray1D*),
 - Organización de los datos de un array 2D de menor a mayor (*OrdenArray2D*),

- **Tabu_MTC DVRP.h**: contiene las variables propias de la metaheurística empleada (método Tabu Search) así como el desarrollo de todas las funciones necesarias para el desarrollo del algoritmo. En este archivo se cargan las cabeceras (**Head.h** y **AuxFunction.h**).
 - Definición del número de misiones máximas a realizar por el UAV (*Define_numvo*),
 - Evaluación de la mejor solución (*NoMejora_Otherwise_Best_Solution*),
 - Cálculo de la solución inicial de un subproblema (*Initial_Solution*),
 - Cálculo de diferentes configuraciones de una misma ruta para seleccionar la ruta óptima (*BestWay*),
 - Comprobación de la ruta con el histórico de rutas generadas que devuelve la configuración de ruta eficiente, si la encuentra (*BestRouteNeigh*),
 - Cálculo de nuevos vecinos (*Calculate_new_route*),
 - Comprobación de la lista Tabú en la vecindad (*Check_Matrix_tabu*),
 - Cálculo de la vecindad y selección del mejor vecino (*delyNeighborhood*).
- **Archivos de recursos** donde contener todos los parámetros de entrada con un formato y estructura personalizado, independiente de Visual Studio.
 - **Inputs.txt**: contiene los datos propios de un escenario como son; número de cliente (N), demanda de cada cliente (D_i), y coordenadas de cada cliente ($x_i y_i$), así como los datos de capacidad máxima de vuelo (E) y almacenamiento (R) del UAV.
- **Archivos de origen** donde contener el código fuente principal de la aplicación a desarrollar.
 - **Main.cpp**: contiene la estructura final del algoritmo Gradual Tabu Search, donde se realiza de forma estructurada las llamadas a cada una de las funciones declaradas en el archivo core del proyecto (**Tabu_MTC DVRP.h**), así como se declaran las variables locales del problema.

En la **Figura 4.16** se especifica la relación entre los diferentes archivos que conforman la aplicación. Por otro lado, en la **Figura 4.17** se representa la relación entre las diferentes funciones que conforman el modelo de optimización.

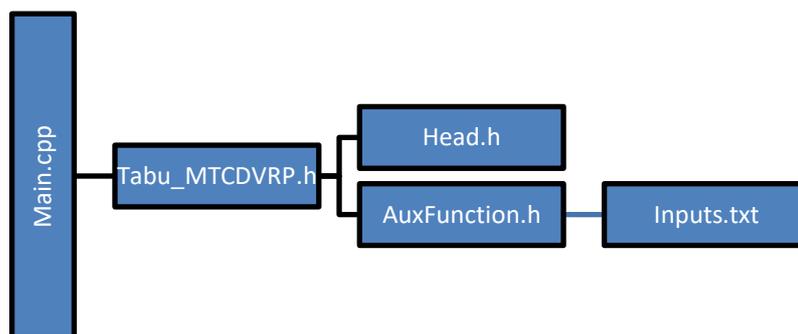


Figura 4.16 Estructura de archivos en Visual Studio para resolver el problema MTC DVRP.

La aplicación que se desarrolla aborda la resolución heurística del problema y genera en la consola un fichero de traza que recoge la evolución paso por paso del algoritmo GTS. Esta traza muestra las mejores soluciones encontradas (identificando parámetros como subproblema e iteración, tiempos de computación, ciclos de no mejora) y explicita la semilla a introducir en el siguiente subproblema.

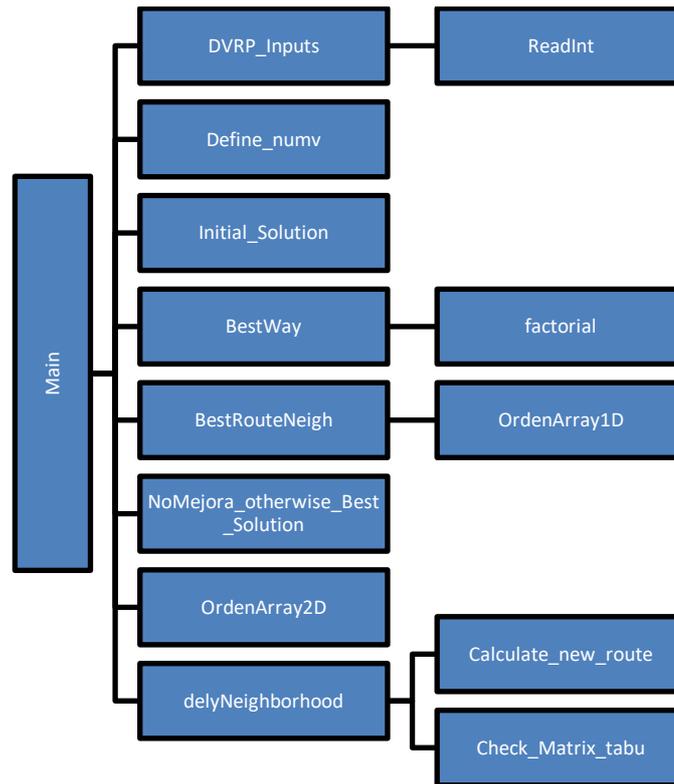


Figura 4.17 Estructura del modelo de optimización en Visual Studio para resolver el problema MTC DVRP.

A continuación, se detallan los pasos explicados en los apartados anteriores de este capítulo aplicados a un escenario de 51 nodos (50 clientes + 1 depot).

```

#Número de clientes + 1 (nodo base salida y llegada):
51
#Demanda, tiempo de grabación en cada nodo (s):
0
7
30
16
9
21
15
19
23
11
5
19
29
23
21
10
15
3
41
9
28
8
8
16
10
28
7
15
14
6
19
11
12
23
26
17
6
9
15
14
7
27
13
11
  
```

```

16
10
5
25
17
18
10
#Posición x,y de cada nodo (m):
30 40
37 52
49 49
52 64
20 26
40 30
21 47
17 63
31 62
52 33
51 21
42 41
31 32
5 25
12 42
36 16
52 41
27 23
17 33
13 13
57 58
62 42
42 57
16 57
8 52
7 38
27 68
30 48
43 67
58 48
58 27
37 69
38 46
46 10
61 33
62 63
63 69
32 22
45 35
59 15
5 6
10 17
21 10
5 64
30 15
39 10
32 39
25 32
25 55
48 28
56 37
#Endurance, batería del dron (m):
200
#Capacidad de disco, tiempo de grabado en el disco para cada UAS (s):
160

```

Figura 4.18 Fichero input datos de partida, ejemplo para un escenario de 51 nodos

El programa comienza con la carga de librerías, los datos de partida (**Figura 4.18**), el cálculo de la distancia euclídea entre nodos y la iniciación del contador de tiempo computacional. Por otro lado, se establece el límite superior de vuelos a realizar por el dron utilizando la misma heurística utilizada para determinar la solución inicial, el cual se explica en el siguiente párrafo⁶. A partir de aquí, se declaran y se inicializan las variables globales del programa.

En este momento, se inicia el GTS con el bucle de subproblemas. Se calcula una solución inicial a partir de la heurística desarrollada que consiste en abrir y saturar rutas incorporando aquellos nodos que se encuentren a menor distancia del nodo previo. Tal y como se muestra en la **Figura 4.19**, el cliente más cercano al depot es el nodo 46, por lo tanto, éste es el que se incorpora en la primera ruta, posteriormente nos encontramos con el nodo 12 (el más cercano al nodo 46) y así sucesivamente⁷. Por supuesto, antes de agrandar una ruta con la incorporación de un nodo se comprueba que desde éste es factible volver al depot; en caso contrario, se rechaza

⁶ La función tiene una peculiaridad, y es que se incluyen dos rutas extras al valor calculado en la heurística para otorgar cierta libertad de evolución a las soluciones que puedan emerger del proceso del GTS.

⁷ Se identifican en rojo los clientes incluidos en la ruta 0.

y se cierra la ruta para abrir una nueva en caso de que queden clientes por servir. En nuestro ejemplo, tal y como puede leerse en **Figura 4.20**, la generación de solución inicial lleva a 11 rutas para cubrir todos los clientes.

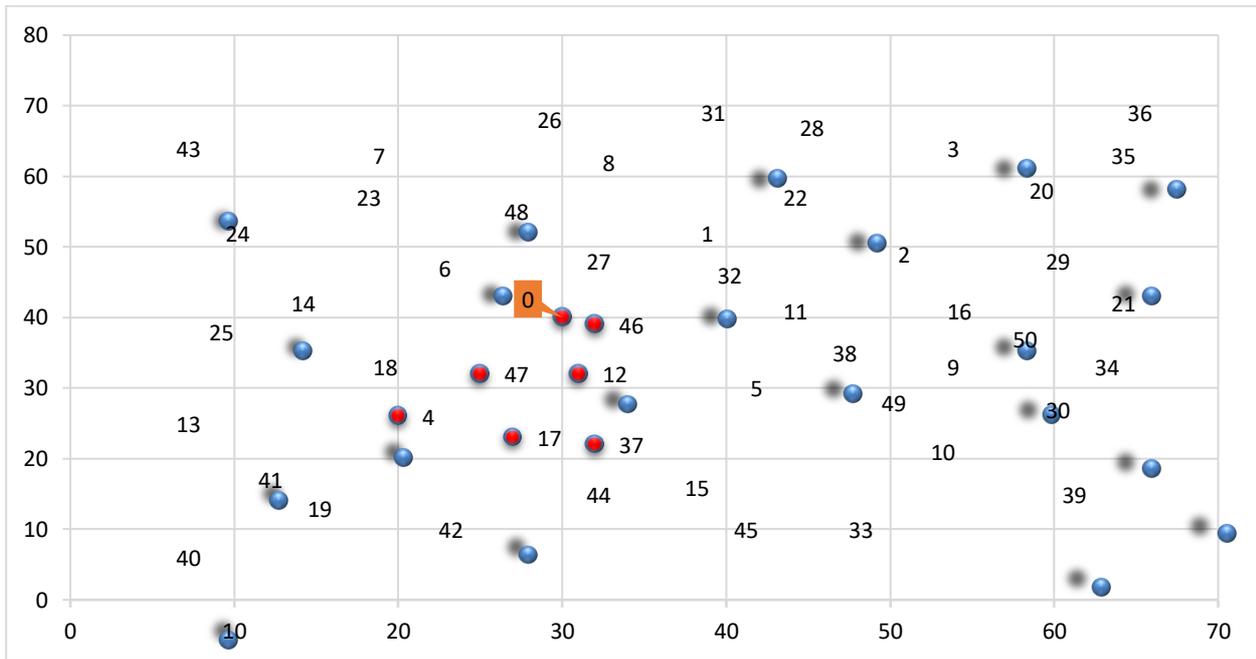


Figura 4.19 Distribución de nodos e identificación de la ruta 1 en el plano bidimensional para un escenario de 51 nodos

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -0-//////////
0-46-12-47-4-17-37-0
0-27-1-32-11-38-5-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-20-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-40-13-0
0-33-39-0
0-36-35-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 80 sg      Distancia recorrida ruta 0: 173.94 m
Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg      Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 40 sg      Distancia recorrida ruta 9: 173.71 m
Tiempo de grabado ruta 10: 37 sg     Distancia recorrida ruta 10: 141.72 m
Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg     Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2094.26 m

```

Figura 4.20 Solución inicial (subproblema 0, iteración TS 0) generada por el método GTS para un escenario de 51 nodos.

Cabe indicar que siempre que se genere una solución candidata a ser la propuesta por el algoritmo, se aplican dos funciones que reducen las ineficiencias del método; una de ellas realiza combinaciones entre los nodos de cada ruta para quedarse con la más eficiente (la de menor distancia recorrida) mientras que la otra función comprueba el histórico de rutas emergentes del algoritmo ordenadas de menor a mayor con la solución ordenada bajo el mismo criterio. Pasado este filtro, se comprueba si la solución candidata es mejor que la mejor solución encontrada hasta el momento y, en caso afirmativo, se imprime ésta para marcarla como la mejor por el momento (**Figura 4.20**); en caso contrario, se inicia el contador de ciclos no mejora.

A continuación, se inicializa el bucle del método Tabu Search aplicando el criterio seleccionado **Cross-Exchange 2-edges** en el cálculo de la vecindad, seleccionando el mejor candidato encontrado que cumple con las condiciones de contorno del problema (capacidad de batería y disco) y del propio método (no está en la lista Tabu). En la **Figura 4.21**, se puede ver que el primer candidato generado por el TS mejora la solución inicial al cruzar los pares (45-40) y (0-33) de las rutas 9 y 10 respectivamente, siendo el par de intercambio el (40-33).

Antes de lanzar el chequeo de un nuevo candidato, miramos si estamos en la condición de parada del algoritmo, lo que se establece cuando el tiempo computacional o el número de ciclos de no mejora ha alcanzado su límite.

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -1-//////////
0-46-12-47-4-17-37-0
0-27-1-32-11-38-5-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-20-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-33-39-0
0-40-13-0
0-36-35-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 80 sg      Distancia recorrida ruta 0: 173.94 m
Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg      Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg      Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
Tiempo de grabado ruta 10: 30 sg     Distancia recorrida ruta 10: 135.36 m
Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg     Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2075.22 m

```

Figura 4.21 Solución (subproblema 0, iteración TS 1) para un escenario de 51 nodos.

En lo que sigue, vamos a explicar la evolución del algoritmo a partir del Subproblema 0 (véase **Figura 4.22**) En la **Figura 4.22** se representa la evolución del programa a lo largo del subproblema 0. Se parte de identificar la ruta 5 como la peor de todas ($Weight_5 = 0,4223$) y contabilizar que faltan 145 iteraciones para que el algoritmo se pare por no encontrar una mejora en la solución durante un continuo de iteraciones. Con objeto de evitar bucles internos en la generación de semillas, se comprueba el valor del factor y su ruta.

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -2-//////////
0-46-12-47-0
0-27-1-32-11-38-5-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-20-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-33-39-0
0-4-13-40-17-37-0
0-36-35-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg      Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg      Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m

```

Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2057.91 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -3-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-36-35-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-20-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-23-7-43-24-0
 0-15-44-42-19-41-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-45-33-39-0
 0-4-13-40-17-37-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 45 sg Distancia recorrida ruta 1: 160.12 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2048.96 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -4-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-20-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-23-7-43-24-0
 0-15-44-42-19-41-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-45-33-39-0
 0-4-13-40-17-37-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2043.05 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -5-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-20-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0

```

0-23-7-43-24-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-44-42-19-41-0
0-4-13-40-17-37-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg      Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 65 sg      Distancia recorrida ruta 9: 176.82 m
Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg     Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg     Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2037.36 m

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -6-//////////

```

0-46-12-47-0
0-27-1-20-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-44-42-19-41-0
0-4-13-40-17-37-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg      Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg      Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg      Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 65 sg      Distancia recorrida ruta 9: 176.82 m
Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg     Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg     Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2033.38 m

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -7-//////////

```

0-46-12-47-0
0-27-1-20-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-42-19-40-44-37-0
0-4-41-13-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg      Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg      Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m

```

Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 188.22 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 59 sg Distancia recorrida ruta 10: 157.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2023.78 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -8-//////////

0-46-12-0
 0-27-1-20-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-48-8-26-31-0
 0-15-45-33-39-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-17-40-19-42-44-37-0
 0-13-41-4-47-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 34 sg Distancia recorrida ruta 0: 68.37 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 185.43 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2013.65 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -9-//////////

0-46-0
 0-27-1-20-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-48-8-26-31-0
 0-15-45-33-39-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-17-19-40-42-44-37-0
 0-13-41-4-47-0
 0-32-11-38-5-12-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 5 sg Distancia recorrida ruta 0: 11.97 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2001.25 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -10-//////////

0-0
 0-27-1-20-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0

```

0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-11-38-5-12-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg     Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg     Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg     Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg    Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1996.85 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -11-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-1-20-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-11-38-5-12-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg     Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg     Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 35 sg     Distancia recorrida ruta 6: 119.72 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg    Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1995.47 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -12-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-11-38-5-12-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-20-1-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg     Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m

```

Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 47 sg Distancia recorrida ruta 11: 137.75 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1991.13 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -13-//////////

0-0

0-27-48-8-26-31-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-2-20-1-0

0-11-38-5-12-0

0-15-45-33-39-46-0

0-10-30-34-21-29-0

0-17-19-40-42-44-37-0

0-13-41-4-47-0

0-32-16-50-9-49-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 65 sg Distancia recorrida ruta 5: 165.34 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 66 sg Distancia recorrida ruta 11: 163.22 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1987.02 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -14-//////////

0-0

0-27-48-8-26-31-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-16-50-9-49-0

0-11-38-5-12-0

0-15-45-33-39-46-0

0-10-30-34-21-29-0

0-17-19-40-42-44-37-0

0-13-41-4-47-0

0-32-2-20-1-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 54 sg Distancia recorrida ruta 5: 142.37 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 77 sg Distancia recorrida ruta 11: 183.72 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1984.56 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -15-//////////

0-0

0-27-48-8-26-31-0

```

0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-5-12-0
0-11-38-16-50-9-49-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-2-20-1-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg     Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 50 sg     Distancia recorrida ruta 5: 106.42 m
Tiempo de grabado ruta 6: 88 sg     Distancia recorrida ruta 6: 199.32 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 77 sg    Distancia recorrida ruta 11: 183.72 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1978.82 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -16-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-1-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-5-12-0
0-11-38-16-50-9-49-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-20-2-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 80 sg     Distancia recorrida ruta 1: 193.98 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 50 sg     Distancia recorrida ruta 5: 106.42 m
Tiempo de grabado ruta 6: 88 sg     Distancia recorrida ruta 6: 199.32 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg    Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1977.20 m

A los 5.5400 segundos ocurre el Fin análisis SUB#0 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.4223 y se selecciona la ruta 5 |CuentaAtrBs va por 145 |

```

Figura 4.22 Solución completa del subproblema 0 para un escenario de 51 nodos.

Esta es la interpretación que, a modo de resumen, se puede hacer de las iteraciones en torno al Subproblema 0 de la **Figura 4.22**. Hasta la iteración 16 el algoritmo siempre encuentra un candidato óptimo, a partir de ahí, no se logra obtener una mejor solución para el subproblema 0, finalizándose el bucle del TS a los 5.54 segundos, momento en el cual se da paso a la definición de la semilla a introducir en el siguiente subproblema del GTS. Tal y como se explica en el **Apartado 4.4**, el método trata de forzar la búsqueda de soluciones en espacios improbables de ser estudiados, para ello, se calcula un factor para cada ruta ($Weight_k$) que pondera los recursos limitantes del dron y se selecciona aquel con valor mínimo (peor ruta de la solución).

Seleccionada la ruta 5 como la semilla, pasaríamos a la ejecución del bucle de pasos a aplicar a los subproblemas con la peculiaridad de que la solución inicial escogida para el subproblema 1 comienza con la saturación de la semilla que se inyecta desde la iteración anterior (Subproblema 0). En la **Figura 4.23** se observa como a los

7.511 segundos finaliza el subproblema 1 sin mejorar la solución y seleccionando nuevamente la ruta 5 como semilla⁸. Es en el subproblema 2 cuando se vuelve a encontrar una solución **de mejora** (iteración 13).

```

A los 7.5110 segundos ocurre el Fin análisis SUB#1 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.3573 y se selecciona la ruta 5 |CuentaAtrás va por 121 |

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -2-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -13-//////////
0-11-38-9-50-16-0
0-46-12-15-45-33-0
0-27-48-23-6-0
0-5-49-30-39-10-0
0-18-25-14-0
0-2-29-21-34-0
0-32-1-22-28-31-0
0-8-26-7-43-24-0
0-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-20-35-36-3-0
0-13-41-4-47-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 70 sg      Distancia recorrida ruta 0: 164.37 m
Tiempo de grabado ruta 1: 77 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.28 m
Tiempo de grabado ruta 2: 63 sg      Distancia recorrida ruta 2: 142.90 m
Tiempo de grabado ruta 3: 77 sg      Distancia recorrida ruta 3: 198.30 m
Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg      Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 5: 70 sg      Distancia recorrida ruta 5: 183.13 m
Tiempo de grabado ruta 6: 52 sg      Distancia recorrida ruta 6: 147.36 m
Tiempo de grabado ruta 7: 70 sg      Distancia recorrida ruta 7: 194.89 m
Tiempo de grabado ruta 8: 0 sg       Distancia recorrida ruta 8: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg      Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 67 sg     Distancia recorrida ruta 10: 190.74 m
Tiempo de grabado ruta 11: 84 sg     Distancia recorrida ruta 11: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1974.49 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -2-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -14-//////////
0-12-15-45-33-0
0-46-11-38-9-50-16-0
0-27-48-23-6-0
0-5-49-30-39-10-0
0-18-25-14-0
0-2-29-21-34-0
0-32-1-22-28-31-0
0-8-26-7-43-24-0
0-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-20-35-36-3-0
0-13-41-4-47-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 72 sg      Distancia recorrida ruta 0: 180.53 m
Tiempo de grabado ruta 1: 75 sg      Distancia recorrida ruta 1: 172.26 m
Tiempo de grabado ruta 2: 63 sg      Distancia recorrida ruta 2: 142.90 m
Tiempo de grabado ruta 3: 77 sg      Distancia recorrida ruta 3: 198.30 m
Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg      Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 5: 70 sg      Distancia recorrida ruta 5: 183.13 m
Tiempo de grabado ruta 6: 52 sg      Distancia recorrida ruta 6: 147.36 m
Tiempo de grabado ruta 7: 70 sg      Distancia recorrida ruta 7: 194.89 m
Tiempo de grabado ruta 8: 0 sg       Distancia recorrida ruta 8: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg      Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 67 sg     Distancia recorrida ruta 10: 190.74 m
Tiempo de grabado ruta 11: 84 sg     Distancia recorrida ruta 11: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1973.63 m

A los 9.3040 segundos ocurre el Fin análisis SUB#2 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.5309 y se selecciona la ruta 6 |CuentaAtrás va por 143 |

```

Figura 4.23 Solución completa del subproblema 0 para un escenario de 51 nodos.

⁸ Aunque la semilla sea otra vez la ruta 5, la secuencia de la ruta no es la misma (el método desecha semillas que se han dado con anterioridad).

Por último, en la **Figura 4.23** nos concentramos en mostrar cómo el programa finaliza porque se alcanza el límite superior de alguno de los parámetros definidos para la parada del algoritmo, en este caso se supera los 151 ciclos de no mejora de la solución (**Figura 4.23**).

```
A los 14.6290 segundos ocurre el Fin análisis SUB#5 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.2397 y se selecciona la ruta 8 |CuentaAtrfbs va por 148 |
A los 16.3450 segundos ocurre el Fin análisis SUB#6 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.5665 y se selecciona la ruta 0 |CuentaAtrfbs va por 124 |
A los 17.9320 segundos ocurre el Fin análisis SUB#7 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6272 y se selecciona la ruta 10 |CuentaAtrfbs va por 100 |
A los 19.6540 segundos ocurre el Fin análisis SUB#8 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6642 y se selecciona la ruta 11 |CuentaAtrfbs va por 76 |
A los 21.4610 segundos ocurre el Fin análisis SUB#9 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6531 y se selecciona la ruta 7 |CuentaAtrfbs va por 52 |
A los 23.0700 segundos ocurre el Fin análisis SUB#10 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6641 y se selecciona la ruta 9 |CuentaAtrfbs va por 28 |
A los 24.6790 segundos ocurre el Fin análisis SUB#11 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6674 y se selecciona la ruta 10 |CuentaAtrfbs va por 4 |
A los 26.5330 segundos ocurre el Fin análisis SUB#12 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6835 y se selecciona la ruta 3 |CuentaAtrfbs va por -20 |
Presione una tecla para continuar . . .
```

Figura 4.24 Finalización del programa al alcanzar el límite de ciclos no mejora para un escenario de 51 nodos.

Finalmente, y para una visión más clara de la traza que se le presenta al usuario durante la ejecución del algoritmo GTS, presentamos en **ANEXO** el log completo resultante de abordar con la aplicación C++ el escenario ilustrativo de 51 nodos.

5 EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de aplicar el algoritmo GTS para un conjunto de problemas de diferente naturaleza, cuyos escenarios se obtienen de pre-procesar las instancias extraídas de la web CVRPLIB [23]⁹. Por otro lado, en el último apartado se realizan análisis de sensibilidad de parámetros del algoritmo GTS con objeto de verificar la mejora de la solución encontrada respecto al tiempo computacional.

Para cada escenario simulado, los parámetros del algoritmo se han definido según los siguientes valores:

$$Dem_To_Dist = 0,15$$

$$V^t = 10 \text{ m/s}$$

$$WeightQQ = 0,5$$

$$WeightMM = 0,5$$

$$T = 390 \text{ segundos}$$

Por otro lado, los parámetros del modelo se determinan en función al tamaño del problema N y a un factor que nos ayudará a experimentar 4 diferentes configuraciones de un mismo escenario, con objeto de seleccionar aquel que ofrece mejores soluciones.

$$P = cte \times 2 \times N$$

$$IE = cte \times 6 \times N$$

$$I = cte \times N$$

$$Tabu_{Lenght} = cte/2 \times N$$

$$cte: [1/10, 1/2, 1, 3/2]$$

Todas las simulaciones se llevan a cabo en un PC Primux 1401 (*Intel Atom x5-X8350 CPU 1.44 GHz, 2 GB RAM*).

5.1 Escenario 1: n51-Demand160-Endurance200

Se utiliza como base la instancia *CMT1 de Christofides, Mingozi and Toth (1979)*. En la **Figura 5.1** se representa la distribución de nodos en el plano¹⁰.

$$N = 51 \text{ nodos}$$

$$R = 160 \text{ segundos}$$

$$E = 200 \text{ metros}$$

$$Demanda: [0, 41]$$

⁹ Se aplican restricciones de distancia máxima a recorrer por el UAV en cada ruta, para convertir los problemas CVRP en CDVRP.

¹⁰ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

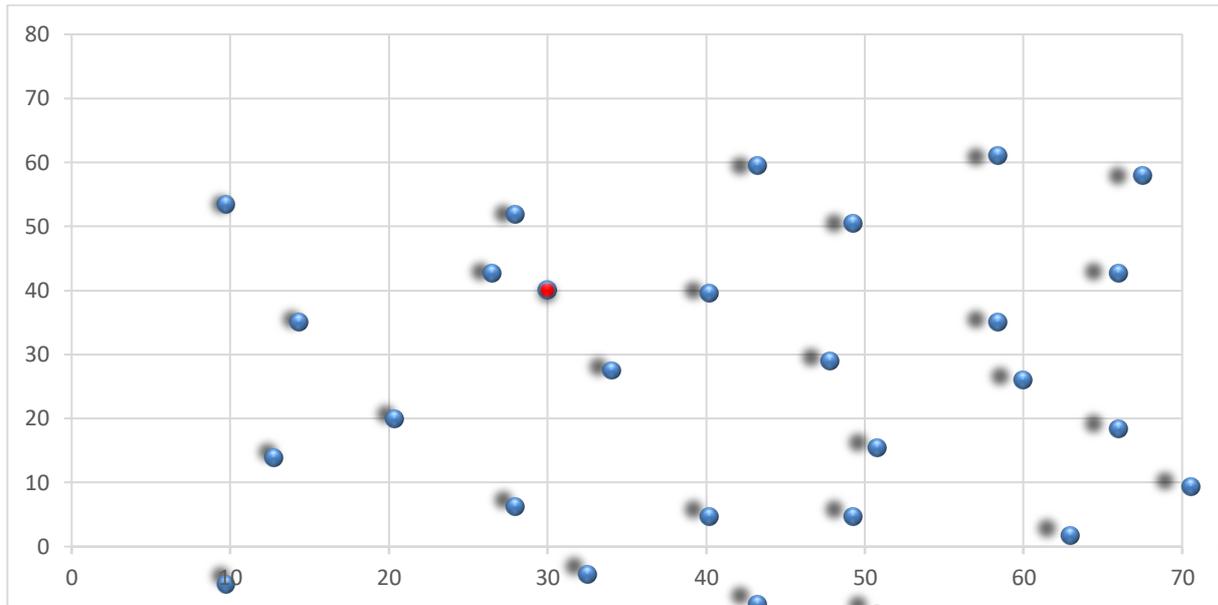


Figura 5.1 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 1 (n51-D160-E200).

La **Tabla 5-1** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n51-D160-E200 (cte=1,5). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.2** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.3**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **11 rutas**.

Tabla 5-1 Mejor resultado obtenido, Escenario 1 (n51-D160-E200).

	Ruta	T_{grabación} seg		D_{recorrida} m	
RR₁	(0, 20, 35, 36, 3, 0)	QQ₁	67	MM₁	190,74
RR₂	(0, 8, 26, 31, 28, 22, 1, 0)	QQ₂	70	MM₂	181,62
RR₃	(0, 5, 10, 39, 30, 49, 0)	QQ₃	77	MM₃	197,58
RR₄	(0, 37, 44, 15, 45, 33, 0)	QQ₄	68	MM₄	181,18
RR₅	(0, 14, 25, 13, 0)	QQ₅	72	MM₅	174,82
RR₆	(0, 17, 42, 19, 40, 41, 4, 0)	QQ₆	68	MM₆	195,50
RR₇	(0, 12, 47, 18, 0)	QQ₇	95	MM₇	179,39
RR₈	(0, 32, 11, 16, 9, 38, 46, 0)	QQ₈	77	MM₈	173,02
RR₉	(0, 24, 43, 7, 23, 48, 0)	QQ₉	73	MM₉	190,08
RR₁₀	(0, 6, 27, 0,)	QQ₁₀	30	MM₁₀	73,46
RR₁₁	(0, 2, 29, 21, 34, 50, 0)	QQ₁₁	80	MM₁₁	198,92

1.936,31 m

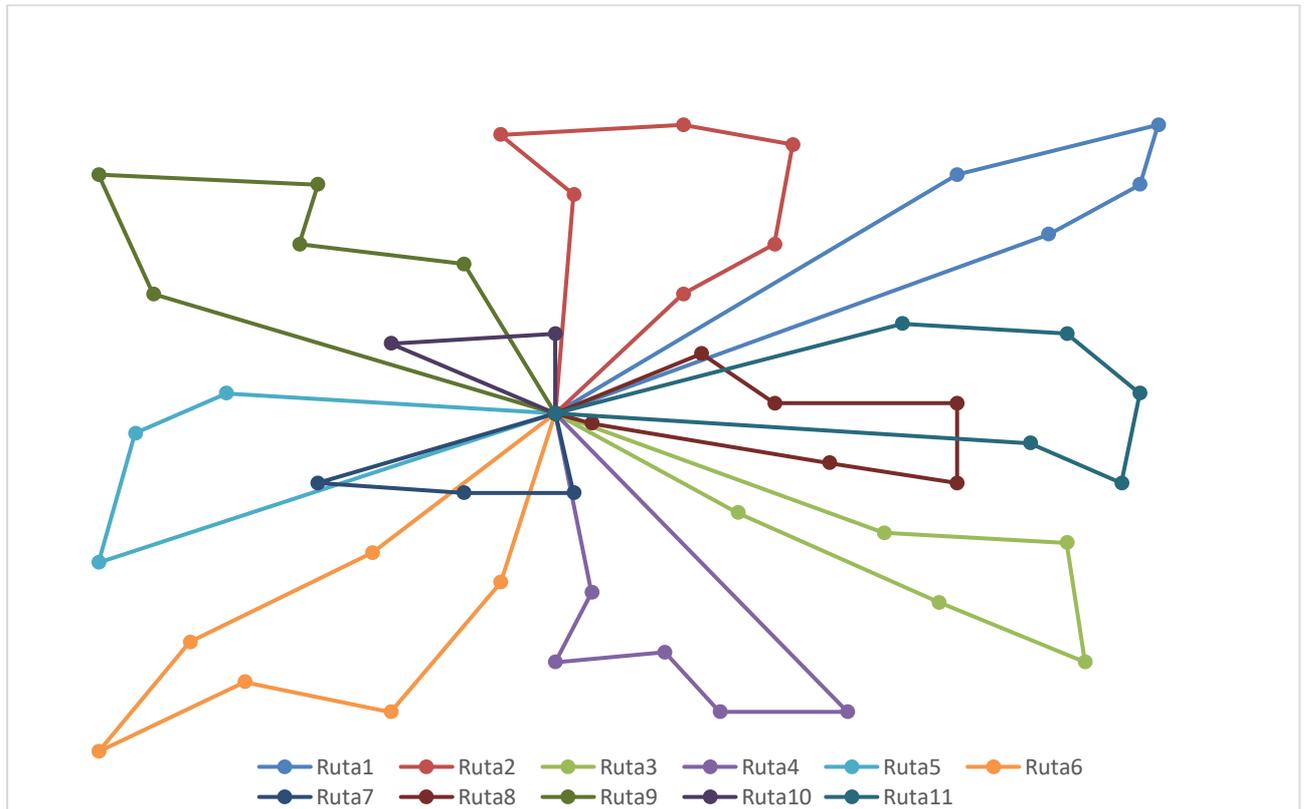


Figura 5.2 Representación de las rutas del UAV, Escenario 1 (n51-D160-E200).

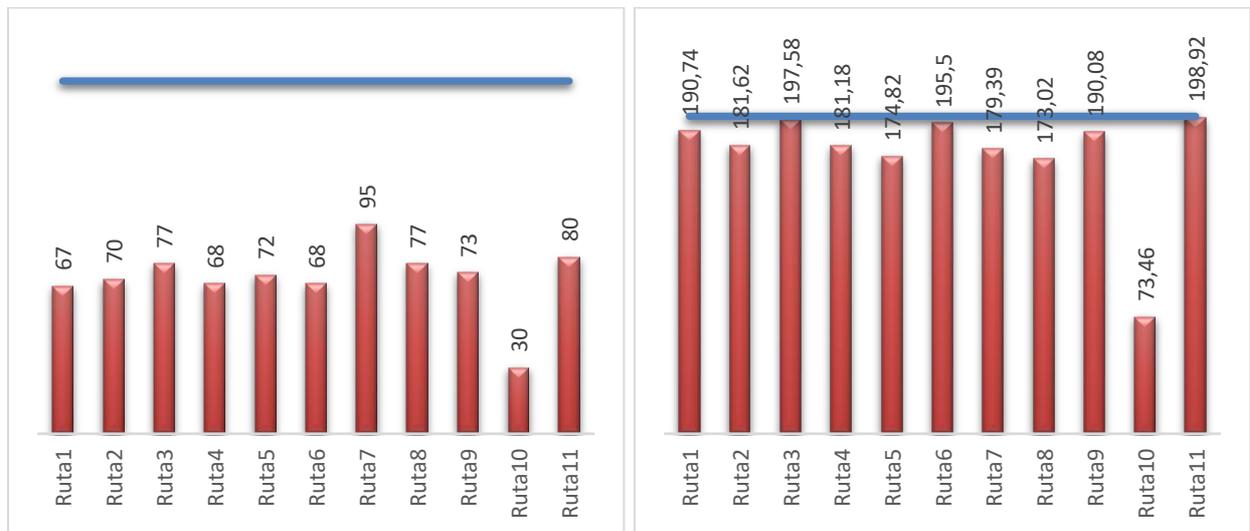


Figura 5.3 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 1 (n51-D160-E200).

Se trata de un problema de tamaño pequeño cuyo recurso limitante es la capacidad de batería (**88,01%** frente al 44,15%). La mejor solución se encuentra a los **81,80 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 7, iteración n = 61**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **7,54%**. El algoritmo se detiene a los **152,61 segundos**, alcanzando el valor de ciclos no mejora (I = 459). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **28 mejoras de la solución inicial**.

5.2 Escenario 2: n65-Demand200-Endurance365

Se utiliza como base la instancia *A-n65-k9 de Augerat (1995)*. En la **Figura 5.4** se representa la distribución de nodos en el plano¹¹.

$N = 65 \text{ nodos}$
 $R = 200 \text{ segundos}$
 $E = 365 \text{ metros}$
 Demanda: $[0, 26]$

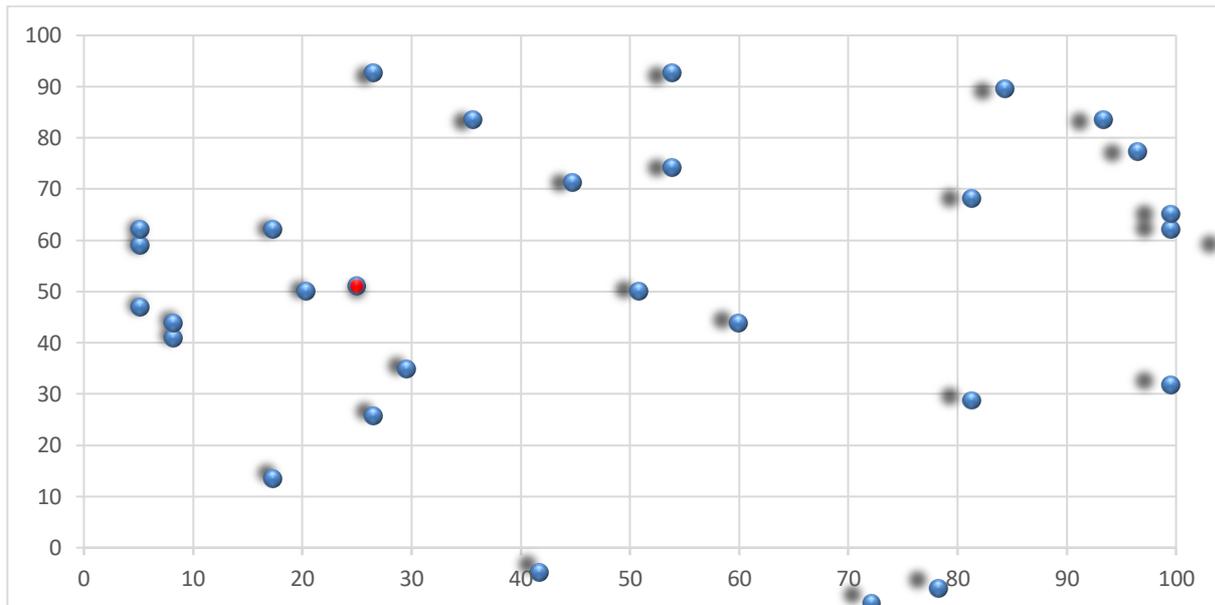


Figura 5.4 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 2 (n65-D200-E365).

La **Tabla 5-2** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n65-D200-E365 ($cte=1,5$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.5** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.6**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **7 rutas**.

Tabla 5-2 Mejor resultado obtenido, Escenario 2 (n65-D200-E365).

Ruta		$T_{\text{grabación}} \text{ seg}$		$D_{\text{recorrida}} \text{ m}$	
RR₁	(0, 49, 27, 14, 9, 22, 15, 43, 0)	QQ₁	110	MM₁	285,85
RR₂	(0, 62, 28, 33, 1, 23, 57, 48, 54, 63, 11, 7, 39, 0)	QQ₂	146	MM₂	356,39
RR₃	(0, 45, 41, 16, 2, 38, 42, 61, 58, 20, 32, 0)	QQ₃	113	MM₃	356,21
RR₄	(0, 17, 47, 34, 31, 26, 6, 64, 46, 51, 0)	QQ₄	129	MM₄	273,37
RR₅	(0, 29, 21, 25, 56, 44, 59, 53, 55, 0)	QQ₅	148	MM₅	354,38
RR₆	(0, 5, 30, 37, 60, 50, 35, 36, 3, 4, 0)	QQ₆	127	MM₆	340,92
RR₇	(0, 18, 12, 13, 19, 24, 52, 8, 10, 40, 0)	QQ₇	104	MM₇	359,00
					2.326,12 m

¹¹ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

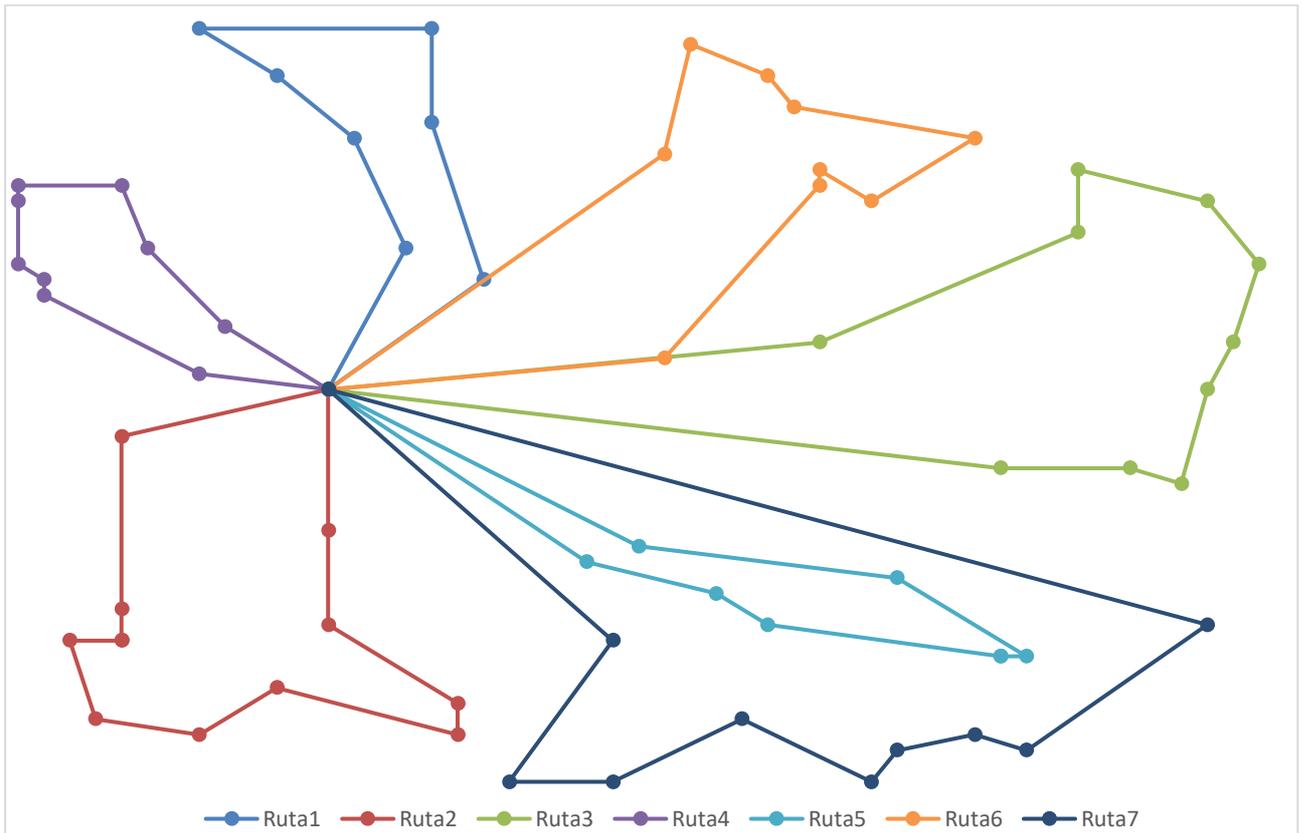


Figura 5.5 Representación de las rutas del UAV, Escenario 2 (n65-D200-E365).



Figura 5.6 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 2 (n65-D200-E365).

Se trata de un problema de tamaño pequeño cuyo recurso limitante es la capacidad de batería (**91,04%** frente al 62,64%). La mejor solución se encuentra a los **354,64 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 23, iteración n = 88**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **10,15%**. El algoritmo se detiene a los **390 segundos**, alcanzando el tiempo máximo de ejecución (T = 390 segundos). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **28 mejoras de la solución inicial**.

5.3 Escenario 3: n76-Demand280-Endurance180

Se utiliza como base la instancia *P-n76-k5 de Augerat (1995)*. En la **Figura 5.7** se representa la distribución de nodos en el plano¹².

$N = 76 \text{ nodos}$
 $R = 280 \text{ segundos}$
 $E = 180 \text{ metros}$
 Demanda: $[0, 37]$

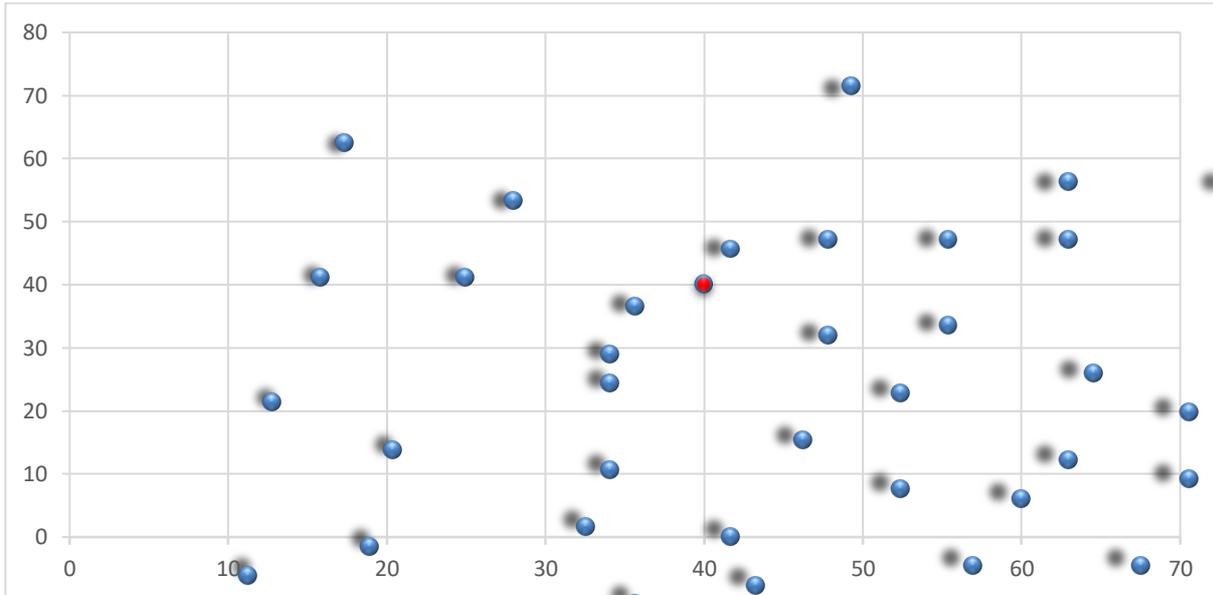


Figura 5.7 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 3 (n76-D280-E180).

La **Tabla 5-3** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n76-D280-E180 ($cte=1,0$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.8** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.9**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **20 rutas**.

Tabla 5-3 Mejor resultado obtenido, Escenario 3 (n76-D280-E180).

Ruta		$T_{\text{grabación}} \text{ seg}$		$D_{\text{recorrida}} \text{ m}$	
RR₁	(0, 51, 3, 32, 40, 0)	QQ₁	84	MM₁	177,79
RR₂	(0, 67, 8, 46, 34, 0)	QQ₂	92	MM₂	171,06
RR₃	(0, 26, 58, 31, 72, 0)	QQ₃	65	MM₃	173,08
RR₄	(0, 29, 5, 47, 48, 0)	QQ₄	73	MM₄	168,66
RR₅	(0, 7, 53, 11, 0)	QQ₅	74	MM₅	170,90
RR₆	(0, 52, 54, 13, 27, 0)	QQ₆	64	MM₆	154,52
RR₇	(0, 74, 30, 45, 4, 0)	QQ₇	83	MM₇	173,41
RR₈	(0, 63, 23, 56, 41, 0)	QQ₈	58	MM₈	170,65
RR₉	(0, 16, 49, 24, 18, 0)	QQ₉	64	MM₉	179,75
RR₁₀	(0, 12, 39, 9, 17, 0)	QQ₁₀	81	MM₁₀	172,62
RR₁₁	(0, 68, 22, 61, 21, 0)	QQ₁₁	65	MM₁₁	178,24
RR₁₂	(0, 10, 38, 0)	QQ₁₂	50	MM₁₂	134,93
RR₁₃	(0, 36, 69, 71, 60, 70, 0)	QQ₁₃	47	MM₁₃	170,67
RR₁₄	(0, 57, 15, 20, 37, 0)	QQ₁₄	58	MM₁₄	168,29
RR₁₅	(0, 6, 33, 1, 75, 0)	QQ₁₅	84	MM₁₅	178,31
RR₁₆	(0, 59, 14, 35, 0)	QQ₁₆	65	MM₁₆	174,48

¹² Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

RR₁₇	(0, 44, 50, 55, 25, 0)	QQ₁₇	60	MM₁₇	177,94
RR₁₈	(0, 2, 28, 62, 73, 0)	QQ₁₈	79	MM₁₈	175,13
RR₁₉	(0, 65, 66, 19, 0)	QQ₁₉	61	MM₁₉	178,33
RR₂₀	(0, 64, 42, 43, 0)	QQ₂₀	57	MM₂₀	174,50

3.423,26 m

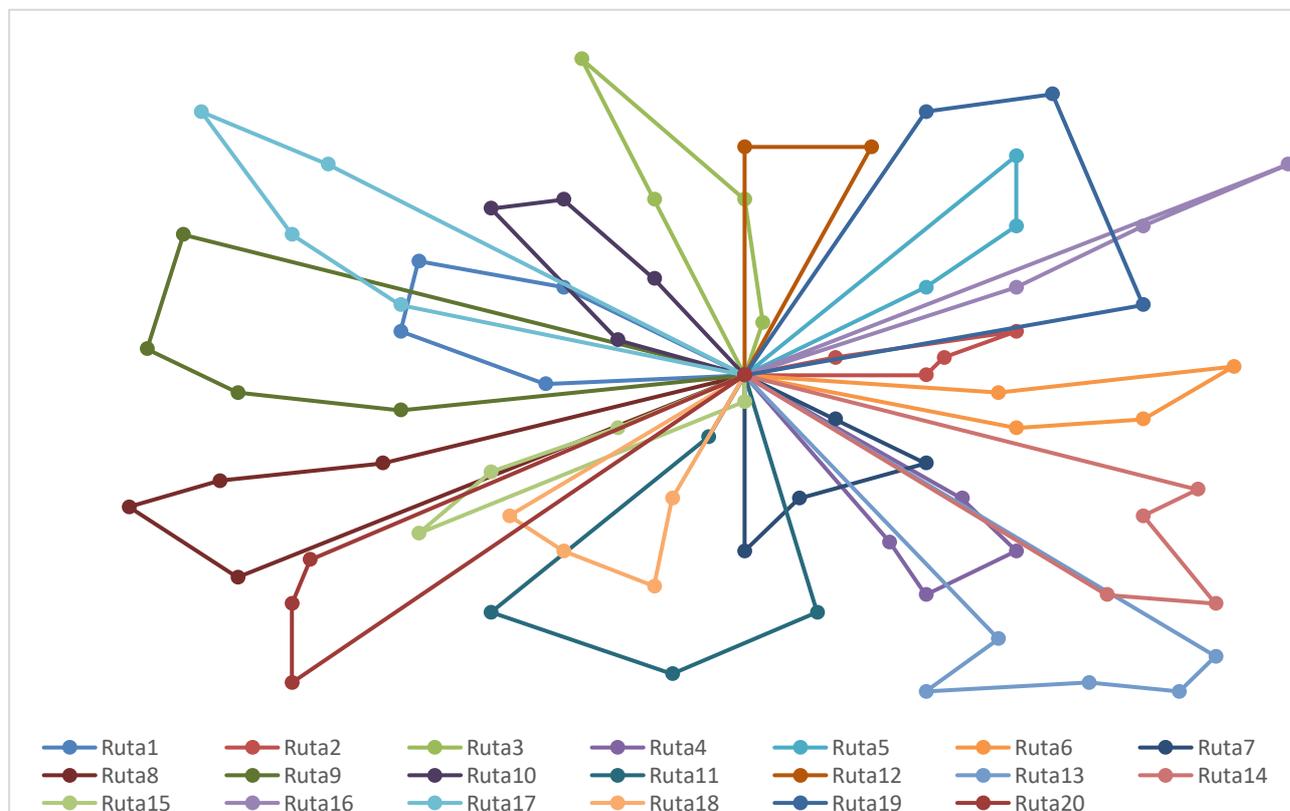


Figura 5.8 Representación de las rutas del UAV, Escenario 3 (n76-D280-E180).

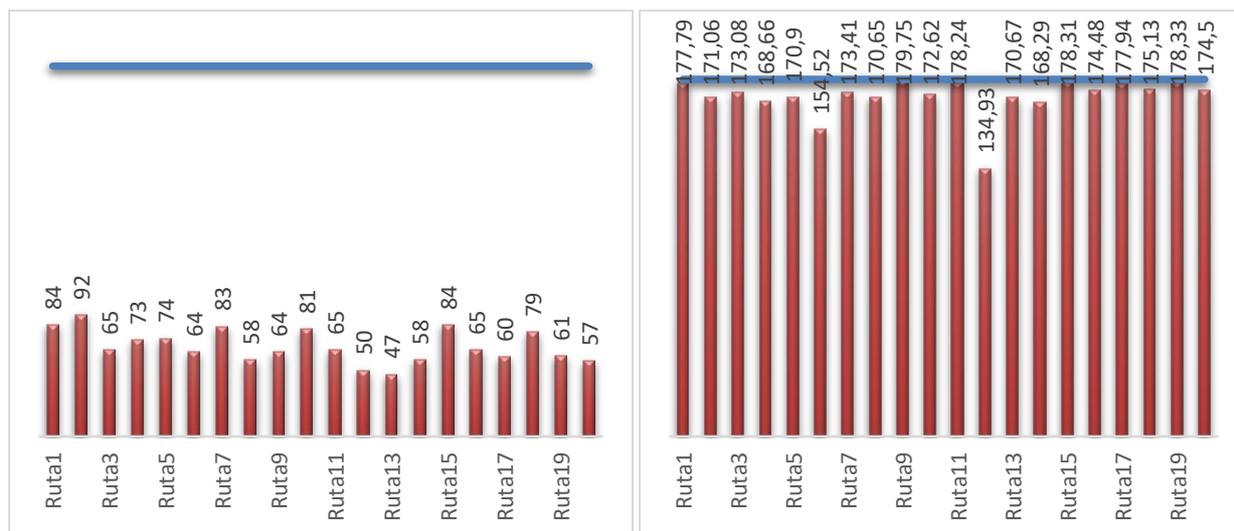


Figura 5.9 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 3 (n76-D280-E180).

Se trata de un problema de tamaño pequeño cuyo recurso limitante es la capacidad de batería (**95,09%** frente al 24,36%). La mejor solución se encuentra a los **253,10 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 6, iteración n = 53**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **5,88%**. El algoritmo se detiene a los **390 segundos**, alcanzando el tiempo máximo de ejecución (T = 390 segundos). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **36 mejoras de la solución inicial**.

5.4 Escenario 4: n80-Demand100-Endurance320

Se utiliza como base la instancia *A-n80-k10 de Augerat (1995)*. En la **Figura 5.10** se representa la distribución de nodos en el plano¹³.

$N = 80$ nodos
 $R = 100$ segundos
 $E = 320$ metros
 Demanda: [0, 26]

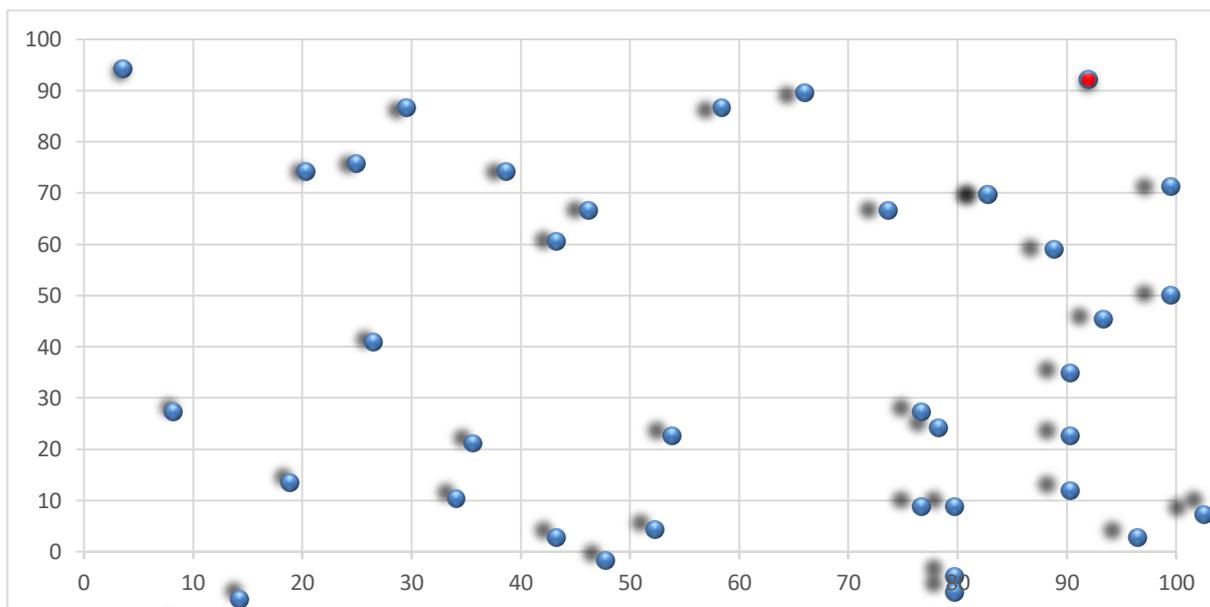


Figura 5.10 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 4 (n80-D100-E320).

La **Tabla 5-4** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n80-D100-E320 ($cte=1,0$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.11** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.12**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **12 rutas**.

Tabla 5-4 Mejor resultado obtenido, Escenario 4 (n80-D100-E320).

	Ruta	T_{grabación} seg	D_{recorrida} m
RR₁	(0, 39, 60, 29, 5, 44, 12, 42, 0)	QQ₁ 100	MM₁ 297,46
RR₂	(0, 40, 21, 7, 1, 13, 73, 0)	QQ₂ 100	MM₂ 255,32
RR₃	(0, 51, 77, 46, 25, 19, 61, 78, 0)	QQ₃ 64	MM₃ 318,98
RR₄	(0, 3, 74, 17, 31, 27, 59, 30, 0)	QQ₄ 99	MM₄ 315,14
RR₅	(0, 36, 53, 66, 67, 70, 50, 58, 38, 49, 0)	QQ₅ 99	MM₅ 300,84
RR₆	(0, 63, 11, 6, 24, 34, 71, 10, 0)	QQ₆ 89	MM₆ 310,96
RR₇	(0, 72, 54, 9, 55, 33, 15, 41, 64, 0)	QQ₇ 63	MM₇ 319,42
RR₈	(0, 52, 28, 79, 18, 48, 14, 0)	QQ₈ 85	MM₈ 317,38
RR₉	(0, 20, 75, 57, 16, 43, 68, 0)	QQ₉ 60	MM₉ 312,25
RR₁₀	(0, 32, 4, 22, 45, 76, 0)	QQ₁₀ 77	MM₁₀ 308,77
RR₁₁	(0, 2, 37, 8, 23, 62, 0)	QQ₁₁ 80	MM₁₁ 318,11
RR₁₂	(0, 47, 26, 35, 65, 69, 56, 0)	QQ₁₂ 26	MM₁₂ 303,93
			3.678,56 m

¹³ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

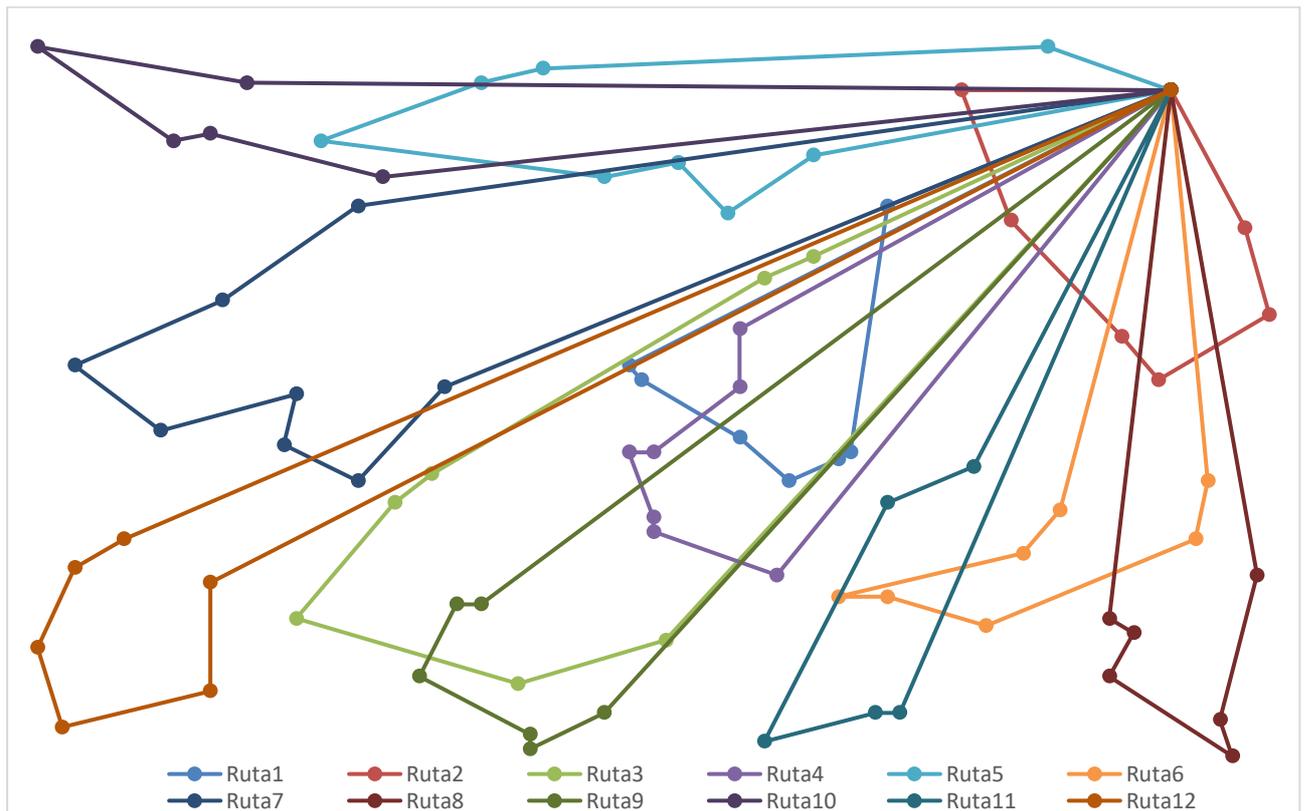


Figura 5.11 Representación de las rutas del UAV, Escenario 4 (n80-D100-E320).

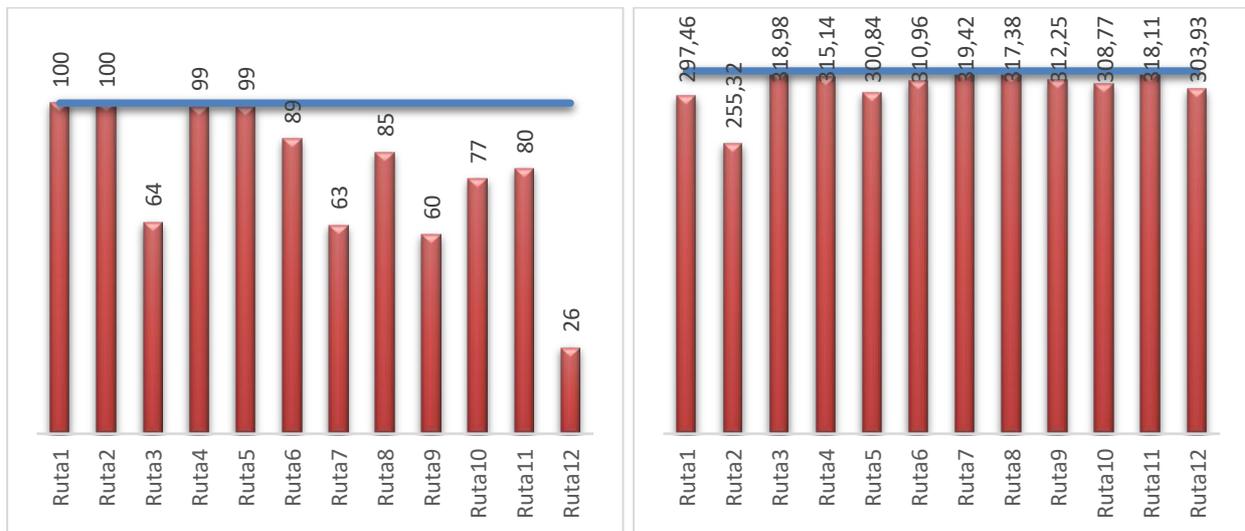


Figura 5.12 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 4 (n80-D100-E320).

Se trata de un problema de tamaño pequeño cuyo recurso limitante es la capacidad de batería (**95,80%** frente al 78,50%). La mejor solución se encuentra a los **57,56 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 2, iteración n = 54**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **6,02%**. El algoritmo se detiene a los **214,88 segundos**, alcanzando el valor de ciclos no mejora (I = 480). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **28 mejoras de la solución inicial**.

5.5 Escenario 5: n101-Demand400-Endurance2700

Se utiliza como base la instancia *X-n101-k25 de Uchoa et al. (2014)*. En la **Figura 5.13** se representa la distribución de nodos en el plano¹⁴.

N = 101 nodos
R = 400 segundos
E = 2.700 metros
Demanda: [0, 100]

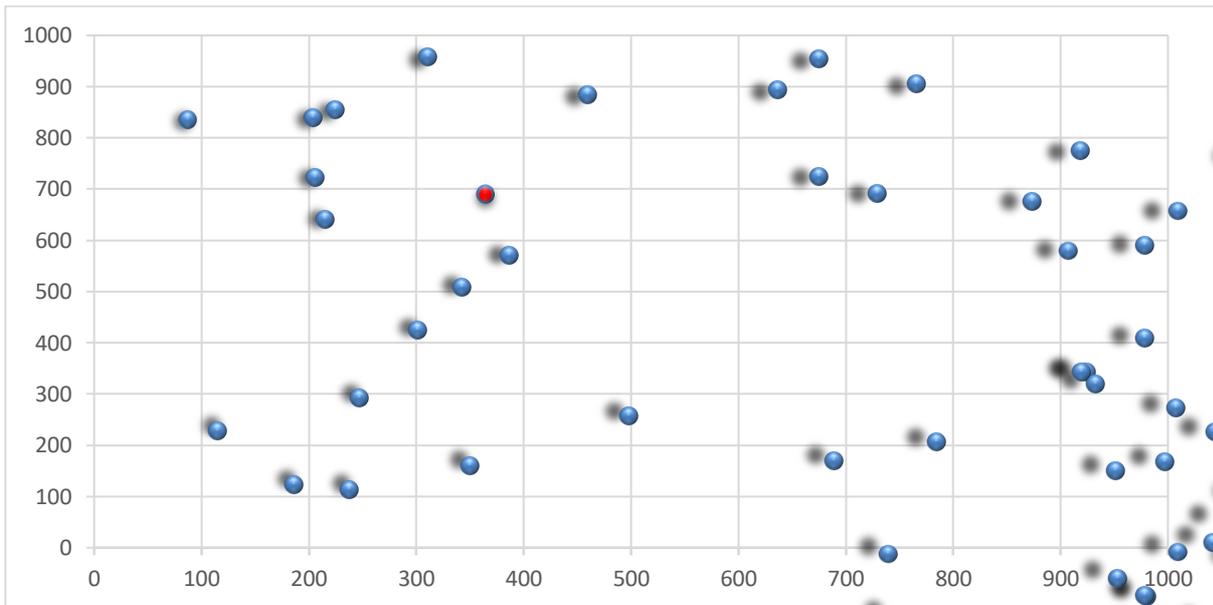


Figura 5.13 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 5 (n101-D400-E2700).

La **Tabla 5-5** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n101-D400-E2700 (*cte=1,5*). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.14** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.15**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **14 rutas**.

Tabla 5-5 Mejor resultado obtenido, Escenario 5 (n101-D400-E2700).

Ruta		T _{grabación} seg		D _{recorrida} m	
RR₁	(0, 58, 77, 14, 63, 28, 82, 57, 72, 87, 96, 0)	QQ₁	395	MM₁	1.794,62
RR₂	(0, 32, 31, 95, 73, 53, 33, 93, 0)	QQ₂	361	MM₂	1.510,54
RR₃	(0, 50, 19, 81, 52, 91, 97, 23, 0)	QQ₃	396	MM₃	1.717,67
RR₄	(0, 64, 6, 37, 36, 29, 43, 45, 2, 49, 7, 0)	QQ₄	362	MM₄	2.600,08
RR₅	(0, 21, 100, 61, 27, 38, 47, 48, 26, 0)	QQ₅	388	MM₅	2.006,25
RR₆	(0, 79, 11, 85, 30, 75, 0)	QQ₆	260	MM₆	1.181,52
RR₇	(0, 24, 46, 35, 20, 41, 22, 0)	QQ₇	319	MM₇	1.364,16
RR₈	(0, 5, 92, 9, 16, 76, 90, 84, 0)	QQ₈	389	MM₈	1.986,58
RR₉	(0, 18, 39, 25, 10, 65, 78, 42, 0)	QQ₉	379	MM₉	1.765,11
RR₁₀	(0, 80, 17, 34, 94, 56, 8, 0)	QQ₁₀	358	MM₁₀	1.249,48
RR₁₁	(0, 83, 51, 71, 62, 99, 98, 89, 0)	QQ₁₁	379	MM₁₁	2.046,80
RR₁₂	(0, 66, 68, 54, 86, 70, 1, 15, 0)	QQ₁₂	389	MM₁₂	2.090,35
RR₁₃	(0, 3, 59, 60, 67, 88, 40, 44, 0)	QQ₁₃	397	MM₁₃	1.522,40
RR₁₄	(0, 12, 4, 13, 74, 69, 55, 0)	QQ₁₄	375	MM₁₄	1.942,21
					24.777,77 m

¹⁴ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

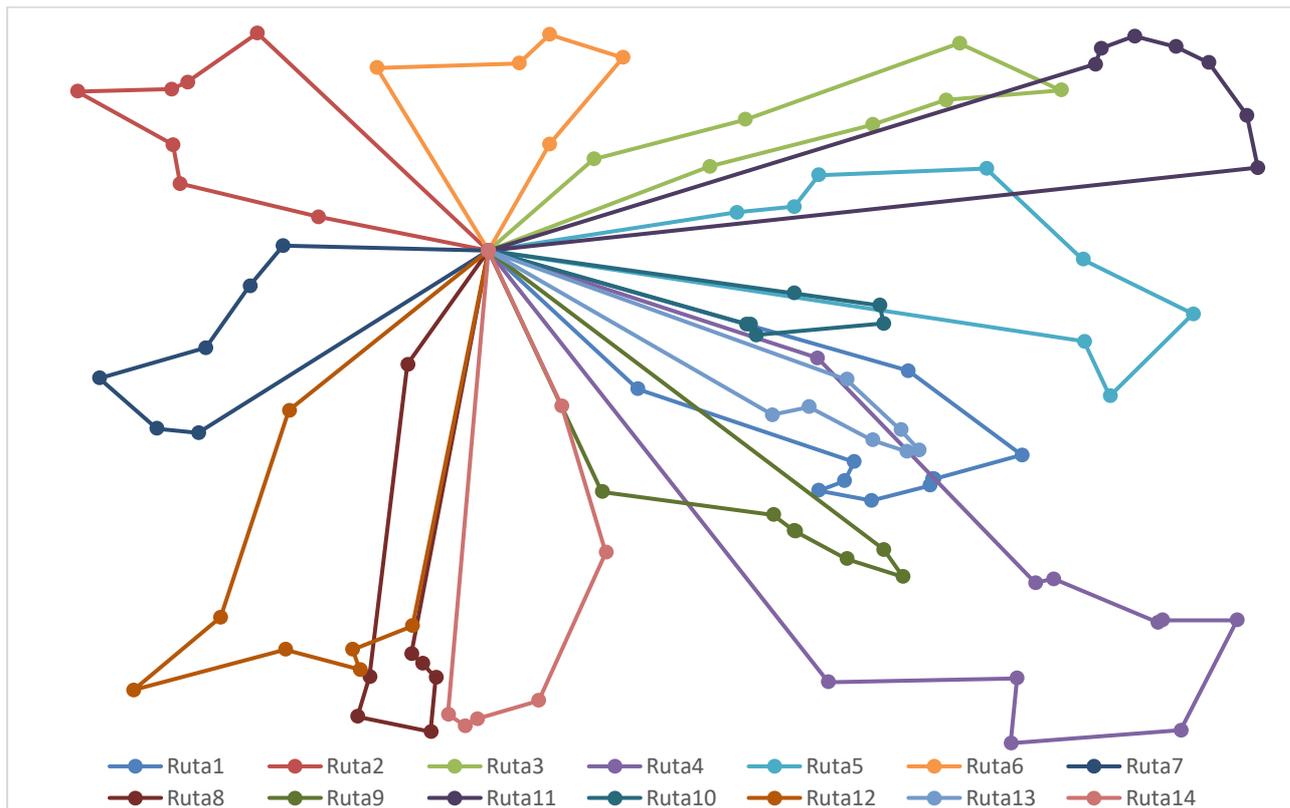


Figura 5.14 Representación de las rutas del UAV, Escenario 5 (n101-D400-E2700).

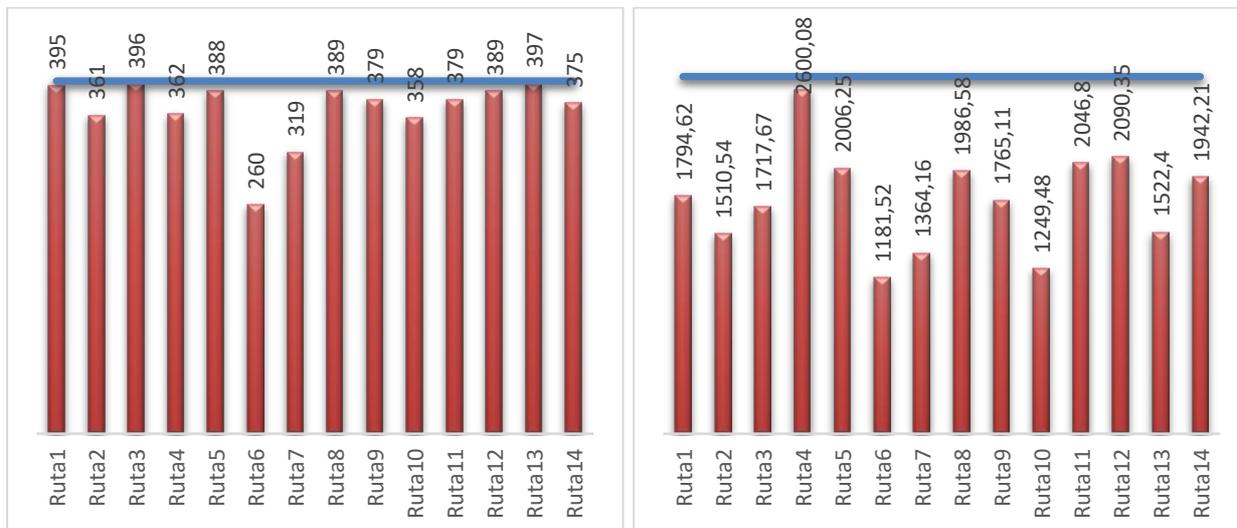


Figura 5.15 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 5 (n101-D400-E2700).

Se trata de un problema de tamaño mediano cuyo recurso limitante es la capacidad de disco duro (**91,91%** frente al 65,55%). La mejor solución se encuentra a los **337,02 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 2, iteración n = 122**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **9,72%**. El algoritmo se detiene a los **390 segundos** alcanzando el tiempo máximo de ejecución (T = 390 segundos). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **42 mejoras de la solución inicial**.

5.6 Escenario 6: n121-Demand200-Endurance720

Se utiliza como base la instancia *M-n121-k7* de *Christofides, Mingozzi and Toth (1979)*. En la **Figura 5.16** se representa la distribución de nodos en el plano¹⁵.

$N = 121$ nodos
 $R = 200$ segundos
 $E = 720$ metros
 Demanda: [0, 35]

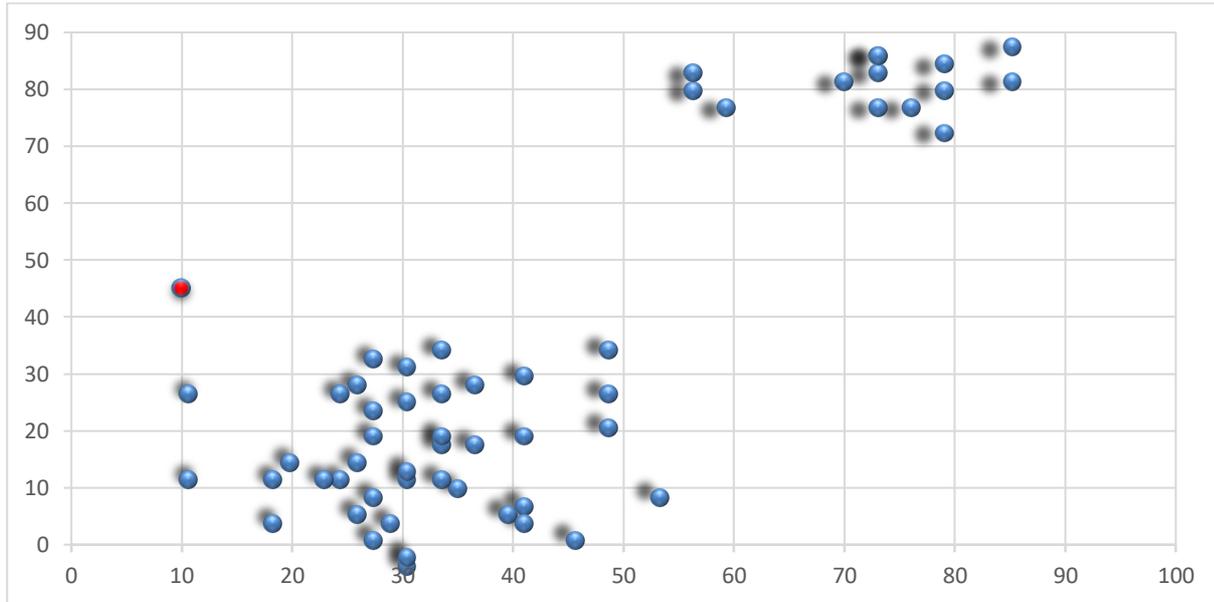


Figura 5.16 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 6 (n121-D200-E720).

La **Tabla 5-6** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n121-D200-E720 ($cte=0,5$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.17** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.18**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **7 rutas**.

Tabla 5-6 Mejor resultado obtenido, Escenario 6 (n121-D200-E720).

	Ruta	T_{grabación} seg		D_{recorrida} m	
RR₁	(0, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 14, 13, 12, 8, 5, 4, 3, 1, 2, 88, 0)	QQ₁	199	MM₁	437,64
RR₂	(0, 111, 86, 87, 91, 90, 114, 18, 118, 108, 109, 115, 110, 98, 116, 100, 99, 101, 102, 0)	QQ₂	191	MM₂	360,30
RR₃	(0, 95, 39, 42, 38, 37, 41, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 48, 45, 43, 40, 0)	QQ₃	200	MM₃	501,73
RR₄	(0, 82, 17, 16, 19, 25, 22, 24, 27, 33, 30, 28, 32, 35, 31, 34, 36, 29, 26, 23, 20, 21, 0)	QQ₄	196	MM₄	507,85
RR₅	(0, 106, 67, 69, 70, 71, 74, 72, 75, 78, 73, 76, 77, 80, 79, 68, 0)	QQ₅	194	MM₅	441,88
RR₆	(0, 52, 54, 57, 59, 65, 61, 62, 64, 66, 63, 60, 56, 58, 55, 53, 105, 0)	QQ₆	200	MM₆	514,22
RR₇	(0, 120, 107, 104, 103, 97, 94, 96, 93, 92, 89, 85, 112, 84, 113, 83, 117, 81, 119, 0)	QQ₇	195	MM₇	375,02

3.138,64 m

¹⁵ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

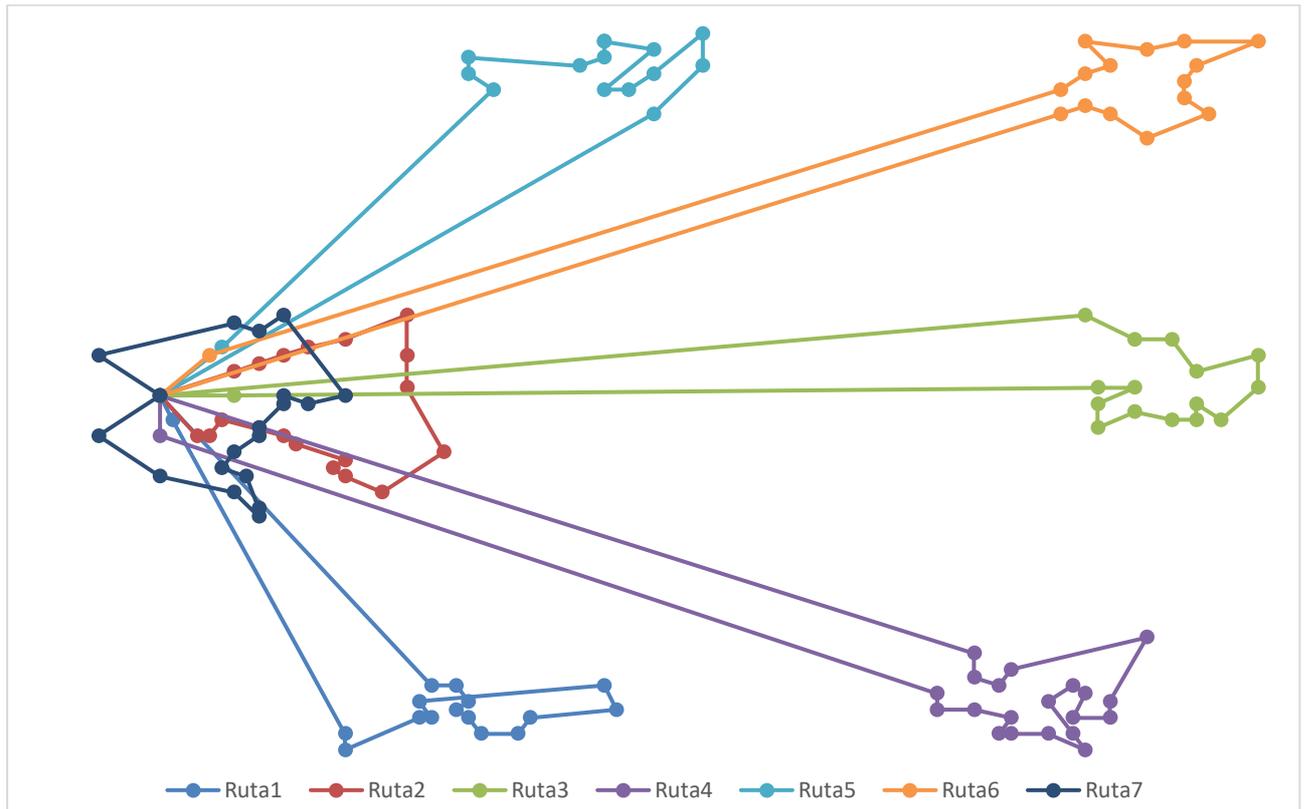


Figura 5.17 Representación de las rutas del UAV, Escenario 6 (n121-D200-E720).



Figura 5.18 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 6 (n121-D200-E720).

Se trata de un problema de tamaño mediano cuyo recurso limitante es la capacidad de disco duro (**98,21%** frente al 62,27%). La mejor solución se encuentra a los **241,74 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 11, iteración n = 32**), mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **6,91%**. El algoritmo se detiene a los **390 segundos** alcanzando el tiempo máximo de ejecución (T = 390 segundos). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **53 mejoras de la solución inicial**.

5.7 Escenario 7: n151-Demand200-Endurance351

Se utiliza como base la instancia *M-n151-k12* de *Christofides, Mingozzi and Toth (1979)*. En la **Figura 5.19** se representa la distribución de nodos en el plano¹⁶.

$N = 151$ nodos
 $R = 200$ segundos
 $E = 351$ metros
 Demanda: [0, 41]

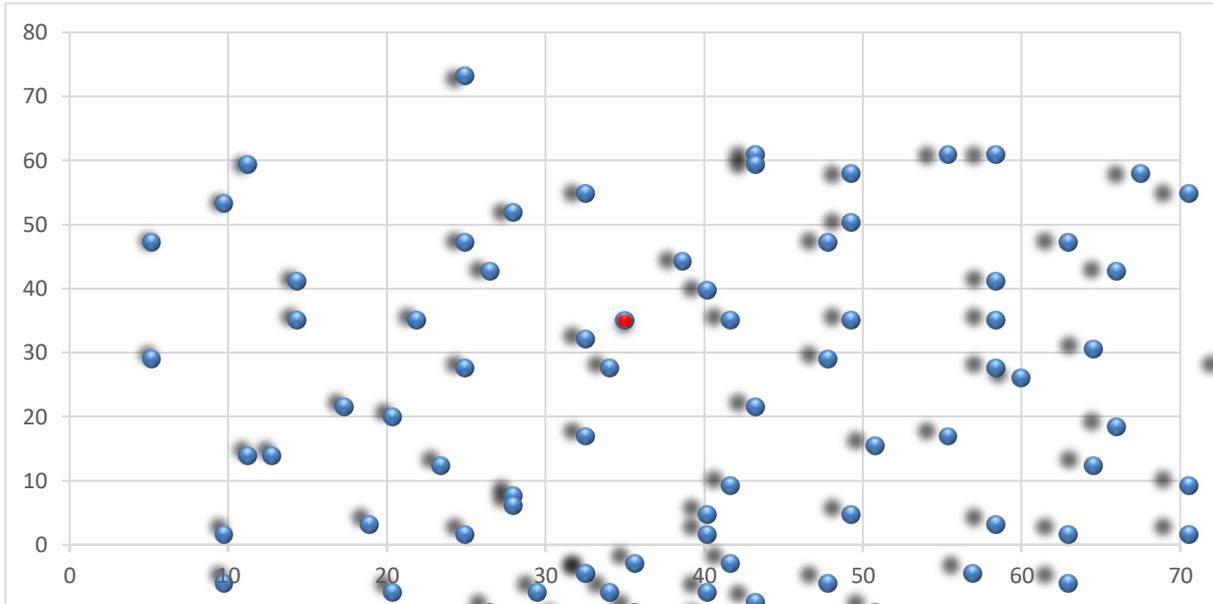


Figura 5.19 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 7 (n151-D200-E351).

La **Tabla 5-7** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n151-D200-E351 ($cte=0,5$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.20** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.21**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **14 rutas**.

Tabla 5-7 Mejor resultado obtenido, Escenario 7 (n151-D200-E351).

Ruta		T _{grabación} seg		D _{recorrida} m	
RR₁	(0, 89, 60, 118, 5, 84, 36, 143, 49, 64, 0)	QQ₁	147	MM₁	346,02
RR₂	(0, 53, 40, 21, 73, 72, 74, 75, 133, 22, 41, 145, 115, 2, 58, 0)	QQ₂	185	MM₂	347,72
RR₃	(0, 111, 50, 102, 33, 81, 51, 1, 132, 27, 0)	QQ₃	147	MM₃	283,39
RR₄	(0, 112, 94, 95, 117, 26, 149, 109, 12, 138, 28, 0)	QQ₄	175	MM₄	327,92
RR₅	(0, 105, 110, 4, 139, 39, 67, 23, 56, 0)	QQ₅	150	MM₅	318,36
RR₆	(0, 13, 137, 87, 144, 57, 15, 43, 142, 42, 97, 92, 59, 96, 0)	QQ₆	167	MM₆	336,48
RR₇	(0, 76, 116, 77, 3, 79, 129, 78, 34, 120, 9, 103, 122, 0)	QQ₇	169	MM₇	343,65
RR₈	(0, 18, 83, 114, 8, 125, 45, 46, 124, 47, 48, 0)	QQ₈	171	MM₈	349,66
RR₉	(0, 146, 127, 31, 88, 148, 62, 108, 10, 0)	QQ₉	131	MM₉	261,96
RR₁₀	(0, 52, 106, 7, 82, 123, 19, 107, 11, 126, 63, 90, 32, 131, 0)	QQ₁₀	163	MM₁₀	346,06
RR₁₁	(0, 80, 150, 68, 121, 29, 24, 134, 54, 130, 55, 25, 0)	QQ₁₁	143	MM₁₁	309,29
RR₁₂	(0, 98, 91, 38, 140, 86, 113, 17, 61, 85, 104, 0)	QQ₁₂	157	MM₁₂	340,39
RR₁₃	(0, 147, 6, 37, 100, 14, 119, 44, 141, 16, 93, 99, 0)	QQ₁₃	177	MM₁₃	341,76
RR₁₄	(0, 135, 35, 136, 65, 71, 66, 128, 20, 30, 70, 101, 69, 0)	QQ₁₄	153	MM₁₄	346,98

4.599,64 m

¹⁶ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

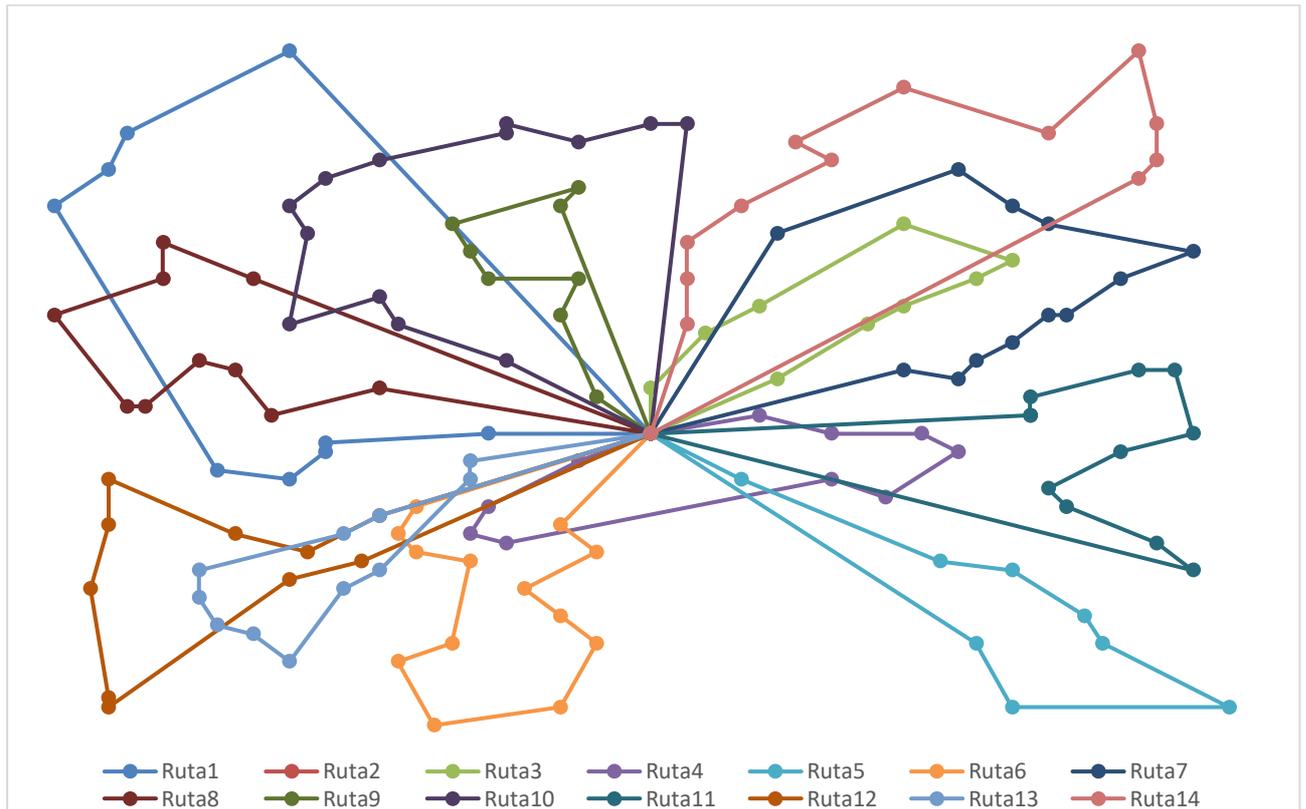


Figura 5.20 Representación de las rutas del UAV, Escenario 7 (n151-D200-E351).

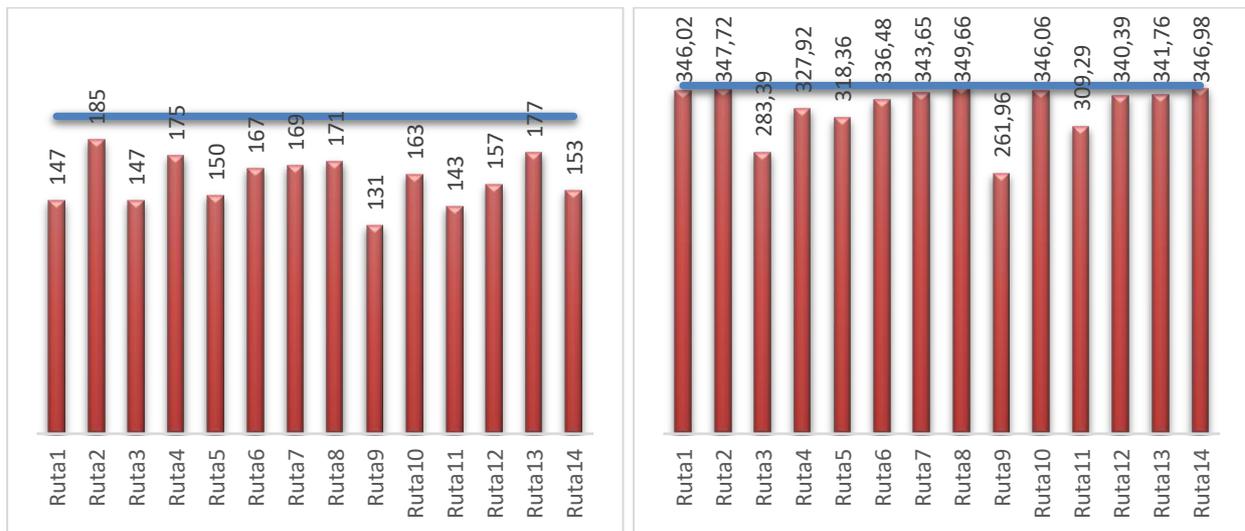


Figura 5.21 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 7 (n151-D200-E351).

Se trata de un problema de tamaño mediano cuyo recurso limitante es la capacidad de batería (93,60% frente al 79,82%). La mejor solución se encuentra a los **193,55 segundos** del inicio de la ejecución del programa (subproblema $p = 2$, iteración $n = 54$) mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **5,53%**. El algoritmo se detiene a los **390 segundos**, alcanzando el tiempo máximo de ejecución ($T = 390$ segundos). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **51 mejoras de la solución inicial**.

5.8 Escenario 8: n199-Demand200-Endurance420

Se utiliza como base la instancia *CMT10 de Christofides, Mingozzi and Toth (1979)*. En la **Figura 5.22** se representa la distribución de nodos en el plano¹⁷.

$N = 199$ nodos
 $R = 200$ segundos
 $E = 420$ metros
 Demanda: $[0, 41]$

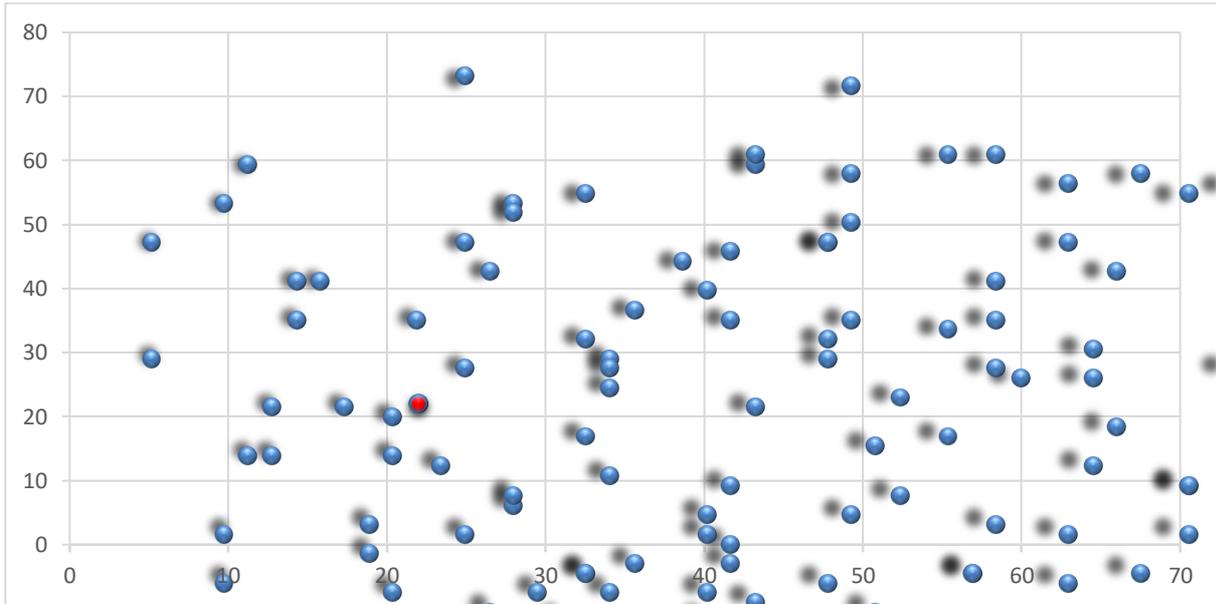


Figura 5.22 Distribución de los clientes y la estación central en el plano, Escenario 8 (n199-D200-E420).

La **Tabla 5-8** recoge el mejor resultado obtenido para el problema n199-D200-E420 ($cte=0,1$). La solución se representa gráficamente en la **Figura 5.23** y se acompaña de un diagrama de barras (**Figura 5.24**) que muestra el tiempo de grabación y distancia recorrida por el UAV en cada una de las **18 rutas**.

Tabla 5-8 Mejor resultado obtenido, Escenario 8 (n199-D200-E420).

Ruta		T _{grabación} seg		D _{recorrida} m	
RR₁	(0, 190, 0)	QQ₁	2	MM₁	3,00
RR₂	(0, 198, 41, 67, 136, 88, 142, 89, 40, 189, 42, 135, 0)	QQ₂	147	MM₂	272,43
RR₃	(0, 185, 92, 155, 27, 63, 100, 85, 138, 1, 156, 111, 0)	QQ₃	180	MM₃	324,96
RR₄	(0, 21, 140, 90, 112, 141, 113, 93, 139, 120, 81, 172, 20, 171, 47, 119, 0)	QQ₄	197	MM₄	395,79
RR₅	(0, 159, 22, 182, 103, 66, 158, 181, 48, 62, 106, 23, 73, 0)	QQ₅	197	MM₅	364,20
RR₆	(0, 114, 184, 61, 115, 143, 144, 72, 145, 17, 146, 180, 0)	QQ₆	198	MM₆	395,61
RR₇	(0, 60, 5, 16, 75, 39, 129, 70, 49, 11, 0)	QQ₇	174	MM₇	349,69
RR₈	(0, 15, 116, 2, 54, 43, 105, 31, 96, 160, 8, 38, 0)	QQ₈	188	MM₈	366,06
RR₉	(0, 125, 149, 107, 10, 169, 83, 133, 84, 163, 164, 94, 0)	QQ₉	175	MM₉	415,14
RR₁₀	(0, 150, 186, 108, 56, 188, 130, 79, 9, 76, 37, 118, 128, 168, 0)	QQ₁₀	193	MM₁₀	405,79
RR₁₁	(0, 196, 183, 191, 52, 197, 194, 104, 95, 187, 32, 157, 0)	QQ₁₁	200	MM₁₁	338,93
RR₁₂	(0, 126, 59, 25, 80, 167, 99, 148, 50, 6, 131, 34, 77, 177, 0)	QQ₁₂	189	MM₁₂	391,02
RR₁₃	(0, 3, 86, 33, 45, 64, 175, 7, 101, 166, 98, 0)	QQ₁₃	195	MM₁₃	379,95
RR₁₄	(0, 58, 4, 102, 87, 19, 123, 153, 14, 78, 152, 82, 12, 178, 26, 65, 0)	QQ₁₄	198	MM₁₄	414,52
RR₁₅	(0, 28, 122, 127, 69, 18, 176, 132, 13, 68, 51, 179, 174, 0)	QQ₁₅	179	MM₁₅	412,74

¹⁷ Se identifican los clientes en color azul y la estación central en rojo.

RR₁₆ (0, 193, 53, 29, 124, 97, 44, 57, 110, 151, 192, 0)
RR₁₇ (0, 117, 55, 24, 109, 74, 161, 30, 162, 147, 91, 134, 71, 0)
RR₁₈ (0, 170, 46, 173, 154, 35, 121, 165, 137, 36, 195, 0)

QQ₁₆ 190 **MM₁₆** 358,81
QQ₁₇ 175 **MM₁₇** 413,30
QQ₁₈ 191 **MM₁₈** 394,53

6.396,47 m

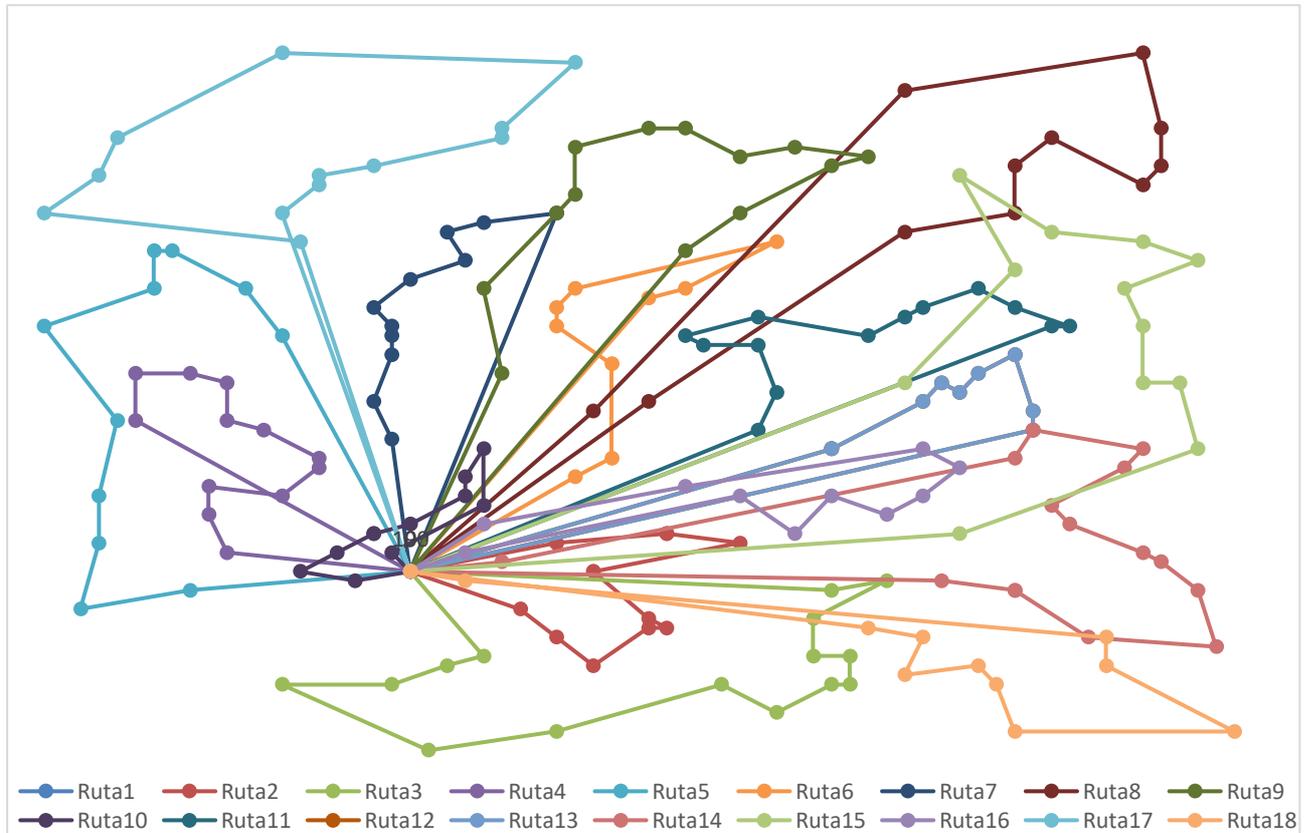


Figura 5.23 Representación de las rutas del UAV, Escenario 8 (n199-D200-E420).

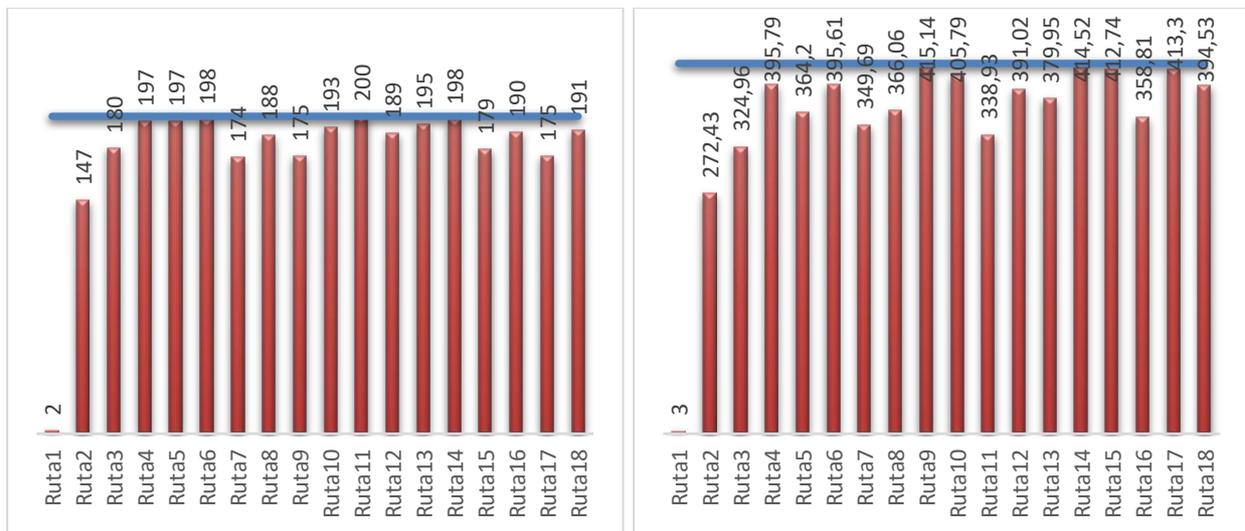


Figura 5.24 Tiempo de grabación y distancia recorrida en cada ruta, Escenario 8 (n199-D200-E420).

Se trata de un problema de tamaño grande donde no hay un recurso limitante predominante (88,00% y 84,61%). La mejor solución se encuentra a los **242,14 segundos** del inicio de la ejecución del programa (**subproblema p = 26, iteración n = 18**) mejorando la solución inicial obtenida de la heurística desarrollada un **1,92%**. El algoritmo se detiene a los **341,67 segundos**, alcanzando el valor de ciclos no mejora (I = 119). Durante el tiempo de ejecución del programa se producen **40 mejoras de la solución inicial**.

5.9 Recopilación de Resultados en los Escenarios

La **Tabla 5-9** recoge los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada escenario.

Tabla 5-9 Resultados de las simulaciones de los 8 escenarios.

Instance	cte	l	Tabu _{length}	P	IE	k	LL (m)	LL _{time} (sg) ¹⁸	Stop ¹⁹
n51-D160-E200	0,1	5	3	10	31	12	2.028,41	2,03	count
n51-D160-E200	0,5	25	13	51	153	11	1.950,63	11,72	count
n51-D160-E200	1,0	51	25	102	306	11	1.950,63	28,82	count
n51-D160-E200	1,5	76	38	153	459	11	1.936,32	81,80	count
n65-D200-E365	0,1	6	3	13	38	8	2.393,19	4,25	count
n65-D200-E365	0,5	32	16	64	192	8	2.392,56	8,93	count
n65-D200-E365	1,0	64	32	128	384	7	2.382,38	45,38	count
n65-D200-E365	1,5	96	48	192	576	7	2.326,12	354,64	time
n76-D280-E180	0,1	7	4	15	46	22	3.528,50	5,89	count
n76-D280-E180	0,5	38	19	76	228	21	3.444,04	112,85	count
n76-D280-E180	1,0	76	38	152	456	20	3.423,26	253,10	time
n76-D280-E180	1,5	114	57	228	684	20	3.428,25	172,37	time
n80-D100-E320	0,1	8	4	16	48	13	3.764,81	5,02	count
n80-D100-E320	0,5	40	20	80	240	12	3.715,87	41,97	count
n80-D100-E320	1,0	80	40	160	480	12	3.678,55	57,56	count
n80-D100-E320	1,5	120	60	240	720	12	3.678,55	97,44	time
n101-D400-E2700	0,1	10	5	20	61	15	25.514,01	12,94	count
n101-D400-E2700	0,5	50	25	101	303	14	25.097,29	106,31	count
n101-D400-E2700	1,0	101	50	202	606	14	25.059,49	99,58	time
n101-D400-E2700	1,5	151	76	303	909	14	24.777,76	337,02	time
n121-D200-E720	0,1	12	6	24	73	8	3.179,57	5,93	count
n121-D200-E720	0,5	60	30	121	363	7	3.138,63	241,74	time
n121-D200-E720	1,0	121	60	242	726	7	3.166,54	390,00	time
n121-D200-E720	1,5	181	91	363	1089	7	3.176,90	299,76	time
n151-D200-E351	0,1	15	8	30	91	14	4.639,08	13,93	count
n151-D200-E351	0,5	75	38	151	453	14	4.599,64	193,55	time
n151-D200-E351	1,5	226	113	453	1359	14	4.609,31	390,00	time
n151-D200-E351	1,0	151	75	302	906	14	4.607,57	219,18	time
n199-D200-E420	0,5	99	50	199	597	17	6.411,54	162,57	time
n199-D200-E420	0,1	19	10	40	119	18	6.396,46	242,14	count
n199-D200-E420	1,0	199	99	398	1194	17	6.411,54	390,00	time
n199-D200-E420	1,5	298	149	597	1791	17	6.411,54	390,00	time

5.10 Análisis de sensibilidad modelo Tabu Search: Lista Tabu

Tal y como se ha explicado en el **Aparatado 4.3**, en el modelo Tabu Search se define una lista Tabu que excluye aquellas soluciones que conllevan una mejora local pero que se han creado a partir de pares de intercambio (**edge_{removed}**) que se encuentren en la lista (**T**). Los pares que se introducen en la lista permanecen en ella durante un número de iteraciones definidas por el parámetro **Tabu_{Length}** (**5-1**). En este Proyecto, se analiza el comportamiento del modelo de optimización en base a 4 diferentes configuraciones de este parámetro.

$$Tabu_{Length} = \left[\frac{cte}{10}, \frac{cte}{5}, \frac{cte}{2}, \frac{cte}{1} \right] \times N \quad (5-1)$$

¹⁸ Tiempo en el que se alcanza la mejor solución encontrada para el escenario simulado.

¹⁹ Motivo por el que se para la simulación; se alcanza el tiempo de computación permitido (time) o el número máximo de ciclos no mejora (count).

La **tabla 5-10** recoge las simulaciones realizadas para cada escenario²⁰ manteniendo constante el resto de los parámetros del modelo definido al inicio del capítulo.

Se observa que el **62,5% de los escenarios** mejora su resultado utilizando una configuración $Tabu_{length} = cte/2 \times N$.

Tabla 5-10 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado sobre el parámetro $Tabu_{length}$

Instance	cte	$Tabu_{length}$	LL (m)
n51-D160-E200	1,5	8	1.963,21
n51-D160-E200	1,5	15	1.948,62
n51-D160-E200	1,5	38	1.936,32
n51-D160-E200	1,5	77	1.941,22
n65-D200-E365	1,5	10	2.337,64
n65-D200-E365	1,5	19	2.337,05
n65-D200-E365	1,5	48	2.326,12
n65-D200-E365	1,5	96	2.360,28
n76-D280-E180	1	8	3.437,90
n76-D280-E180	1	19	3.432,74
n76-D280-E180	1	38	3.424,68
n76-D280-E180	1	76	3.403,93
n80-D100-E320	1	8	3.673,18
n80-D100-E320	1	20	3.713,21
n80-D100-E320	1	40	3.678,55
n80-D100-E320	1	80	3.713,21
n101-D400-E2700	1,5	15	24.790,85
n101-D400-E2700	1,5	30	24.995,33
n101-D400-E2700	1,5	76	24.777,76
n101-D400-E2700	1,5	152	25.058,98
n121-D200-E720	0,5	6	3.148,81
n121-D200-E720	0,5	12	3.139,27
n121-D200-E720	0,5	30	3.138,63
n121-D200-E720	0,5	61	3.142,10
n151-D200-E351	0,5	8	4.576,39
n151-D200-E351	0,5	15	4.617,88
n151-D200-E351	0,5	38	4.599,64
n151-D200-E351	0,5	76	4.615,18
n199-D200-E420	0,1	2	6.396,46
n199-D200-E420	0,1	4	6.396,46
n199-D200-E420	0,1	10	6.396,46
n199-D200-E420	0,1	20	6.423,36

5.11 Análisis de sensibilidad modelo evolutivo: Nivel Saturación del UAV

Tal y como se ha explicado en el **Aparatado 4.4**, cuando se termina el cálculo del método Tabu Search en un Subproblema, se selecciona una semilla que genere un nuevo Subproblema mientras dure el proceso iterativo. En este Proyecto, se analiza el comportamiento del modelo de optimización en función al criterio establecido para la definición de esta semilla. La **table 5-11** recoge los resultados de las 3 configuraciones realizadas por cada escenario donde los parámetros **WeightQQ** y **WeightMM** pueden tomar los valores **[0, 0.5, 1]**²¹. El resto de los parámetros del modelo mantienen el valor definido al inicio del capítulo²².

²⁰ Se escoge de referencia la configuración óptima descrita en los **Apartados 5.2-5.9**.

²¹ En cualquiera de los casos, la suma de ambos parámetros debe ser la unidad.

²² Se escoge para las simulaciones el valor de $cte = 0,5$.

Se observa que el **50% de los escenarios** mejora su resultado cuando se pondera en mayor cuantía el parámetro que pondera el recurso ocioso del UAV. En el porcentaje restante la solución se mantiene, aunque se mejora el tiempo computacional (se alcanza el valor óptimo en menor tiempo).

Tabla 5–11 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado sobre los parámetros WeightQQ y WeightMM.

Instance	cte	WeightQQ	WeightMM	LL (m)	LL _{time} (sg)	Limitation _{resource}
n51-D160-E200	0,5	0	1	1.955,18	23,34	
n51-D160-E200	0,5	0,5	0,5	1.950,63	11,72	battery
n51-D160-E200	0,5	1	0	1.950,63	11,22	
n65-D200-E365	0,5	0	1	2.374,94	17,59	
n65-D200-E365	0,5	0,5	0,5	2.392,56	8,93	battery
n65-D200-E365	0,5	1	0	2.353,86	30,36	
n76-D280-E180	0,5	0	1	3.445,23	77,34	
n76-D280-E180	0,5	0,5	0,5	3.444,04	112,85	battery
n76-D280-E180	0,5	1	0	3.445,23	26,85	
n80-D100-E320	0,5	0	1	3.667,99	50,97	
n80-D100-E320	0,5	0,5	0,5	3.715,87	41,97	battery
n80-D100-E320	0,5	1	0	3.686,16	23,22	
n101-D400-E2700	0,5	0	1	25.000,56	186,58	
n101-D400-E2700	0,5	0,5	0,5	25.097,29	106,31	hard disk
n101-D400-E2700	0,5	1	0	25.086,92	77,66	
n121-D200-E720	0,5	0	1	3.153,17	141,48	
n121-D200-E720	0,5	0,5	0,5	3.138,63	241,74	battery/hard disk
n121-D200-E720	0,5	1	0	3.134,15	131,14	
n151-D200-E351	0,5	0	1	4.584,00	372,19	
n151-D200-E351	0,5	0,5	0,5	4.599,64	193,55	battery
n151-D200-E351	0,5	1	0	4.604,52	338,78	
n199-D200-E420	0,5	0	1	6.411,54	170,85	
n199-D200-E420	0,5	0,5	0,5	6.411,54	162,57	battery/hard disk
n199-D200-E420	0,5	1	0	6.411,54	180,83	

6 CONCLUSIONES

En este TFM, se aborda la resolución del problema MTCDVRP (*Multi Trip Capacity Distance Vehicle Routing Problem*) que resulta del modelado de una aplicación práctica de monitorización de objetivos utilizando un único UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Tomando de partida los conceptos desarrollados por Cattaruzza [6] y otras consideraciones como las de Choi [12] y Dorling [13], se plantea un MTCDVRP cuyo objetivo es la minimización de una función de costes combinación lineal de un término función de las distancias de traslación entre puntos (lineal con la distancia recorrida en los desplazamientos o travelling) y un término de distancias recorridas debido al sobrevuelo de los puntos (lineal con el tiempo de grabación del objetivo, mientras hace hovering).

Al tratarse de un problema NP-hard, para poder abordar la resolución de instancias de tamaño medio en tiempo razonable ha hecho falta desarrollar nuestro propio método de resolución heurístico. Así, hemos desarrollado un algoritmo para su resolución aproximada que empieza por determinar una buena solución inicial y a partir de ahí, aplica una variante del proceso tradicional TS (*Tabu Search*) al que se le incorpora el concepto de evolución gradual. Como novedad al trabajo planteado por Suzuki and Cortes [21], en nuestra implementación GTS se aplica un factor que fuerza la exploración de espacios de soluciones que, de otra forma, no se alcanzaría por la propia naturaleza del problema.

Como decisión de diseño, se han parametrizado las variables del modelo TS en función al tamaño del problema, identificando clara relación entre el parámetro $\text{Tabu}_{\text{length}}$ y el tamaño del problema (N). Por el contrario, no ocurre lo mismo con el resto de los parámetros, dada la propia naturaleza de método Tabu Search, donde las combinaciones de rutas para encontrar nuevas soluciones son erráticas²³. Además, hemos usado una función correctora para reparar las rutas que en TS muestran cruce de tramos (claramente, rutas dominadas por otras compuestas de los mismos nodos... pero sin cruces). Sin embargo, la función correctora chequea una por una todas las combinaciones posibles de los nodos en la ruta antes de elegir la más corta... lo que es computacionalmente inviable para rutas con más de 7 nodos.

La experimentación realizada en un dataset de 8 escenarios de distinta naturaleza, indica que nuestro GTS mejora la solución encontrada en el 75% de los escenarios estudiados. Es más, nuestro GTS ofrece soluciones de mejor calidad (menor distancia recorrida), y se puede ajustar hacerlo con mayor o menor tiempo computacional si al factor que determina la semilla a incluir en siguientes Subproblemas, se aporta mayor peso en el recurso ocioso del UAV (capacidad de batería o disco duro).

²³ Por este motivo, no es factible aplicar correlación entre las diferentes posibilidades de configuración y el tamaño del problema.

En este Anexo se presenta el log que resulta de la ejecución del Algoritmo GTS sobre el ejemplo ilustrativo de 51 nodos discutido en la Sección 4.5.

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -0-//////////
0-46-12-47-4-17-37-0
0-27-1-32-11-38-5-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-20-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-40-13-0
0-33-39-0
0-36-35-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 80 sg      Distancia recorrida ruta 0: 173.94 m
Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg      Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 40 sg      Distancia recorrida ruta 9: 173.71 m
Tiempo de grabado ruta 10: 37 sg     Distancia recorrida ruta 10: 141.72 m
Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg     Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2094.26 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -1-//////////
0-46-12-47-4-17-37-0
0-27-1-32-11-38-5-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-20-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-33-39-0
0-40-13-0
0-36-35-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 80 sg      Distancia recorrida ruta 0: 173.94 m
Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg      Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg      Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m

```

Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 30 sg Distancia recorrida ruta 10: 135.36 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2075.22 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -2-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-32-11-38-5-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-20-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-23-7-43-24-0
 0-15-44-42-19-41-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-45-33-39-0
 0-4-13-40-17-37-0
 0-36-35-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 89 sg Distancia recorrida ruta 1: 189.97 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 23 sg Distancia recorrida ruta 11: 123.92 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2057.91 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -3-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-36-35-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-20-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-23-7-43-24-0
 0-15-44-42-19-41-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-45-33-39-0
 0-4-13-40-17-37-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 45 sg Distancia recorrida ruta 1: 160.12 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 66 sg Distancia recorrida ruta 4: 179.61 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2048.96 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -4-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-20-0
 0-6-48-8-26-31-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0

```

0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-44-42-19-41-0
0-10-30-34-21-29-0
0-45-33-39-0
0-4-13-40-17-37-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 75 sg      Distancia recorrida ruta 7: 197.64 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 47 sg      Distancia recorrida ruta 9: 161.04 m
Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg     Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg     Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2043.05 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -5-//////////
0-46-12-47-0
0-27-1-20-0
0-6-48-8-26-31-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-23-7-43-24-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-44-42-19-41-0
0-4-13-40-17-37-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg      Distancia recorrida ruta 2: 186.16 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg      Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 56 sg      Distancia recorrida ruta 6: 161.58 m
Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg      Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg      Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 65 sg      Distancia recorrida ruta 9: 176.82 m
Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg     Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg     Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2037.36 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -6-//////////
0-46-12-47-0
0-27-1-20-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-44-42-19-41-0
0-4-13-40-17-37-0
0-32-11-38-5-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg      Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg      Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg      Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg      Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg      Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m

```

Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 65 sg Distancia recorrida ruta 9: 176.82 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 51 sg Distancia recorrida ruta 10: 178.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2033.38 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -7-//////////

0-46-12-47-0
 0-27-1-20-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-48-8-26-31-0
 0-15-45-33-39-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-17-42-19-40-44-37-0
 0-4-41-13-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 59 sg Distancia recorrida ruta 0: 113.24 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 188.22 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 59 sg Distancia recorrida ruta 10: 157.75 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2023.78 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -8-//////////

0-46-12-0
 0-27-1-20-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-2-16-50-9-49-0
 0-48-8-26-31-0
 0-15-45-33-39-0
 0-10-30-34-21-29-0
 0-17-40-19-42-44-37-0
 0-13-41-4-47-0
 0-32-11-38-5-0
 0-0
 0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 34 sg Distancia recorrida ruta 0: 68.37 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 185.43 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 67 sg Distancia recorrida ruta 11: 144.82 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 2013.65 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIËN -9-//////////

0-46-0

```

0-27-1-20-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-11-38-5-12-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 5 sg      Distancia recorrida ruta 0: 11.97 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg     Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg     Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg     Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
Tiempo de grabado ruta 7: 57 sg     Distancia recorrida ruta 7: 176.16 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg    Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 2001.25 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -10-//////////
0-0
0-27-1-20-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-48-8-26-31-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-11-38-5-12-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 50 sg     Distancia recorrida ruta 1: 144.39 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg     Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 58 sg     Distancia recorrida ruta 6: 159.12 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg    Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1996.85 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -11-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-2-16-50-9-49-0
0-1-20-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-11-38-5-12-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m

```

Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg	Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg	Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg	Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg	Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg	Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 35 sg	Distancia recorrida ruta 6: 119.72 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg	Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg	Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg	Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg	Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 96 sg	Distancia recorrida ruta 11: 191.46 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg	Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg	Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1995.47 m	

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -12-//////////

0-0

0-27-48-8-26-31-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-2-16-50-9-49-0

0-11-38-5-12-0

0-15-45-33-39-46-0

0-10-30-34-21-29-0

0-17-19-40-42-44-37-0

0-13-41-4-47-0

0-32-20-1-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg	Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg	Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg	Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg	Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg	Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 84 sg	Distancia recorrida ruta 5: 194.92 m
Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg	Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg	Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg	Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg	Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg	Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 47 sg	Distancia recorrida ruta 11: 137.75 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg	Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg	Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1991.13 m	

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -13-//////////

0-0

0-27-48-8-26-31-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-2-20-1-0

0-11-38-5-12-0

0-15-45-33-39-46-0

0-10-30-34-21-29-0

0-17-19-40-42-44-37-0

0-13-41-4-47-0

0-32-16-50-9-49-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg	Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg	Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg	Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg	Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg	Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 65 sg	Distancia recorrida ruta 5: 165.34 m
Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg	Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg	Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg	Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg	Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg	Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 66 sg	Distancia recorrida ruta 11: 163.22 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg	Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg	Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1987.02 m	

```

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -14-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-16-50-9-49-0
0-11-38-5-12-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-2-20-1-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg     Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 54 sg     Distancia recorrida ruta 5: 142.37 m
Tiempo de grabado ruta 6: 84 sg     Distancia recorrida ruta 6: 169.10 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 77 sg    Distancia recorrida ruta 11: 183.72 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1984.56 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -15-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-5-12-0
0-11-38-16-50-9-49-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0
0-32-2-20-1-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg      Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 73 sg     Distancia recorrida ruta 1: 182.42 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg     Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg     Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg     Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 50 sg     Distancia recorrida ruta 5: 106.42 m
Tiempo de grabado ruta 6: 88 sg     Distancia recorrida ruta 6: 199.32 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg     Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg     Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg     Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg    Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 77 sg    Distancia recorrida ruta 11: 183.72 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg     Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg     Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1978.82 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -0-//////////
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -16-//////////
0-0
0-27-48-8-26-31-1-0
0-6-23-7-43-24-0
0-18-25-14-0
0-22-28-3-36-35-0
0-5-12-0
0-11-38-16-50-9-49-0
0-15-45-33-39-46-0
0-10-30-34-21-29-0
0-17-19-40-42-44-37-0
0-13-41-4-47-0

```

0-32-20-2-0	
0-0	
0-0	
Tiempo de grabado ruta 0: 0 sg	Distancia recorrida ruta 0: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 1: 80 sg	Distancia recorrida ruta 1: 193.98 m
Tiempo de grabado ruta 2: 71 sg	Distancia recorrida ruta 2: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 3: 90 sg	Distancia recorrida ruta 3: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 4: 61 sg	Distancia recorrida ruta 4: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 5: 50 sg	Distancia recorrida ruta 5: 106.42 m
Tiempo de grabado ruta 6: 88 sg	Distancia recorrida ruta 6: 199.32 m
Tiempo de grabado ruta 7: 62 sg	Distancia recorrida ruta 7: 183.74 m
Tiempo de grabado ruta 8: 64 sg	Distancia recorrida ruta 8: 185.63 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg	Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg	Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg	Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg	Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg	Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1977.20 m	
A los 4.2630 segundos ocurre el Fin análisis SUB#0 Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.4223 y se selecciona la ruta 5 CuentaAtrfbs va por 145	
A los 5.8220 segundos ocurre el Fin análisis SUB#1 Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.3573 y se selecciona la ruta 5 CuentaAtrfbs va por 121	
//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -2-//////////	
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -13-//////////	
0-11-38-9-50-16-0	
0-46-12-15-45-33-0	
0-27-48-23-6-0	
0-5-49-30-39-10-0	
0-18-25-14-0	
0-2-29-21-34-0	
0-32-1-22-28-31-0	
0-8-26-7-43-24-0	
0-0	
0-17-19-40-42-44-37-0	
0-20-35-36-3-0	
0-13-41-4-47-0	
0-0	
0-0	
Tiempo de grabado ruta 0: 70 sg	Distancia recorrida ruta 0: 164.37 m
Tiempo de grabado ruta 1: 77 sg	Distancia recorrida ruta 1: 189.28 m
Tiempo de grabado ruta 2: 63 sg	Distancia recorrida ruta 2: 142.90 m
Tiempo de grabado ruta 3: 77 sg	Distancia recorrida ruta 3: 198.30 m
Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg	Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 5: 70 sg	Distancia recorrida ruta 5: 183.13 m
Tiempo de grabado ruta 6: 52 sg	Distancia recorrida ruta 6: 147.36 m
Tiempo de grabado ruta 7: 70 sg	Distancia recorrida ruta 7: 194.89 m
Tiempo de grabado ruta 8: 0 sg	Distancia recorrida ruta 8: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg	Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 10: 67 sg	Distancia recorrida ruta 10: 190.74 m
Tiempo de grabado ruta 11: 84 sg	Distancia recorrida ruta 11: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg	Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg	Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1974.49 m	
//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -2-//////////	
//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -14-//////////	
0-12-15-45-33-0	
0-46-11-38-9-50-16-0	
0-27-48-23-6-0	
0-5-49-30-39-10-0	
0-18-25-14-0	
0-2-29-21-34-0	
0-32-1-22-28-31-0	
0-8-26-7-43-24-0	
0-0	
0-17-19-40-42-44-37-0	
0-20-35-36-3-0	
0-13-41-4-47-0	
0-0	
0-0	
Tiempo de grabado ruta 0: 72 sg	Distancia recorrida ruta 0: 180.53 m
Tiempo de grabado ruta 1: 75 sg	Distancia recorrida ruta 1: 172.26 m
Tiempo de grabado ruta 2: 63 sg	Distancia recorrida ruta 2: 142.90 m
Tiempo de grabado ruta 3: 77 sg	Distancia recorrida ruta 3: 198.30 m
Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg	Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 5: 70 sg	Distancia recorrida ruta 5: 183.13 m
Tiempo de grabado ruta 6: 52 sg	Distancia recorrida ruta 6: 147.36 m

Tiempo de grabado ruta 7: 70 sg Distancia recorrida ruta 7: 194.89 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 0 sg Distancia recorrida ruta 8: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 57 sg Distancia recorrida ruta 9: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 67 sg Distancia recorrida ruta 10: 190.74 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 84 sg Distancia recorrida ruta 11: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1973.63 m

A los 7.5900 segundos ocurre el Fin análisis SUB#2 Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.5309 y se selecciona la ruta 6 |CuentaAtrBs va por 143 |

A los 8.9370 segundos ocurre el Fin análisis SUB#3 Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6177 y se selecciona la ruta 7 |CuentaAtrBs va por 119 |

A los 10.2670 segundos ocurre el Fin análisis SUB#4 Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6351 y se selecciona la ruta 8 |CuentaAtrBs va por 95 |

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -5-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -15-//////////

0-17-19-40-42-44-37-0

0-0

0-27-48-8-26-31-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-11-38-9-50-16-0

0-5-12-0

0-15-45-33-39-10-46-0

0-29-21-34-30-49-0

0-13-41-4-47-0

0-32-2-20-1-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 57 sg Distancia recorrida ruta 0: 182.78 m

Tiempo de grabado ruta 1: 0 sg Distancia recorrida ruta 1: 0.00 m

Tiempo de grabado ruta 2: 73 sg Distancia recorrida ruta 2: 182.42 m

Tiempo de grabado ruta 3: 71 sg Distancia recorrida ruta 3: 184.64 m

Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m

Tiempo de grabado ruta 5: 61 sg Distancia recorrida ruta 5: 189.42 m

Tiempo de grabado ruta 6: 70 sg Distancia recorrida ruta 6: 164.37 m

Tiempo de grabado ruta 7: 50 sg Distancia recorrida ruta 7: 106.42 m

Tiempo de grabado ruta 8: 67 sg Distancia recorrida ruta 8: 191.28 m

Tiempo de grabado ruta 9: 77 sg Distancia recorrida ruta 9: 199.28 m

Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m

Tiempo de grabado ruta 11: 77 sg Distancia recorrida ruta 11: 183.72 m

Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m

Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m

Distancia total recorrida: 1965.06 m

//////////MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -5-//////////

//////////MEJOR RESULTADO EN LA ITERACIÓN -16-//////////

0-17-19-40-42-44-37-0

0-0

0-27-48-8-26-31-1-0

0-6-23-7-43-24-0

0-18-25-14-0

0-22-28-3-36-35-0

0-11-38-9-50-16-0

0-5-12-0

0-15-45-33-39-10-46-0

0-29-21-34-30-49-0

0-13-41-4-47-0

0-32-20-2-0

0-0

0-0

Tiempo de grabado ruta 0: 57 sg Distancia recorrida ruta 0: 182.78 m

Tiempo de grabado ruta 1: 0 sg Distancia recorrida ruta 1: 0.00 m

Tiempo de grabado ruta 2: 80 sg Distancia recorrida ruta 2: 193.98 m

Tiempo de grabado ruta 3: 71 sg Distancia recorrida ruta 3: 184.64 m

Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m

Tiempo de grabado ruta 5: 61 sg Distancia recorrida ruta 5: 189.42 m

Tiempo de grabado ruta 6: 70 sg Distancia recorrida ruta 6: 164.37 m

Tiempo de grabado ruta 7: 50 sg Distancia recorrida ruta 7: 106.42 m

Tiempo de grabado ruta 8: 67 sg Distancia recorrida ruta 8: 191.28 m

Tiempo de grabado ruta 9: 77 sg Distancia recorrida ruta 9: 199.28 m

Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m

Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m

Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m

Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m

Distancia total recorrida: 1963.44 m

\\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -5-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 \\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN LA ITERACI3N -17-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 0-17-19-40-42-44-37-0
 0-0
 0-27-48-8-26-31-1-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-46-38-9-50-16-11-0
 0-5-12-0
 0-15-45-33-39-10-0
 0-29-21-34-30-49-0
 0-13-41-4-47-0
 0-32-20-2-0
 0-0
 0-0
 Tiempo de grabado ruta 0: 57 sg Distancia recorrida ruta 0: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 0 sg Distancia recorrida ruta 1: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 80 sg Distancia recorrida ruta 2: 193.98 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 71 sg Distancia recorrida ruta 3: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 61 sg Distancia recorrida ruta 5: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 75 sg Distancia recorrida ruta 6: 168.97 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 50 sg Distancia recorrida ruta 7: 106.42 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 62 sg Distancia recorrida ruta 8: 183.69 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 77 sg Distancia recorrida ruta 9: 199.28 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1960.46 m

\\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -5-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 \\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN LA ITERACI3N -18-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 0-17-19-40-42-44-37-0
 0-0
 0-27-48-8-26-31-1-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-46-12-0
 0-5-38-9-50-16-11-0
 0-15-45-33-39-10-0
 0-29-21-34-30-49-0
 0-13-41-4-47-0
 0-32-20-2-0
 0-0
 0-0
 Tiempo de grabado ruta 0: 57 sg Distancia recorrida ruta 0: 182.78 m
 Tiempo de grabado ruta 1: 0 sg Distancia recorrida ruta 1: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 2: 80 sg Distancia recorrida ruta 2: 193.98 m
 Tiempo de grabado ruta 3: 71 sg Distancia recorrida ruta 3: 184.64 m
 Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
 Tiempo de grabado ruta 5: 61 sg Distancia recorrida ruta 5: 189.42 m
 Tiempo de grabado ruta 6: 34 sg Distancia recorrida ruta 6: 68.37 m
 Tiempo de grabado ruta 7: 91 sg Distancia recorrida ruta 7: 198.35 m
 Tiempo de grabado ruta 8: 62 sg Distancia recorrida ruta 8: 183.69 m
 Tiempo de grabado ruta 9: 77 sg Distancia recorrida ruta 9: 199.28 m
 Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
 Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m
 Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
 Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
 Distancia total recorrida: 1951.78 m

\\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN EL SUBPROBLEMA -5-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 \\\\\\\\\\\\\\\\\MEJOR RESULTADO EN LA ITERACI3N -19-\\\\\\\\\\\\\\\\\\
 0-17-19-40-42-44-37-0
 0-0
 0-27-48-8-26-31-1-0
 0-6-23-7-43-24-0
 0-18-25-14-0
 0-22-28-3-36-35-0
 0-15-45-33-39-10-46-0
 0-5-38-9-50-16-11-0
 0-12-0
 0-29-21-34-30-49-0
 0-13-41-4-47-0

```

0-32-20-2-0
0-0
0-0
Tiempo de grabado ruta 0: 57 sg      Distancia recorrida ruta 0: 182.78 m
Tiempo de grabado ruta 1: 0 sg      Distancia recorrida ruta 1: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 2: 80 sg      Distancia recorrida ruta 2: 193.98 m
Tiempo de grabado ruta 3: 71 sg      Distancia recorrida ruta 3: 184.64 m
Tiempo de grabado ruta 4: 90 sg      Distancia recorrida ruta 4: 185.46 m
Tiempo de grabado ruta 5: 61 sg      Distancia recorrida ruta 5: 189.42 m
Tiempo de grabado ruta 6: 67 sg      Distancia recorrida ruta 6: 191.28 m
Tiempo de grabado ruta 7: 91 sg      Distancia recorrida ruta 7: 198.35 m
Tiempo de grabado ruta 8: 29 sg      Distancia recorrida ruta 8: 59.62 m
Tiempo de grabado ruta 9: 77 sg      Distancia recorrida ruta 9: 199.28 m
Tiempo de grabado ruta 10: 84 sg     Distancia recorrida ruta 10: 195.29 m
Tiempo de grabado ruta 11: 70 sg     Distancia recorrida ruta 11: 170.54 m
Tiempo de grabado ruta 12: 0 sg      Distancia recorrida ruta 12: 0.00 m
Tiempo de grabado ruta 13: 0 sg      Distancia recorrida ruta 13: 0.00 m
Distancia total recorrida: 1950.63 m

A los 12.0870 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#5 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.2397 y se selecciona la ruta 8 |CuentaAtrfbs va por 148 |
A los 13.5300 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#6 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.5665 y se selecciona la ruta 0 |CuentaAtrfbs va por 124 |
A los 14.9880 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#7 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6272 y se selecciona la ruta 10 |CuentaAtrfbs va por 100 |
A los 16.4160 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#8 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6642 y se selecciona la ruta 11 |CuentaAtrfbs va por 76 |
A los 17.9260 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#9 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6531 y se selecciona la ruta 7 |CuentaAtrfbs va por 52 |
A los 19.3910 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#10 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6641 y se selecciona la ruta 9 |CuentaAtrfbs va por 28 |
A los 20.9730 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#11 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6674 y se selecciona la ruta 10 |CuentaAtrfbs va por 4 |
A los 22.5070 segundos ocurre el Fin anflisis SUB#12 .... Identifico un M=MINO WEIGHT= 0.6835 y se selecciona la ruta 3 |CuentaAtrfbs va por -20 |
Presione una tecla para continuar . . .
    
```

Figura 0.1 Log completo resultante de abordar el algoritmo GTS en la aplicación C++ al escenario ilustrativo de 51 nodos.

REFERENCIAS

- [1] G. Dantzig y J. Ramser, «The truck dispatching problem,» *Management Science*, n° 6, pp. 80-91, 1959.
- [2] P. Toth y D. Vigo, «The Vehicle Routing Problem,» *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 2002.
- [3] A. Mor y M. G. Speranza, «Vehicle routing problems over time: a survey,» Brescia, 2018.
- [4] B. Fleischmann, «The vehicle routing problem with multiple use of vehicles,» Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Hamburg, 1990.
- [5] D. Cattaruzza, N. Absi y D. Feillet, «Vehicle routing problems with multiple trips,» *4OR*, vol. 14, n° 3, pp. 223-259, 2016.
- [6] D. Cattaruzza, N. Absi y D. Feillet, «Vehicle routing problems with multiple trips,» *Annals of Operations Research*, n° 271, pp. 127-159, 2018.
- [7] I. Kara, «Arc Based Integer Programming Formulations for the Distance Constrained Vehicle Routing Problem,» de *International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, Budapest, Hungary, 2011.
- [8] K. Sundar, S. Venkatachalam y S. Rathinam, «Formulations and algorithms for the multiple depot, fuel-constrained, multiple vehicle routing problem,» de *American Control Conference*, Boston, MA, USA, 2016.
- [9] J. R. Montoya-Torres, J. López Franco, S. Nieto Isaza y H. Felizzola Jiménez, «A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots,» *Computers & Industrial Engineering*, n° 79, pp. 115-129, 2015.
- [10] J. Molina, A. D. López-Sánchez, A. G. Hernández-Díaz y I. Martínez-Salazar, «A Multi-start Algorithm with Intelligent Neighborhood Selection for solving multi-objective humanitarian vehicle routing problems,» *J Heuristics*, n° 24, pp. 111-133, 2018.
- [11] D. Chauhan, A. Unnikrishnan y M. Figliozzi, «Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones,» *Transportation Research Part C*, n° 99, pp. 1-18, 2018.
- [12] Y. Choi, Y. Choi, S. Briceno y D. N. Mavris, «Coverage Path Planning for a UAS Imagery Mission using Column Generation with a Turn Penalty,» de *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Dallas, TX, USA, 2018.
- [13] K. Dorling, J. Heinrichs, G. G. Messier y S. Magierowski, «Vehicle Routing Problems for Drone Delivery,» *Transactions on Systems Man. and Cybernetics Systems*, vol. 47, n° 1, 2017.

- [14] A. Troudi, S.-A. Addouche, S. Dellagi y A. El Mhamedi, «Sizing of the Drone Delivery Fleet Considering Energy Autonomy,» *Sustainability*, vol. 10, n° 3344, 2018.
- [15] S. Poikonen, «Multi-visit Drone Routing Problem,» Energy constraints, Denver, 2018.
- [16] C. C. Murray y R. Raj, «The Multiple Flying Sidekicks Traveling Salesman Problem: Parcel Delivery with Multiple Drones,» Buffalo, New York, USA, 2019.
- [17] I. Karaoglan, «A branch-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with multiple use of vehicles,» *Lean Thinking*, vol. 6, n° 1, 2015.
- [18] J.-F. Cordeau, G. Laporte y A. Mercier, «A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows,» *J Opl Res Soc*, vol. 52, n° 8, pp. 928-936, 2001.
- [19] L. Moccia, J.-F. Cordeau y G. Laporte, «An incremental tabu search heuristic for the generalized vehicle routing problem with time windows,» *Journal of the Operational Research Society*, n° 63, pp. 232-244, 2012.
- [20] M. Gendreau y J. Y. Potvin, *Handbook of metaheuristics*, Boston, US: MA: Springer, 2010.
- [21] Y. Suzuki y J. D. Cortes, «A tabu search with gradual evolution process,» *Computer & Industrial Engineering*, n° 100, pp. 52-67, 2016.
- [22] «Dji Global,» [En línea]. Available: www.dji.com. [Último acceso: 24 Noviembre 2019].
- [23] «CVRPLIB,» [En línea]. Available: <http://vrp.galgos.inf.puc-rio.br>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [24] N. Bosen, S. Schwerdfeger y F. Weidinger, «Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots,» *European Journal of Operational Research*, n° 271, pp. 1085-1099, 2018.
- [25] J. Sander, R. Rodenbeck, F. Reinert, W. Muller y K. Berude, «Sensor Operation Deployment with Multiple Routes per Asset,» de *International Conference on Information Fusion*, Karlsruhe, Germany, 2018.