

**MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS**

**OSCAR MAURICIO MORALES SILVA**

**UNIVERSIDAD EAN  
POSGRADOS  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA LOGÍSTICA  
BOGOTÁ  
2.012**

**MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS**

**OSCAR MAURICIO MORALES SILVA**

**Trabajo de grado**

**Director  
Luis Carlos Sánchez**

**UNIVERSIDAD EAN  
POSGRADOS  
DISEÑO Y GESTIÓN DE SISTEMAS LOGÍSTICOS  
BOGOTÁ  
2.011**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bogotá XX de XXXX de 2.011**

## CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	11
INTRODUCCIÓN	13
1. VRP (VEHICLE ROUTING PROBLEM)	14
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
2.1 CONSIDERACIONES GENERALES	16
2.2 HEURÍSTICA DEL VECINO MÁS CERCANO	17
2.3 HEURÍSTICA DEL MAYOR ANGULO O MÉTODO DE BARRIDO	18
2.4 HEURÍSTICA INSERCIÓN	20
2.5 HEURÍSTICA K OPT O MÉTODO DE AHORRO	20
2.6 RUTA PERFECTA	21
3. DISEÑO DE HEURÍSTICAS	25
3.1 VECINO MÁS CERCANO	25
3.2 VECINO MÁS CERCANO CON INSERCIÓN	25
3.3 VECINO MÁS CERCANO CON 4 OPT	26
3.4 VECINO CERCANO CON INTERSECCIÓN Y 4-OPT	27
3.5 ANGULO MÁXIMO VECINO CERCANO	28
3.6 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN	28
3.7 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON 4 OPT	29
3.8 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN Y 4 OPT	30
3.9 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO	31
3.10 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN	32
3.11 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON 4 OPT	33
3.12 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN Y 4 OPT	33
3.13 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO	35
3.14 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN	35
3.15 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON 4 OPT	36
3.16 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN Y 4 OPT	37
3.17 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO	38
3.18 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN	38
3.19 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON 4 OPT	39
3.20 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN Y 4 OPT	40
3.21 LEJANO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN	41

3.22 LEJANO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN Y 4OPT	42
3.23 LEJANO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN	43
3.24 LEJANO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN Y 4OPT	44
3.25 LEJANO DOBLE ÁNGULO CON INSERCIÓN	45
3.26 LEJANO DOBLE ÁNGULO CON INSERCIÓN Y 4OPT	46
3.27 PRUEBAS A LAS HEURÍSTICAS	47
4. ALGORITMO RUTEADOR	51
4.1 INFORMACIÓN DE LOS DESTINATARIOS	51
4.2 HORARIOS Y DESPLAZAMIENTO:	51
4.3 VEHÍCULOS:	52
4.4 ALGORITMO DE SELECCIÓN DEL VEHÍCULO	52
4.5 BLOQUEO DE NODOS NO RUTEABLES	53
4.6 SELECCIÓN DE DESTINOS A RUTEAR POR CAMIÓN	54
4.7 GENERAR RUTA DE LOS DESTINOS SELECCIONADOS	58
4.8 ALGORITMO GENERAL	80
5. INFORMES GENERADOS	82
5.1 INFORME DE RUTAS GENERADAS	82
5.2 INFORME DE NODOS NO RUTEADOS	83
5.3 INFORME DE CAMIONES NO RUTEADOS	84
5.4 INFORME GRAFICO RUTAS	84
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Tiempo de iteración ruta perfecta .....	23
Tabla 2. Tiempo de iteración calculado ruta perfecta .....	23
Tabla 3 Efectividad de Heurísticas .....	47
Tabla 4 Número de heurísticas con la ruta corta.....	49
Tabla 5. Vehículos                      Tabla 6. Selección n de vehículos .....	52
Tabla 7. Parámetros de inicio bloqueo de nodos .....	53
Tabla 8. Nodos bloqueados.....	53
Tabla 9. Red de distribución Algoritmo selección de destinos a rutear por camión .....	55
Tabla 10. Selección del nodo de mayor ángulo. ....	55
Tabla 11. Nodos de la zona del nodo de mayor ángulo.....	56
Tabla 12. Verificación de cruce de ventanas. ....	56
Tabla 13. Verificación de ocupación. ....	56
Tabla 14. Selección de nodos de otras zonas. ....	57
Tabla 15. Verificación de cruce de ventanas. ....	57
Tabla 16. Verificación de la ocupación del vehículo. ....	57
Tabla 17. Nodos seleccionados selección de destinos a rutear por camión .....	58
Tabla 18. Parametros ejemplo algoritmo Generar Ruta De Los Destinos Seleccionados. ....	59
Tabla 19. Red de nodos de distribución ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	59
Tabla 20. Nodos bloqueados ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	60
Tabla 21. Nodos para generar rutas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	60
Tabla 22 Nodos para generar la primera ruta priemera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	61
Tabla 23 Nodo menor ventana primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	61
Tabla 24 Nodos para rutear primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	61
Tabla 25 Ruta original primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados. ....	62
Tabla 26 Ruta ajustada primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados. ....	63
Tabla 27 Nodos para generar la primera ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	64
Tabla 28 Nodo menor ventana segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	64
Tabla 29 Nodos para rutear segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	65
Tabla 30 Ruta original segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados. ....	65
Tabla 31 Ruta ajustada segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados. ....	66
Tabla 32 Nodos para generar la primera ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	67

Tabla 33	Nodo menor ventana tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	67
Tabla 34	Nodos para rutear tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	67
Tabla 35	Ruta original tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	68
Tabla 36	Ruta ajustada tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	68
Tabla 37	Nodos para generar la primera ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	68
Tabla 38	Nodos para rutear cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	69
Tabla 39	Ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	69
Tabla 40	Adición de rutas primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	70
Tabla 41	Adición de rutas segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	71
Tabla 42	Adición de rutas tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	72
Tabla 43	Adición de rutas cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	73
Tabla 44	Ajuste de ruta primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	74
Tabla 45	Ajuste de ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	75
Tabla 46	Ajuste de ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	76
Tabla 47	Ajuste de ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	77
Tabla 48	Ajuste de ruta quinta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	78
Tabla 49	Ajuste de ruta sexta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	79
Tabla 50	Rutas formadas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.....	81
Tabla 51.	Informe de rutas generadas .....	83
Tabla 52.	Informe de nodos no ruteados.....	83
Tabla 53.	Informe de Vehículos no ruteados.....	84
Tabla 54.	Informe gráfico rutas, ruta No 1.....	84
Tabla 55.	Informe gráfico rutas, ruta No 2.....	85
Tabla 56.	Informe gráfico rutas, ruta No 3.....	86
Tabla 57.	Informe gráfico rutas, ruta No 4.....	86
Tabla 58.	Informe gráfico rutas, ruta No 5.....	87

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Algoritmo ruta perfecta	22
Figura 2 Heurística Vecino más cercano	25
Figura 3 Heurística Vecino más cercano con inserción	26
Figura 4. Heurística vecino más cercano con 4 opt	27
Figura 5 Heurística vecino cercano con intersección y 4 opt	28
Figura 6. Heurística ángulo máximo vecino cercano	28
Figura 7. Heurística ángulo máximo vecino cercano con inserción	29
Figura 8. Heurística ángulo máximo vecino cercano con 4 opt	30
Figura 9. Heurística ángulo máximo vecino cercano con inserción y 4 opt	31
Figura 10. Heurística ángulo mínimo vecino cercano	32
Figura 11. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con inserción	32
Figura 12. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con 4 opt	33
Figura 13. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con inserción y 4 opt	34
Figura 14. Heurística ángulo máximo ángulo máximo	35
Figura 15. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con intersección	36
Figura 16. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con 4 opt	37
Figura 17. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con inserción y 4 opt	38
Figura 18. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo	38
Figura 19. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con inserción	39
Figura 20. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con 4 opt	40
Figura 21. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con inserción y 4 opt	41
Figura 22. Heurística lejano ángulo máximo con inserción	42
Figura 23. Heurística lejano ángulo máximo con inserción y 4opt	43
Figura 24. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción	44
Figura 25. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción y 4opt	45
Figura 26. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción	46
Figura 27. Heurística lejano doble ángulo con inserción y 4opt	47
Figura 28. Red de distribución Algoritmo selección de destinos a rutear por camión	55
Figura 29. Ruta original primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados	63
Figura 30. Ruta ajustada primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	64
Figura 31. Ruta original segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	66
Figura 32. Ruta ajustada segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	66
Figura 33. Ruta ajustada tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	68
Figura 34. Ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	70
Figura 35. Adición de rutas primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	71

Figura 36. Adición de rutas segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	72
Figura 37. Adición de rutas tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	73
Figura 38. Adición de rutas cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	74
Figura 39. Ajuste de ruta primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	75
Figura 40. Ajuste de ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	76
Figura 41. Ajuste de ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	77
Figura 42. Ajuste de ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	78
Figura 43. Ajuste de ruta quinta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	79
Figura 44. Ajuste de ruta sexta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	80
Figura 45. Rutas formadas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.	81
Figura 46. Informe gráfico rutas, ruta No 1.	85
Figura 47. Informe gráfico rutas, ruta No 2.	85
Figura 48. Informe gráfico rutas, ruta No 3.	86
Figura 49. Informe gráfico rutas, ruta No 4.	87
Figura 50. Informe gráfico rutas, ruta No 5.	87

## GLOSARIO

**HEURÍSTICA** manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.

**PEDIDOS TIPO PAQUETEO** son aquellos envíos de hasta 1.000 kg.

**PEDIDOS TIPO SEMIMASIVO** son aquellos envíos entre 1.000 kg a 3.000 kg.

**VENTANA HORARIA DE ENTREGA** Periodo de tiempo en el cual determinado pedido debe ser entregado en un destino específico.

**VRP** problemas de rutas de vehículos (Vehicle Routing Problem)

## RESUMEN

El presente trabajo ofrece un modelo de ruteo que busca optimizar las entregas urbanas de pedidos tipo paqueteo y semimasivo teniendo en cuenta el tamaño de flota y las características de peso y volumen de cada uno de los vehículos disponibles, y las ventanas horarias de cada uno de los puntos de entrega.

Además de plantear una algoritmo para hallar la ruta con menor tiempo para redes de 10 nodos o menos; para poder procesar redes mayores, se propone emplear heurísticas basadas en los modelos de vecino cercano, ángulo mayor, intersección y opt, y sus combinaciones sumando en total 27 heurísticas, que incluidas en un algoritmo principal generan rutas para una red de distribución.

Con el fin de poner a prueba el algoritmo; este fue programado en visual basic para Excel, lo cual simplificar el registro de información por parte del usuario y la generación de los reportes requeridos para dar a conocer las rutas programadas.

## INTRODUCCIÓN

Los costos de transportación tienen gran peso en los costos logísticos de un producto, por lo cual se debe realizar un permanente seguimiento y análisis de estos. Una forma de disminuirlos es optimizar el proceso de distribución, para lo cual se requiere contar con un modelo de ruteo urbano que maximice el número de entregas realizadas por vehículo y disminuya los costos en una operación de distribución.

Actualmente existen diferentes software de ruteo de vehículos los cuales requieren de una inversión financiera consistente, ya que no solo es necesario la compra de mismo, sino la designación de recurso humano para su continua parametrización y actualización; además de la disponibilidad de equipos de cómputo que soporten la operación de estos modelos.

Dada la falta de aprovechamiento de los diferentes modelos de ruteo de vehículos, debido a su complejidad en su parametrización y sus costos ocultos, se hace necesario explorar la simplificación de las metodologías de ruteo mediante el uso de heurísticas, con el fin de lograr un modelo que además de tener en cuenta la ubicación de los destinatarios, sus ventanas horarias y las capacidades de carga y volumen de los vehículos a utilizar, incluya una implementación ágil y sencilla de dichos modelos a bajos costos.

El modelo está basado en el uso de coordenadas cartesianas para la ubicación de cada uno de los nodos de una red de distribución específica y supone un tiempo de desplazamiento constante por unidad de longitud en toda el área correspondiente a la red de distribución y durante todo el periodo de tiempo disponible para el respectivo proceso.

## 1. VRP (VEHICLE ROUTING PROBLEM)

Dentro de la denominación de problemas de rutas de vehículos (Vehicle Routing Problem - VRP) está una extensa variedad de problemas con diferente grado de complejidad, que incluso hoy en día siguen siendo materia de estudio e investigación.

El problema de ruteo básico busca determinar las rutas que deberán seguir cada uno de los vehículos pertenecientes a una flota, con el fin de alcanzar cada uno de los puntos requeridos en una red de distribución, de manera que el tiempo empleado por el conjunto de vehículos sea el menor.

*“Los problemas de ruteo son de los más importantes y más estudiados dentro de los problemas de optimización combinatoria. Dantzig y Ramser fueron los primeros en introducir este tipo de problemas en 1959, cuando describieron una aplicación real concerniente a la distribución de gasolina para estaciones de servicio, proponiendo una formulación matemática del problema, y una aproximación algorítmica. Posteriormente, Clarke y Wright aportaron una propuesta de algoritmo voraz (greedy algorithm) que mejoraba la aproximación algorítmica de Dantzig y Ramser. A partir de estos dos trabajos iniciales, ha surgido toda una fértil línea de investigación y desarrollo que ha crecido mucho en los últimos años. En la actualidad hay incluso soluciones informáticas en el mercado para este tipo de problemas. Este gran interés en este tipo de problemas se deriva por un lado en el sentido práctico de su aplicación en problemas reales, y por otro lado en la gran complejidad de este tipo de problemas.”<sup>1</sup>*

Para la mayoría de los problemas VRP, el número de posibles soluciones crece exponencialmente con el número de nodos de la red, sobrepasando rápidamente las capacidades de cálculo de los equipos de cómputo, siendo los problemas de mayor complejidad resueltos de manera óptima en algunos casos particulares, dada su gran complejidad numérica.

Su aplicación es visible y de gran importancia para la resolución de problemas reales en la Dirección de Operaciones y Logística. Por ejemplo: problemas de preparación de pedidos en un almacén, de rutas de vehículos, ruteo de transporte urbano, ruteo de recolección de residuos, aprovisionamiento, reparto o distribución de mercancías, sistemas de navegación GPS, programación de movimientos de robots, etc.

Existen muchas variaciones al problema básico de ruteo dependiendo el objetivo buscado: minimizar el número total de vehículos necesarios para proveer todos los puntos de la red, minimizar los costos fijos asociados con el uso de los vehículos, minimizar el costo total del transporte, balancear las rutas por tiempo de viaje o carga de vehículo, minimizar las multas asociadas a los niveles de servicios requeridos por los Clientes – Destinatarios.

---

<sup>1</sup> [http://arodrigu.webs.upv.es/grafos/doku.php?id=problema\\_cvrp](http://arodrigu.webs.upv.es/grafos/doku.php?id=problema_cvrp)

Dentro del conjunto de variaciones de los VRP, encontramos el **(VRPTW) VRP con ventanas de tiempo**, el cual es objeto de estudio en el presente trabajo.

Este modelo está asociado a una restricción que es una ventana de tiempo o **ventana horaria de entrega**, la cual se define como un periodo de tiempo en el cual determinado pedido debe ser entregado en un destino específico.

**Objetivo:** El objetivo es reducir al mínimo la flota de vehículos y la suma del tiempo de viaje y tiempo de espera necesario para alimentar a todos los clientes en las horas requeridas.

**Viabilidad:** El VRPTW es, con respecto a la VRP, se caracteriza por las siguientes restricciones adicionales: Una solución se vuelve inviable si un cliente se suministra en un horario diferente a su ventana de tiempo.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El reparto de mercancías urbano se debe programar para diferentes puntos geográficos, optimizando las rutas en el tiempo y la longitud de las mismas; empleando la menor cantidad de vehículos, procurando que la capacidad en volumen y/o peso de cada uno de los camiones utilizados sea eficientemente empleada.

Una red de distribución está compuesta por un centro de distribución (nodo coincidente de origen y destino) y varios puntos de entrega o nodos de entrega a los cuales se debe transportar los diferentes pedidos a entregar. En muchos casos un nodo de entrega puede tener una ventana horaria de entrega lo cual significa que un vehículo utilizado en la distribución debe arribar con el pedido en dicho periodo con el fin de realizar la entrega correspondiente.

Todos los vehículos ruteados deben partir del nodo inicial, recorrer una serie de nodos de entrega asignados por el algoritmo y finalizar la ruta regresando al nodo inicial; antes de que se concluya el tiempo máximo de ingreso de los vehículos al Centro de distribución.

La información requerida para la planeación de las rutas es:

- ✓ Coordenadas geográficas de cada uno de los nodos.
- ✓ Ventanas horarias de los nodos de entrega.
- ✓ Peso y volumen de los pedidos a entregar por nodo de entrega.
- ✓ Capacidad de cada uno de los vehículos expresada en peso y volumen.
- ✓ La hora de inicio de las rutas y la hora máxima de arribo al Centro de distribución.
- ✓ Un tiempo promedio de desplazamiento por unidad de longitud de ruta en el área de la red de distribución.

Resumiendo el propósito del modelo es generar una serie de rutas con las cuales se asegure la entrega de mercancía, con el menor número de vehículos respetando las ventanas horarias y optimizando el empleo de la flota de vehículos disponibles.

### 2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Este problema es una evolución del problema del agente viajero con mismo nodo origen destino, adicionando las limitantes de peso y volumen de cada uno de los camiones, el cumplimiento de ventanas horarias la hora de inicio de las ruta y el tiempo máximo de arribo al Centro de Distribución.

Debido a la complejidad del cálculo matemático de una solución ideal se propone su solución con heurísticas, como lo son la del vecino más cercano, mayor ángulo, inserción de nodos, k-opt entre otras, que aseguran procesos rápidos, simples, flexibles y con una precisión aceptable.

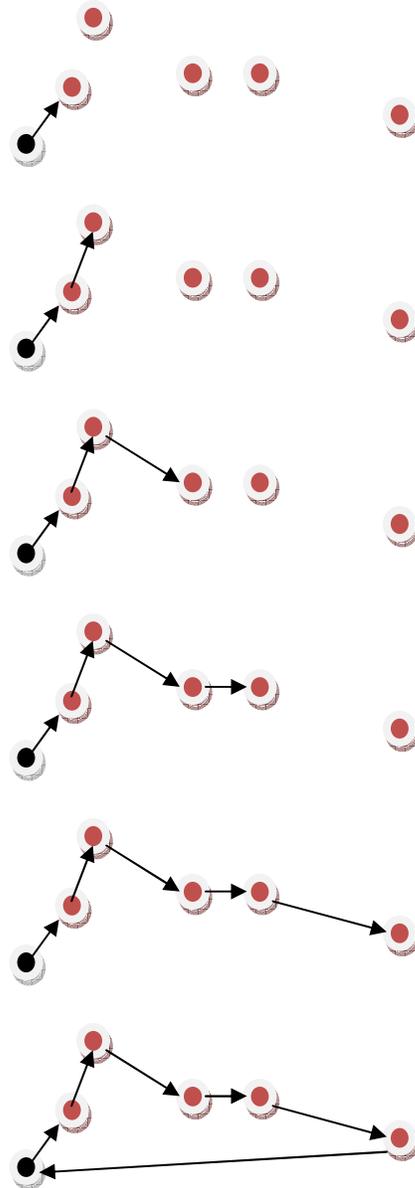
El diseño de las rutas generadas por estas heurísticas, debe propender por que el lazo que forma la ruta no presente cruces y la forma de la misma sea en forma de gota. Además los nodos de

entrega deben ser geográficamente cercanos con el fin de optimizar el tiempo de tránsito de la misma.

## 2.2 HEURÍSTICA DEL VECINO MÁS CERCANO

Es considerado el método más sencillo y directo, esta heurística toma el nodo más cercano (distancia, costos) al último nodo de la ruta que o se halla ruteado y lo suma al final de la ruta, sucesivamente hasta terminar los nodos de la red.

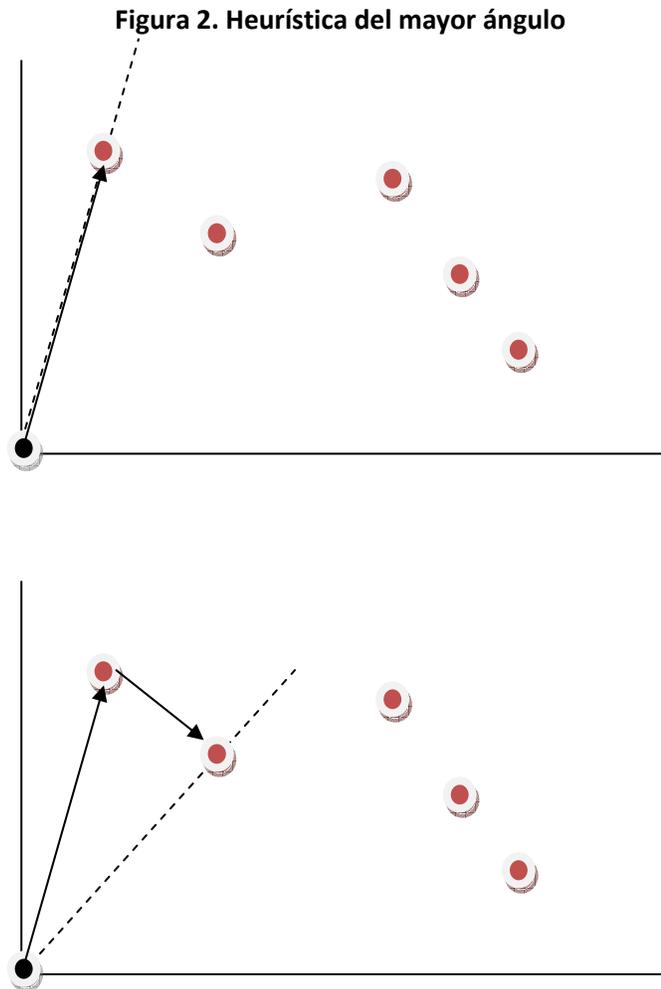
Figura 1. Heurística vecino cercano

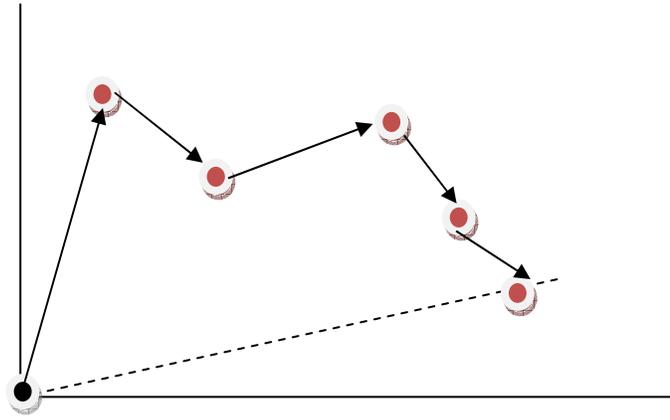
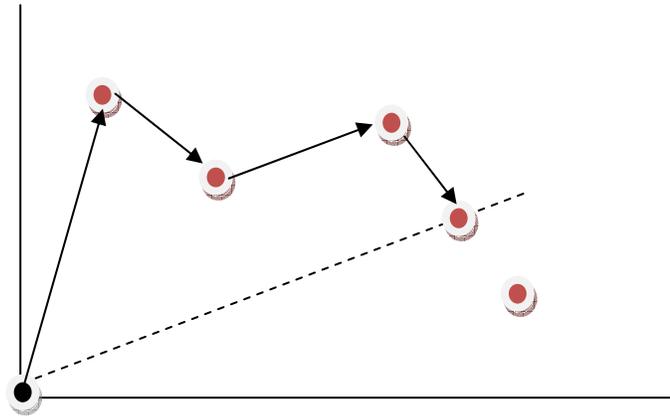
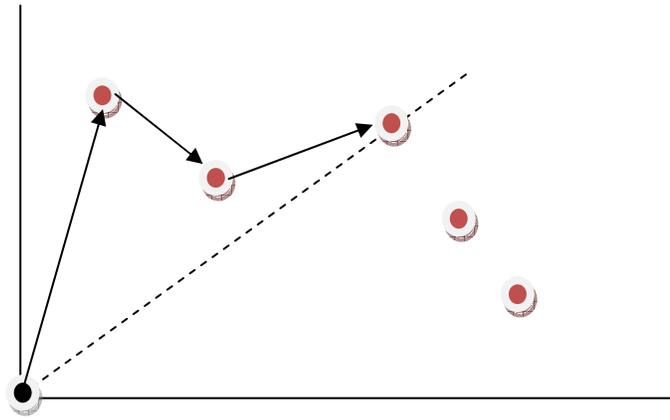


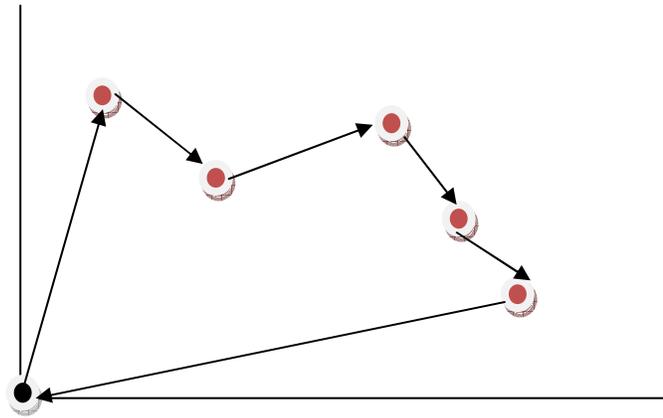
### 2.3 HEURÍSTICA DEL MAYOR ANGULO O MÉTODO DE BARRIDO

Este método es lo suficientemente sencillo como para realizar el diseño en forma manual, en un plano cartesiano se ubican todos los nodos destino de la red y el nodo origen, se traza una línea recta hasta el punto de mayor ángulo respecto a la horizontal teniendo como vértice el nodo origen.

Se hace girar la línea en sentido de las manecillas del reloj adicionando los nodos en la ruta.



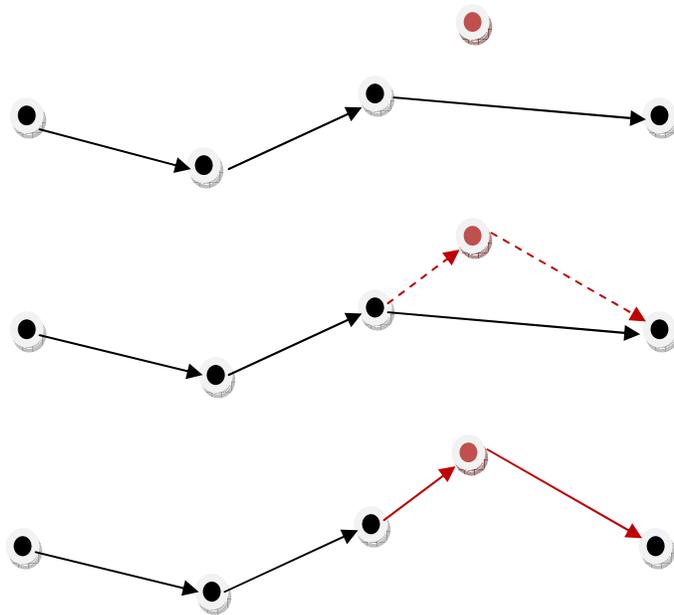




## 2.4 HEURÍSTICA INSERCIÓN

A partir de una ruta ya definida se crea una nueva ruta por medio de la inserción de un nuevo nodo, entre el arco más cercano a este nuevo nodo, manteniendo la continuidad del recorrido.

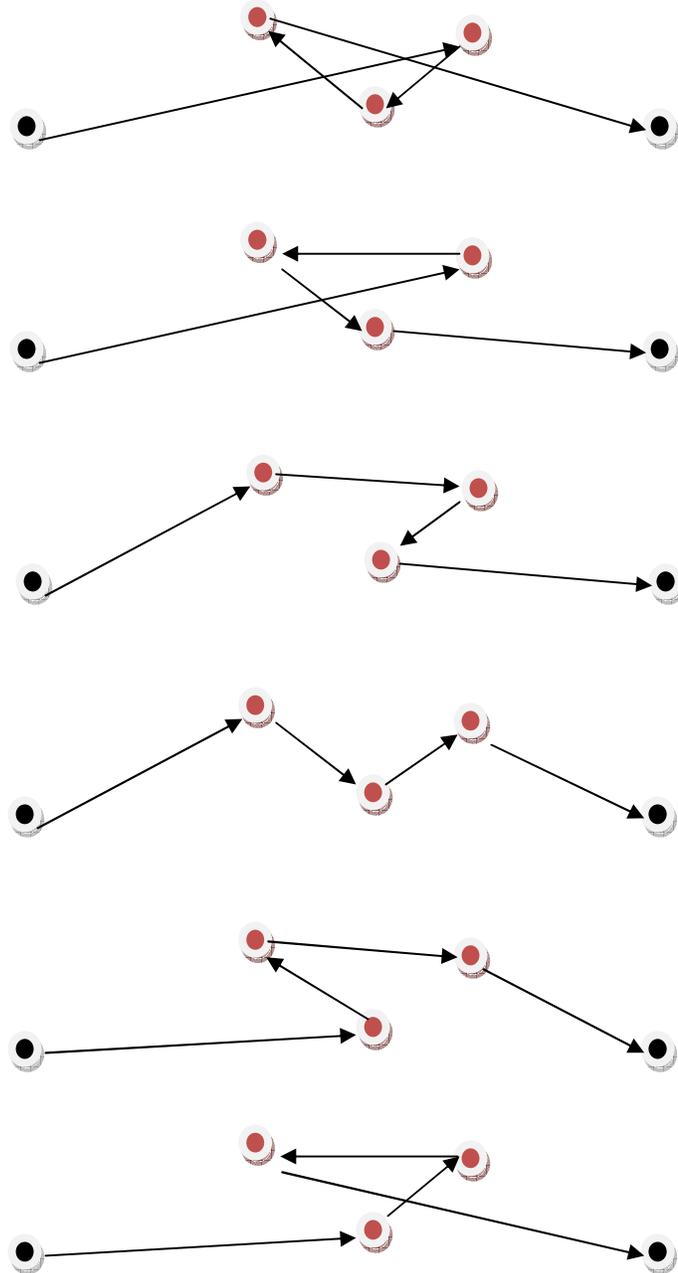
Figura 3. Heurística de Inserción



## 2.5 HEURÍSTICA K OPT O MÉTODO DE AHORRO

Para explicar este método se explicará la heurística 4-opt (4 arcos), la cual selecciona los 3 nodos internos de la ruta y realiza las 6 posibles transformaciones modificando el orden en la ruta de dichos nodos, seleccionando finalmente el lazo más corto. Esta heurística asegura el no cruce entre los segmentos iterados.

Figura 4. Heurística de 4-opt



## 2.6 RUTA PERFECTA

Una forma de encontrar la ruta más corta de una red de nodos, es la iteración de estos hasta encontrar el lazo más corto a modo de las heurísticas k-opt. A continuación se propone el algoritmo para hallar dicha ruta de una red de n nodos:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial  $r_0$  y ubicarlo en la posición del lazo  $p_0$ .

Paso: 2. Forme un lazo iterando los diferentes nodos en las diferentes posiciones del lazo:

$$p(0)=r_0$$

$$p(1)= r_i; 0 < i \leq n$$

$$p(2)= r_j; 0 < j \leq n \text{ y } j < i$$

$$p(r)= r_k; 0 < k \leq n \text{ y } k < i, k < j$$

Paso: 3. Seleccionar el nodo inicial  $r_0$  y ubicarlo en la posición del lazo  $p_{n+1}$

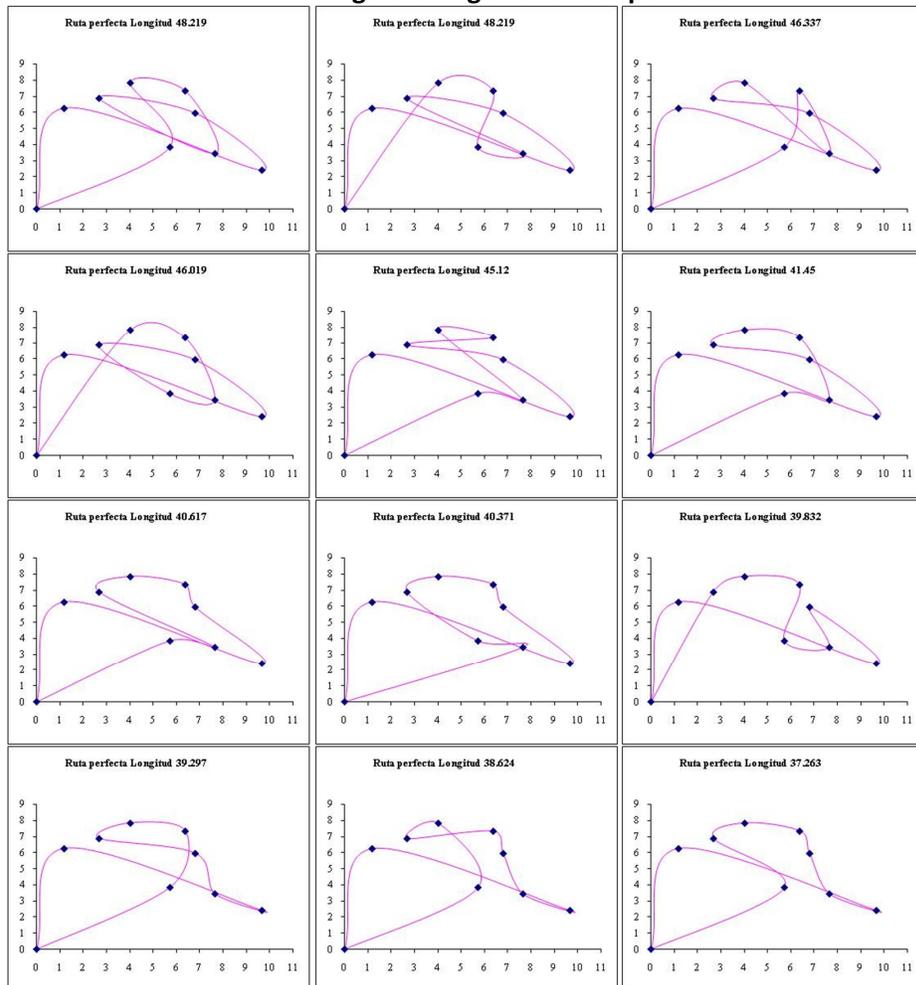
Paso: 4. Para cada combinación verificar la magnitud del lazo.

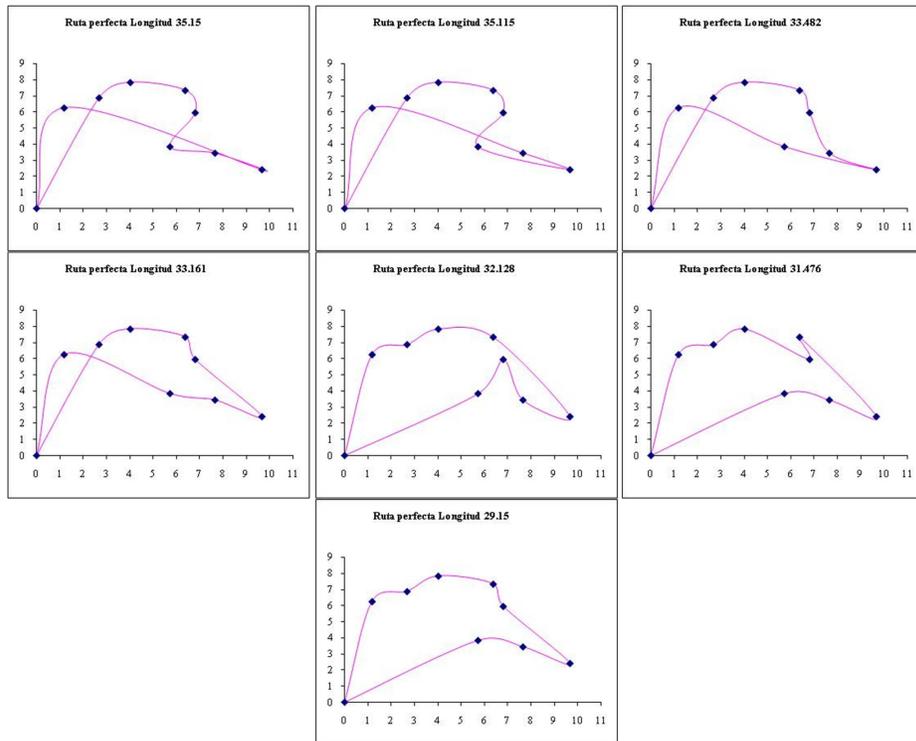
Paso: 5. Si la longitud del lazo es menor que la longitud mínima hallada, guarde este lazo como la ruta mínima.

Paso: 6. Repita el Paso 2 variando la posición de cada uno de los nodos.

En la siguiente figura se muestra las rutas generadas por el algoritmo a medida que se encuentra una ruta que disminuye la longitud del lazo iterado.

**Figura 5. Algoritmo ruta perfecta**





Dependiendo del número de número de nodos de la red puede llegar a ser muy demorado ya que la cantidad de combinaciones entre los nodos crece factorialmente,  $n!$ , donde  $n$  es el número de nodos de la red.

Para un equipo de 1 giga de Ram y un procesador Centrinuo Duo se ejecutó el algoritmo para redes de 8, 9 y 10 nodos obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 1. Tiempo de iteración ruta perfecta**

Nodos	Combinaciones	Tiempo total por red [s]	Tiempo por combinación [s]
8	40,320	0.59	1.46329E-05
9	362,880	4.14	1.14087E-05
10	3,628,800	40.46	1.11497E-05

Si extrapolamos los resultados para redes de 11, 12 y 13 nodos el tiempo de ejecución serian:

**Tabla 2. Tiempo de iteración calculado ruta perfecta**

Nodos	Combinaciones	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Tiempo por combinación[s]
-------	---------------	------------	--------------	---------------------------

11	39,916,800	444.02	7.4	1.11235E-05
12	479,001,600	5,327.04	88.7	1.11211E-05
13	6,227,020,800	69,250.24	1.154.17	1.11209E-05

Debido a los tiempos presupuestados en la tabla 2, para el presente trabajo el algoritmo de ruta perfecta será utilizado para rutas de menores o iguales a 10 nodos.

### 3. DISEÑO DE HEURÍSTICAS

Para el desarrollo del modelo se requiere un algoritmo que asegure el diseño de la ruta más corta entre una red de nodos, para lo cual se proponen las siguientes heurísticas:

#### 3.1 VECINO MÁS CERCANO

Genera la ruta a partir de la heurística del vecino más cercano mencionado en el punto 1.2.

##### Algoritmo propuesto:

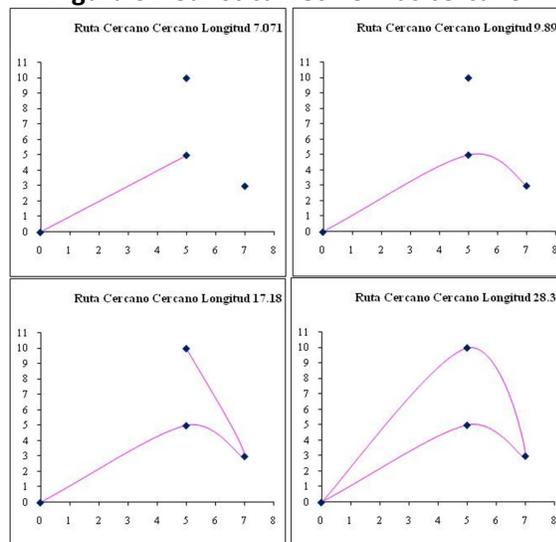
Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 3. Repetir el Paso 2, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 4. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Figura 6 Heurística Vecino más cercano



#### 3.2 VECINO MÁS CERCANO CON INSERCIÓN

Utiliza la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, pero verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción vista en el punto 1.4.

##### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

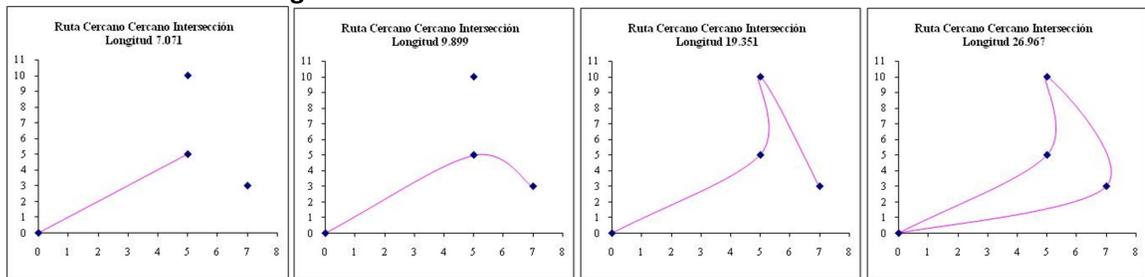
Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano encontrado (Paso: 3), sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción, teniendo en cuenta la menor distancia; sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 7. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 7 Heurística Vecino más cercano con inserción**



### 3.3 VECINO MÁS CERCANO CON 4 OPT

Utiliza la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta y adicionarlo al final de la misma; y la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los últimos 5 nodos de la ruta generada.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 4. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 5. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

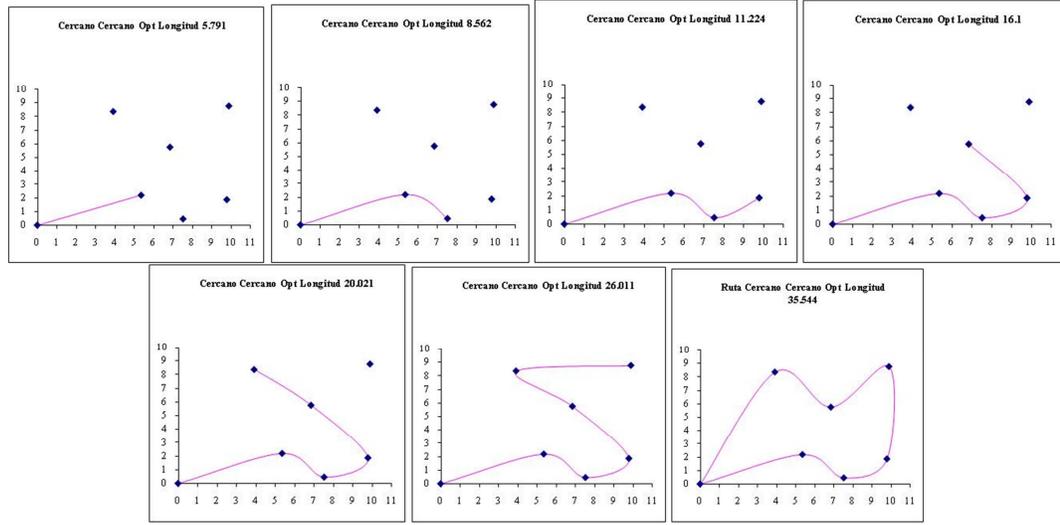
Paso: 6. A partir del último nodo y tomándolo como el quinto nodo, iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 5, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 8. Heurística vecino más cercano con 4 opt**



### 3.4 VECINO CERCANO CON INTERSECCIÓN Y 4-OPT

Utiliza la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción y aplica la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

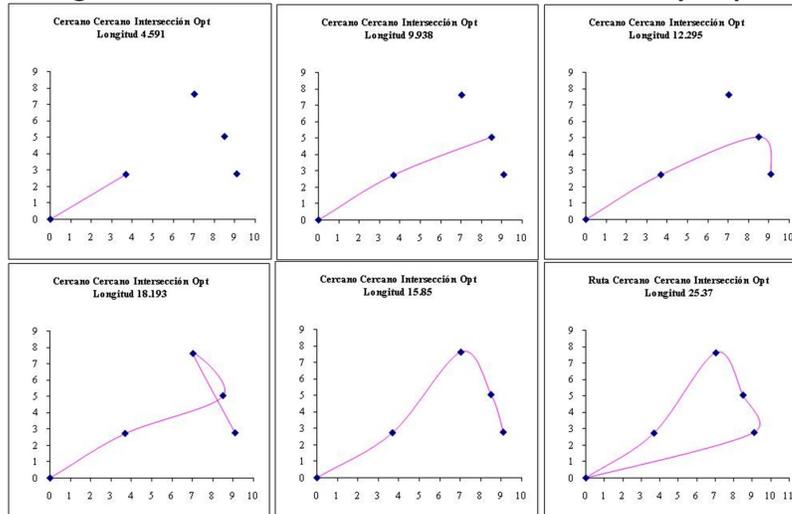
Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado y tomándolo como tercer nodo si hubo inserción, o a partir del último nodo si no hubo inserción y tomándolo como el quinto nodo, iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 9 Heurística vecino cercano con intersección y 4 opt**



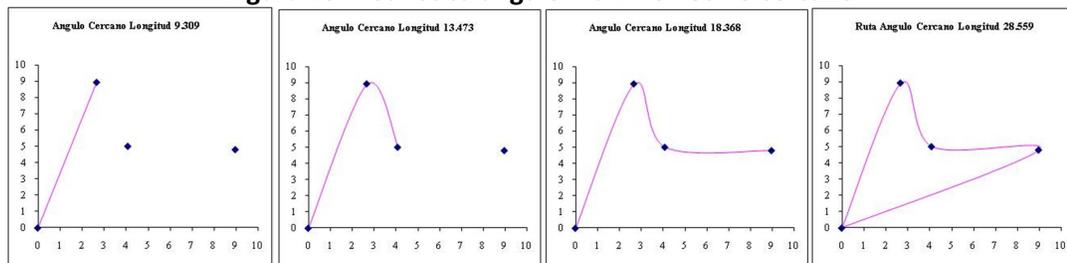
### 3.5 ANGULO MÁXIMO VECINO CERCANO

Utiliza la heurística del mayor ángulo para hallar el primer nodo de la ruta y la heurística del vecino más cercano para generar el resto de la ruta.

**Algoritmo propuesto:**

- Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.
- Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.
- Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al lazo.
- Paso: 4. Repetir el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.
- Paso: 5. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 10. Heurística ángulo máximo vecino cercano**



### 3.6 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN

Utiliza la heurística del mayor ángulo para hallar el primer nodo de la ruta, y la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, verificando si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción.

### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

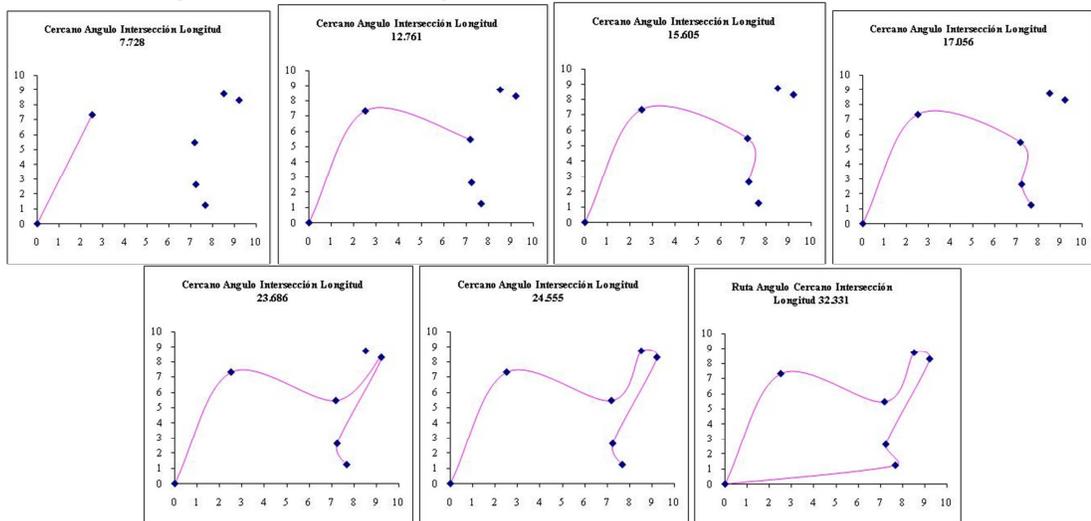
Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 7. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Figura 11. Heurística ángulo máximo vecino cercano con inserción



### 3.7 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON 4 OPT

Utiliza la heurística del mayor ángulo para hallar el primer nodo de la ruta, y la heurística del vecino más cercano para generar el resto de la ruta, aplicando la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño, tomando en cuenta los últimos 5 nodos de la ruta generada.

### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 4. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 5. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

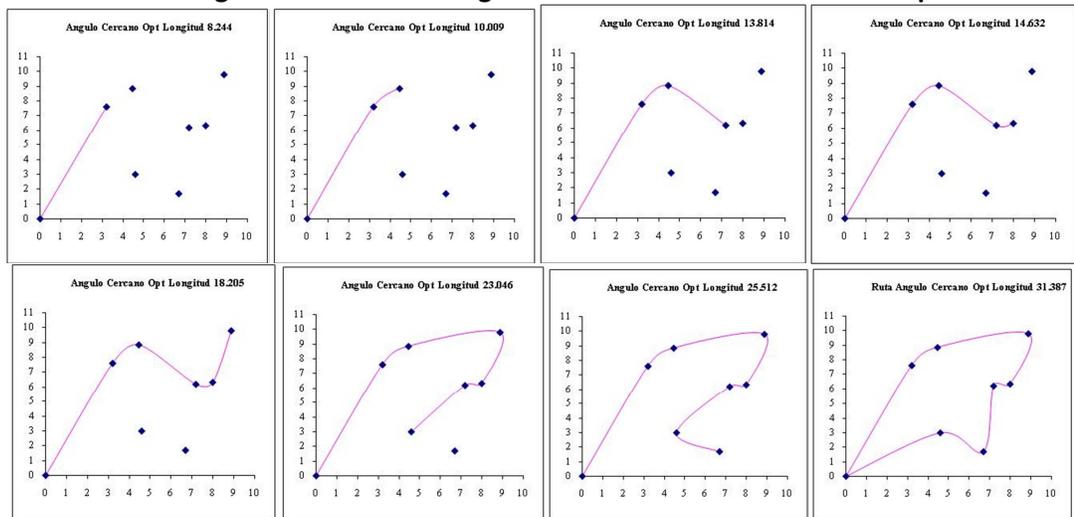
Paso: 6. A partir del último nodo y tomándolo como el quinto nodo, iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 5, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 12. Heurística ángulo máximo vecino cercano con 4 opt**



### 3.8 ÁNGULO MÁXIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN Y 4 OPT

Utiliza la heurística del mayor ángulo para hallar el primer nodo de la ruta, la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción y la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

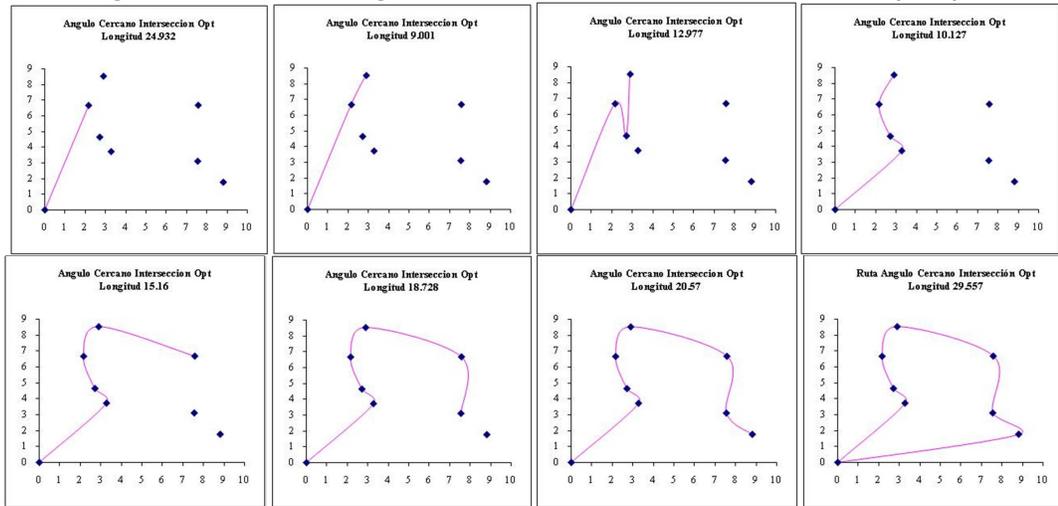
Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado y tomándolo como tercer nodo si hubo inserción, o a partir del último nodo si no hubo inserción y tomándolo como el quinto nodo, Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 13. Heurística ángulo máximo vecino cercano con inserción y 4 opt**



### 3.9 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO

El primer nodo de la ruta es el nodo con menor ángulo y utiliza la heurística del vecino más cercano para generar el resto de la ruta.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

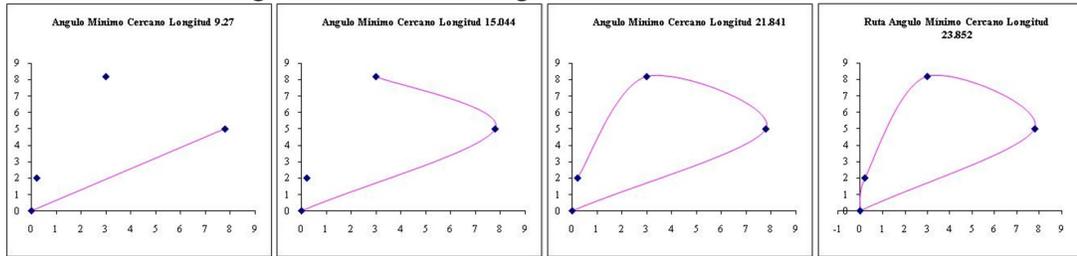
Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al lazo.

Paso: 4. Repetir el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 5. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 14. Heurística ángulo mínimo vecino cercano**



### 3.10 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN

El primer nodo de la ruta es el nodo con menor ángulo y utiliza la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, verificando si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

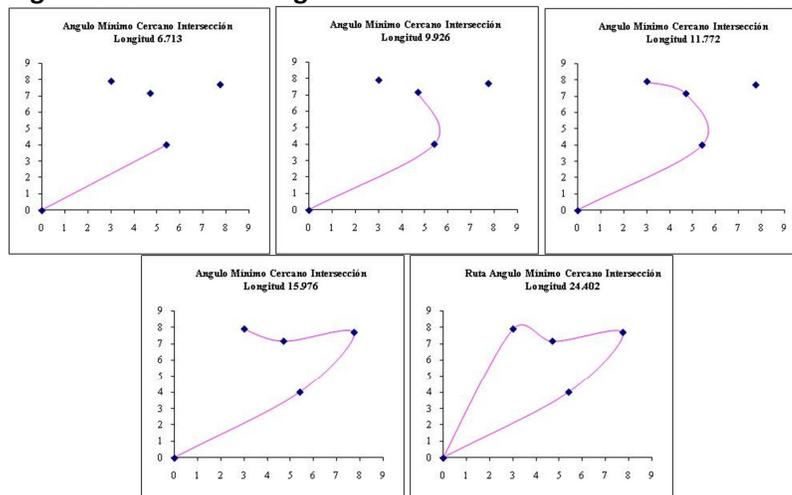
Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 7. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 15. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con inserción**



### 3.11 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON 4 OPT

El primer nodo de la ruta es el nodo con menor ángulo y utiliza la heurística del vecino más cercano para generar el resto de la ruta utilizando la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los últimos 5 nodos de la ruta generada.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 4. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 5. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

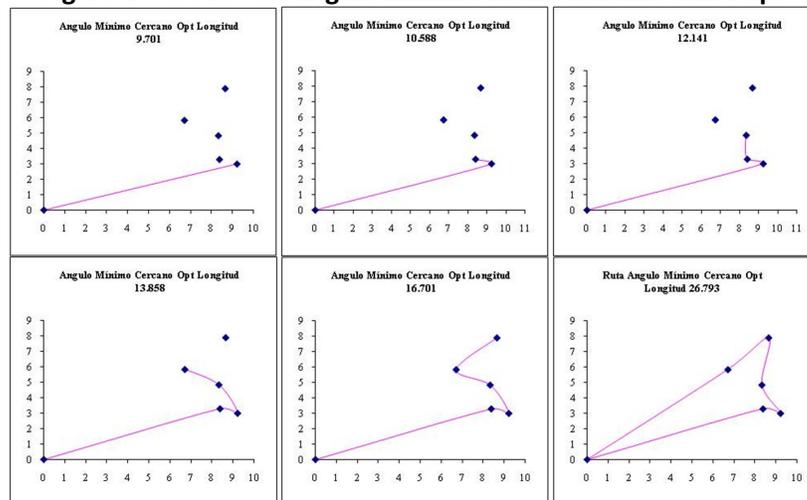
Paso: 6. A partir del último nodo y tomándolo como el quinto nodo, Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 5, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

Figura 16. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con 4 opt



### 3.12 ÁNGULO MÍNIMO VECINO CERCANO CON INSERCIÓN Y 4 OPT

El primer nodo de la ruta es el nodo con menor ángulo y utiliza la heurística del vecino más cercano para hallar el siguiente nodo de la ruta, verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción y emplea la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

**Algoritmo propuesto:**

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo más cercano al último nodo de la ruta que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo más cercano, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nuevo más cercano encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo más cercano en la última posición de la ruta.

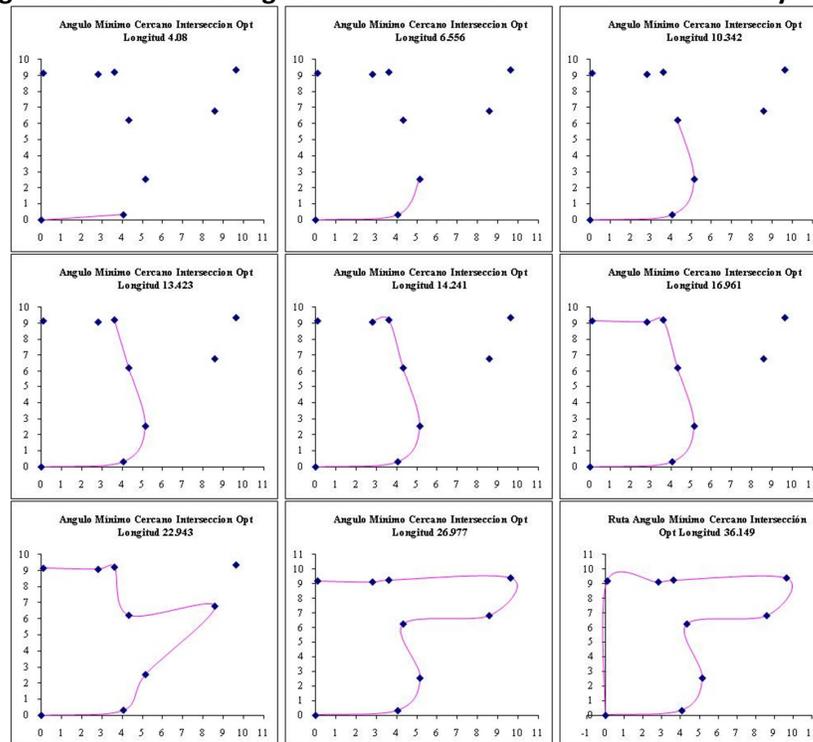
Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado y tomándolo como tercer nodo si hubo inserción, o a partir del último nodo si no hubo inserción y tomándolo como el quinto nodo, Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 17. Heurística ángulo mínimo vecino cercano con inserción y 4 opt**



### 3.13 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO

Genera la ruta a partir de la heurística del mayor ángulo mencionada en el punto 1.3.

#### Algoritmo propuesto:

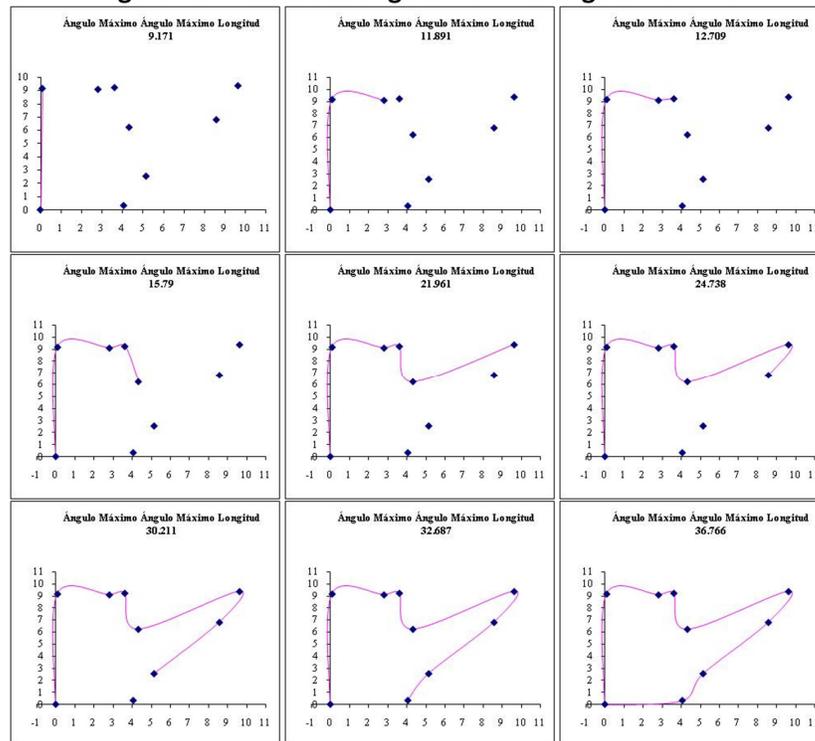
Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado e incluirlo al final del lazo.

Paso: 3. Repetir el paso 2, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 4. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Figura 18. Heurística ángulo máximo ángulo máximo



### 3.14 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN

Utiliza la heurística mayor ángulo para hallar el siguiente nodo de la ruta, pero verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

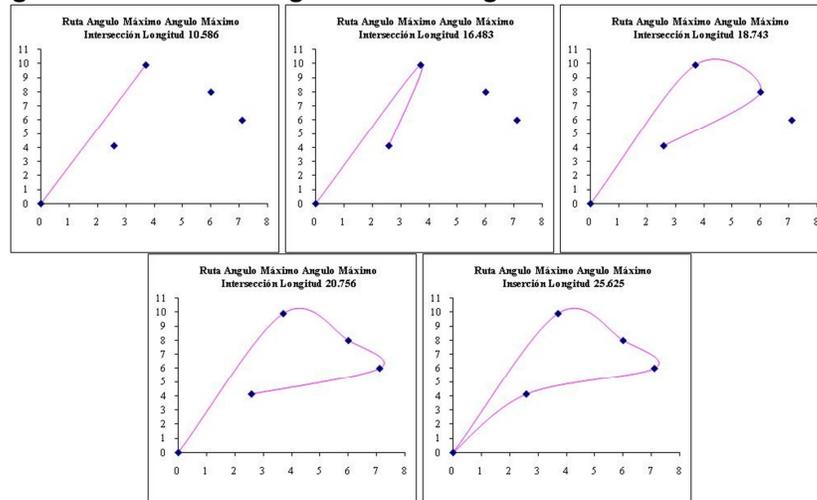
Paso: 3. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo con el mayor ángulo encontrado, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nuevo nodo de ángulo mayor encontrado.

Paso: 4. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 3, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 3, agregue el nodo de ángulo mayor en la última posición de la ruta.

Paso: 5. Repetir el paso 2 hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 6. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 19. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con intersección**



### 3.15 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON 4 OPT

Utiliza la heurística del ángulo máximo para hallar el siguiente nodo de la ruta y adicionarlo al final de la misma; y la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los últimos 5 nodos de la ruta generada.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 4. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 5. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

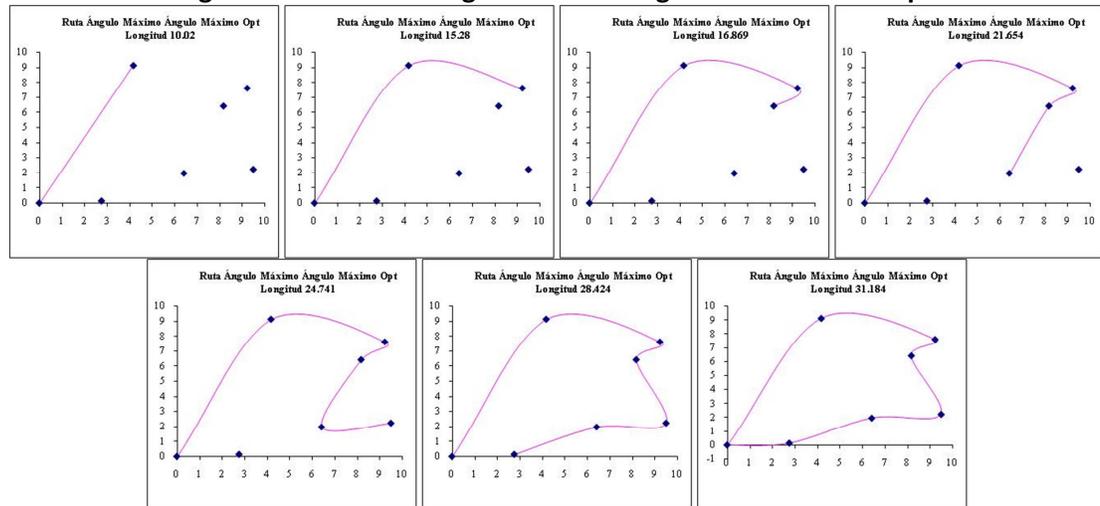
Paso: 6. A partir del último nodo y tomándolo como el quinto nodo, iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 5, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 20. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con 4 opt**



### 3.16 ÁNGULO MÁXIMO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN Y 4 OPT

Utiliza la heurística del ángulo máximo para hallar el siguiente nodo de la ruta, pero verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción y la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño, tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el mayor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo con el mayor ángulo, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo con el mayor ángulo encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo con el mayor ángulo en la última posición de la ruta.

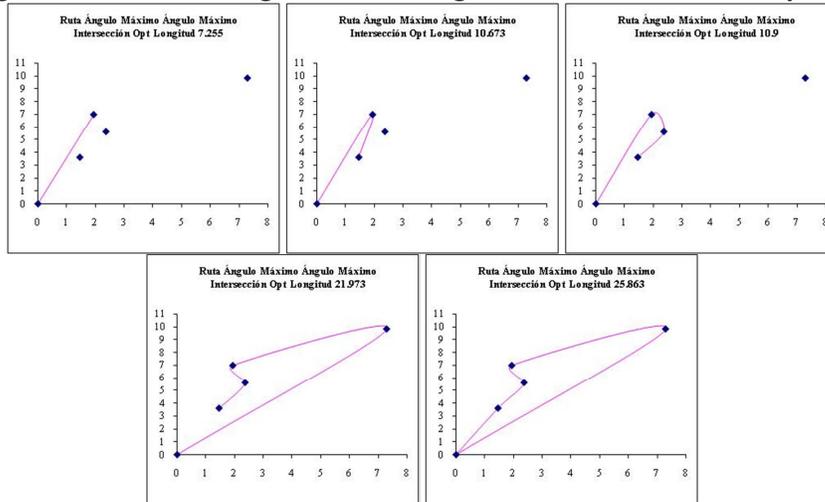
Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado y tomándolo como tercer nodo si hubo inserción, o a partir del último nodo si no hubo inserción y tomándolo como el quinto nodo, iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 21. Heurística ángulo máximo ángulo máximo con inserción y 4 opt**



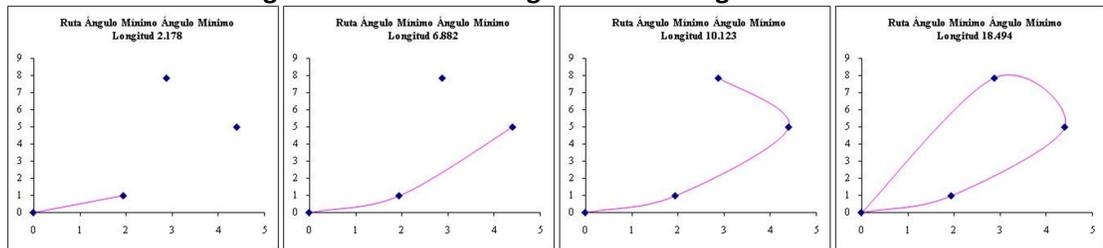
### 3.17 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO

Genera la ruta adicionando al final de la ruta el nodo con menor ángulo.

**Algoritmo propuesto:**

- Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.
- Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado e incluirlo al final del lazo.
- Paso: 3. Repetir el paso 2.
- Paso: 4. Incluir el nodo inicial al final del lazo, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

**Figura 22. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo**



### 3.18 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN

Genera la ruta adicionando al final de la ruta el nodo con menor ángulo, pero verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción.

**Algoritmo propuesto:**

- Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.
- Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

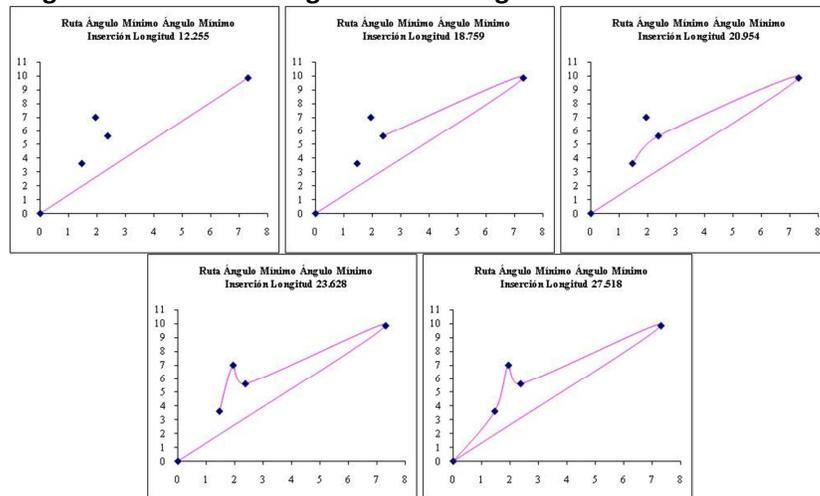
Paso: 3. Buscar entre los nodos ya enrutados, un nodo cuya distancia al nodo con menor ángulo encontrado, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo de ángulo menor encontrado.

Paso: 4. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 3, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último, sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 3, agregue el nodo de ángulo menor en la última posición de la ruta.

Paso: 5. Repetir el paso 2 hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 6. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 23. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con inserción**



### 3.19 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON 4 OPT

Halla el nodo con menor ángulo y lo adiciona al final de la ruta y utiliza la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño, tomando en cuenta los últimos 5 nodos de la ruta generada.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 4. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

Paso: 5. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y agregarlo al final del lazo.

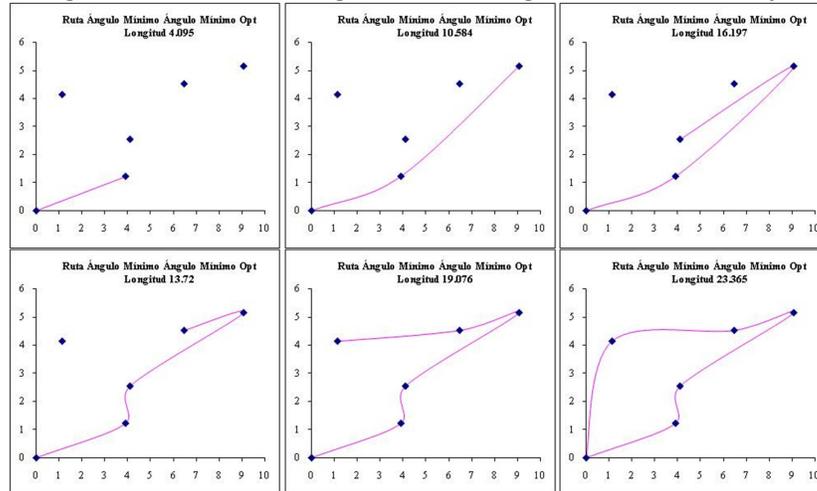
Paso: 6. A partir del último nodo y tomándolo como el quinto nodo, Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 5, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 24. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con 4 opt**



### 3.20 ÁNGULO MÍNIMO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN Y 4 OPT

Halla el nodo con menor ángulo, verifica si aplica su inserción dentro de la ruta utilizando la heurística de inserción y la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Buscar el nodo con el menor ángulo e incluirlo en el lazo.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado y determinar la distancia al último nodo de la ruta.

Paso: 4. Buscar entre los nodos ya enrutados un nodo cuya distancia al nodo con el menor ángulo, sea menor a la distancia entre el último nodo de la ruta y el nodo con el menor ángulo encontrado.

Paso: 5. Si se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, incluir el nodo cercano antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último. Sin no se encuentra un nodo de inserción en el Paso 4, agregue el nodo con el menor ángulo en la última posición de la ruta.

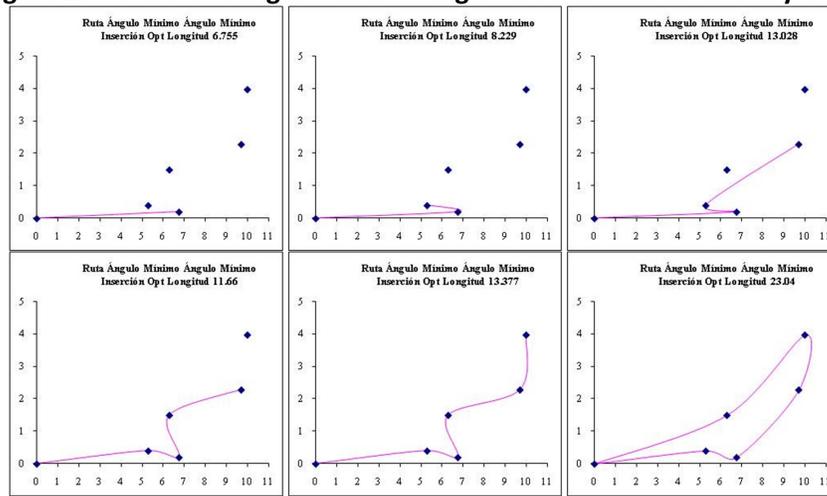
Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado y tomándolo como tercer nodo si hubo inserción, o a partir del último nodo si no hubo inserción y tomándolo como el quinto nodo, Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Paso: 9. Repetir el paso 6.

**Figura 25. Heurística ángulo mínimo ángulo mínimo con inserción y 4 opt**



### 3.21 LEJANO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de mayor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

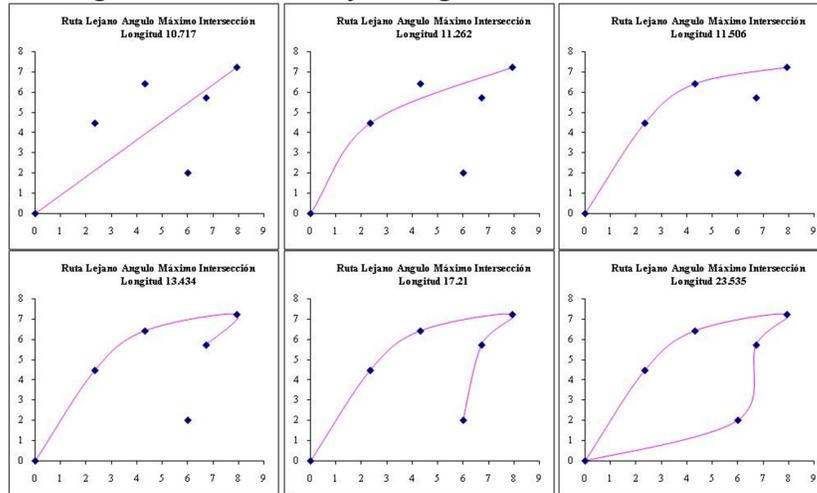
Paso: 4. Si el nodo está en la parte superior de la línea formada por el nodo inicial y el nodo más lejano de la red hallado en el Paso 2, busque un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 5. Si el nodo está en la parte inferior, busque un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último. Si no se encuentra un nodo de inserción, agregue el nodo en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 7. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 26. Heurística lejano ángulo máximo con inserción**



### 3.22 LEJANO ÁNGULO MÁXIMO CON INSERCIÓN y 4OPT

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de mayor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción y aplica la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

Paso: 4. Si el nodo está en la parte superior de la línea formada por el nodo inicial y el nodo más lejano de la red hallado en el Paso 2, busque un nodo de inserción entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

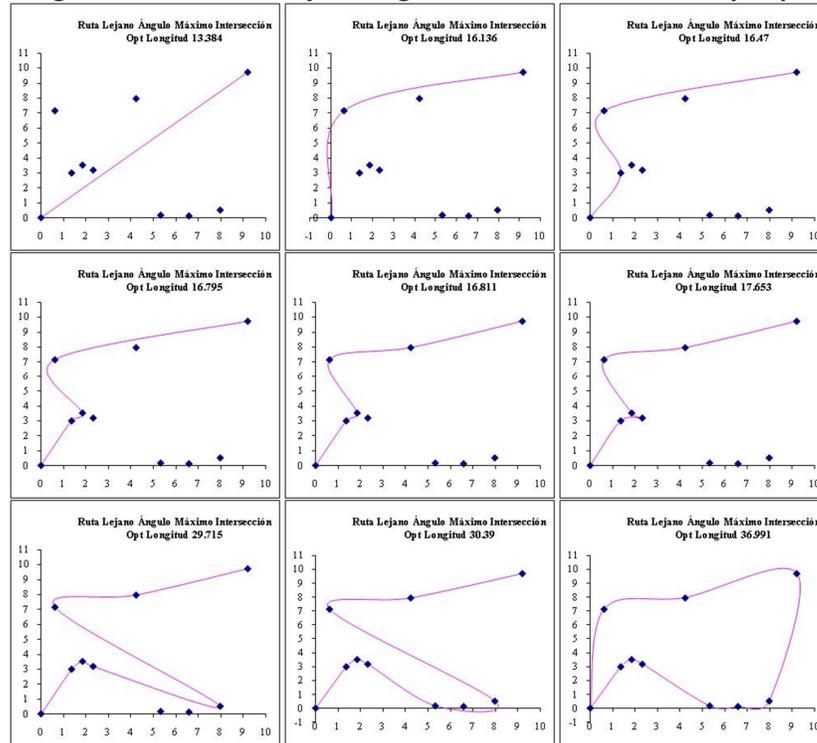
Paso: 5. Si el nodo está en la parte inferior, busque un nodo de inserción entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último. Si no se encuentra un nodo de inserción, agregue el nodo en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado, tomándolo como tercer nodo, formar un lazo de 5 nodos e Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

**Figura 27. Heurística lejano ángulo máximo con inserción y 4opt**



### 3.23 LEJANO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de menor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

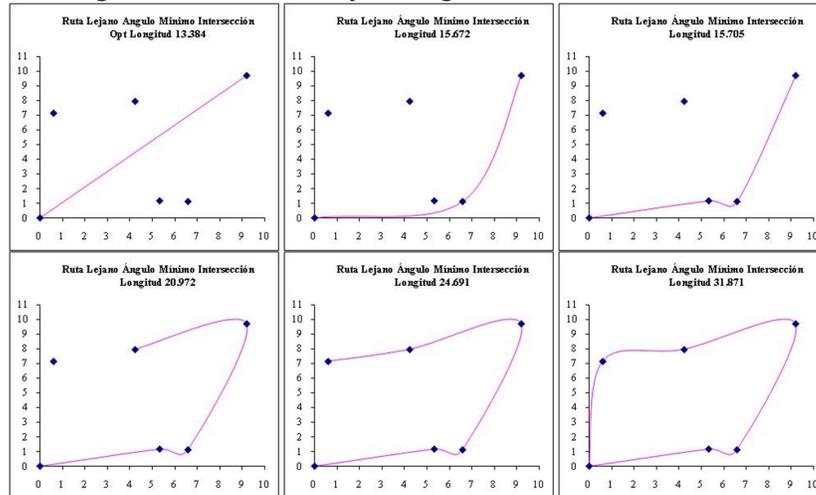
Paso: 4. Si el nodo está en la parte inferior de la línea formada por el nodo inicial y el nodo más lejano de la red hallado en el Paso 2, busque un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublaço formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 5. Si el nodo está en la parte superior, busque un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublaço formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último. Si no se encuentra un nodo de inserción, agregue el nodo en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 7. Incluir el nodo inicial al final del laço.

**Figura 28. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción**



### 3.24 LEJANO ÁNGULO MÍNIMO CON INSERCIÓN y 4OPT

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de menor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción y aplica la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

Paso: 4. Si el nodo está en la parte inferior de la línea formada por el nodo inicial y el nodo más lejano de la red hallado en el Paso 2, busque un nodo de inserción entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

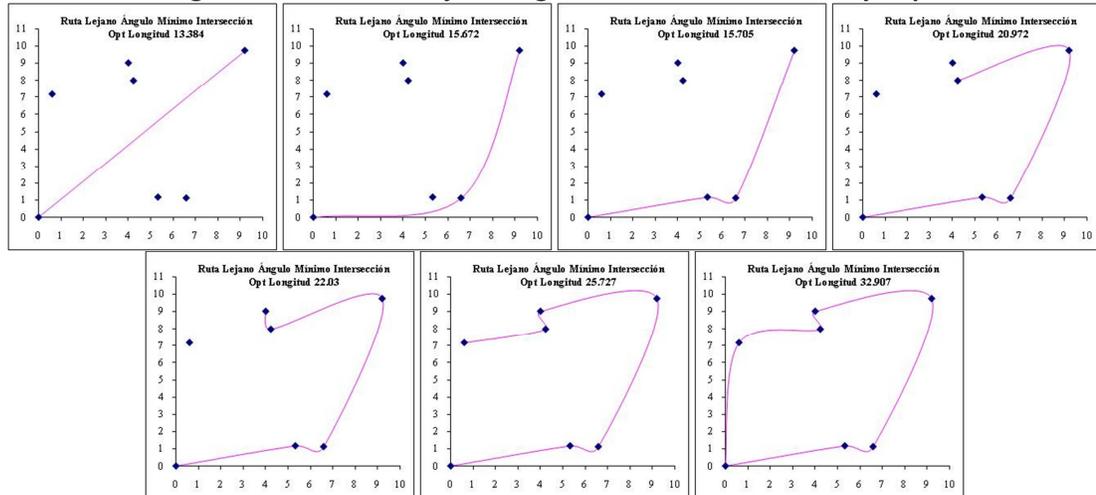
Paso: 5. Si el nodo está en la parte superior, busque un nodo de inserción entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluya el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último. Si no se encuentra un nodo de inserción, agregue el nodo en la última posición de la ruta.

Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado, tomándolo como tercer nodo, formar un lazo de 5 nodos e Iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 7. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

Paso: 8. Incluir el nodo inicial al final del lazo.

Figura 29. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción y 4opt



### 3.25 LEJANO DOBLE ÁNGULO CON INSERCIÓN

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de mayor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción, seguido halla el nodo de menor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Seleccionar el nodo inicial e incluirlo al final de la ruta.

Paso: 4. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

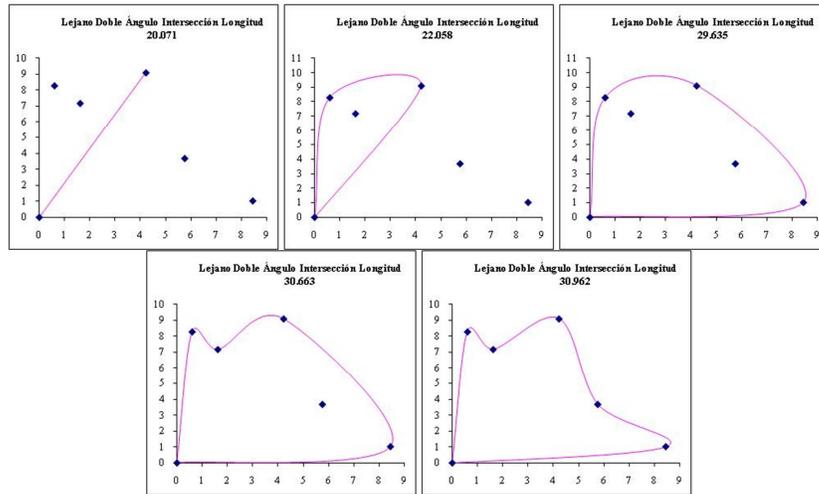
Paso: 5. Buscar un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluir el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 6. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

Paso: 7. Buscar un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluir el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 8. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

**Figura 30. Heurística lejano ángulo mínimo con inserción**



### 3.26 LEJANO DOBLE ÁNGULO CON INSERCIÓN Y 4OPT

El primer nodo de la ruta corresponde al nodo más lejano, posteriormente halla el nodo de mayor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción y aplica la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado, seguido halla el nodo de menor ángulo y lo inserta dentro de la ruta, utilizando la heurística de inserción y aplica la heurística de 4-opt para definir el lazo de menor tamaño tomando en cuenta los 2 nodos anteriores y los dos nodos posteriores al nodo insertado.

#### Algoritmo propuesto:

Paso: 1. Seleccionar el nodo inicial.

Paso: 2. Hallar el nodo más lejano e incluirlo en la ruta.

Paso: 3. Seleccionar el nodo inicial e incluirlo al final de la ruta.

Paso: 4. Encontrar el nodo con el mayor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

Paso: 5. Buscar un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluir el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 6. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado, tomándolo como tercer nodo, formar un lazo de 5 nodos e iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

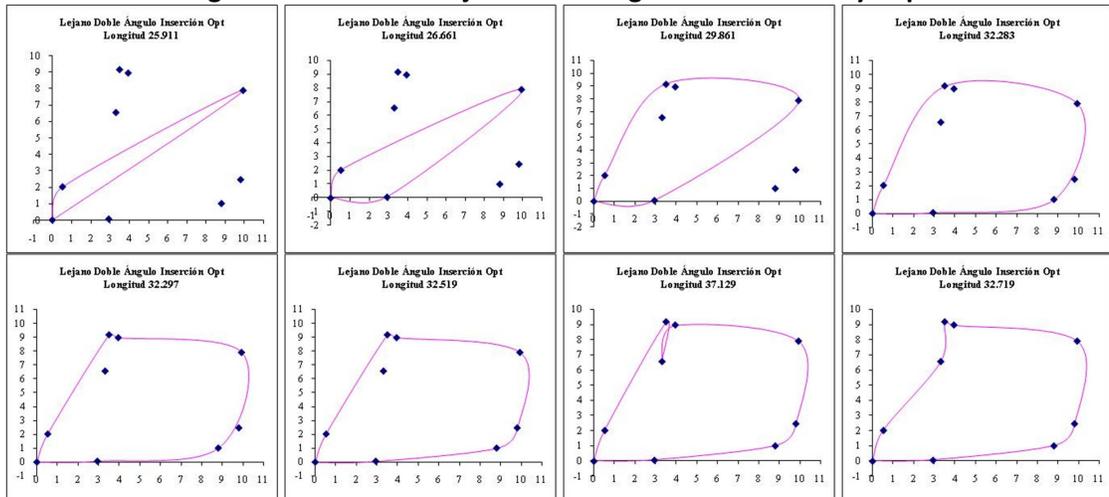
Paso: 7. Encontrar el nodo con el menor ángulo de la red que no haya sido ya enrutado.

Paso: 8. Buscar un nodo de intersección entre los nodos que se encuentren enrutados e Incluir el nodo antes o después del nodo de inserción teniendo en cuenta la menor longitud del sublazo formado por el nodo cercano encontrado, el nodo de inserción y los nodos adyacentes a este último.

Paso: 9. Si el tamaño del lazo es de cinco o más nodos, a partir del nodo insertado, tomándolo como tercer nodo, formar un lazo de 5 nodos e iterar cambiando la posición del segundo, tercer y cuarto nodo, seleccionando el sub lazo con menor longitud.

Paso: 10. Repetir desde el Paso 3, hasta terminar de incluir todos los nodos de la red.

**Figura 31. Heurística lejano doble ángulo con inserción y 4opt**



### 3.27 PRUEBAS A LAS HEURÍSTICAS

Se realizaron pruebas generando 100 redes con 9 nodos y 1.000 redes con 10, 15 y 20 nodos, aplicando cada una de las heurísticas con el fin de determinar cuál de ellas es la más efectiva.

En la Tabla 3 Efectividad de Heurísticas, se muestra el porcentaje donde determinada heurística creó la ruta más corta, teniendo en cuenta que para una misma red puede haber más de una heurística con la ruta más corta.

**Tabla 3 Efectividad y tiempos de Heurísticas**

Heurística	9 Nodos	10 Nodos	15 Nodos	20 Nodos
Ruta Cercano Cercano	19%	13%	6%	2%
Ruta Cercano Cercano Intersección	18%	12%	4%	2%
Ruta Cercano Cercano Opt	40%	33%	21%	17%
Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	34%	33%	17%	16%
Ruta Angulo Cercano	6%	9%	2%	1%
Ruta Angulo Cercano Intersección	9%	6%	1%	1%
Ruta Angulo Cercano Opt	19%	26%	9%	6%
Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	26%	25%	12%	8%
Ruta Angulo Mínimo Cercano	13%	7%	1%	1%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	15%	7%	1%	1%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	25%	21%	8%	6%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	25%	25%	9%	9%
Ruta Angulo Angulo	0%	2%	0%	0%

Heurística	9 Nodos	10 Nodos	15 Nodos	20 Nodos
Ruta Angulo Angulo Intersección	2%	3%	0%	0%
Ruta Angulo Angulo Opt	53%	36%	7%	1%
Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	26%	26%	9%	5%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	0%	2%	0%	0%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	4%	3%	0%	0%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	50%	39%	7%	1%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	30%	28%	10%	6%
Ruta Lejano Angulo Intersección	3%	2%	0%	0%
Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	25%	25%	10%	6%
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	6%	3%	0%	0%
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	35%	30%	12%	6%
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	2%	2%	0%	0%
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	61%	64%	51%	48%
Ruta Perfecta	100%	NA	NA	NA

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de iteración en segundos para cada una de las heurísticas propuestas:

Heurística	9 Nodos	10 Nodos	15 Nodos	20 Nodos
Ruta Cercano Cercano	0.0004	0.0005	0.0019	0.0031
Ruta Cercano Cercano Intersección	0.0010	0.0013	0.0028	0.0052
Ruta Cercano Cercano Opt	0.0027	0.0031	0.0057	0.0106
Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	0.0032	0.0041	0.0083	0.0142
Ruta Angulo Cercano	0.0033	0.0038	0.1857	0.2338
Ruta Angulo Cercano Intersección	0.0043	0.0047	0.1842	0.2350
Ruta Angulo Cercano Opt	0.0056	0.0069	0.1888	0.2391
Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	0.0061	0.0073	0.1901	0.2426
Ruta Angulo Mínimo Cercano	0.0006	0.0007	0.0012	0.0033
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	0.0011	0.0015	0.0035	0.0055
Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	0.0025	0.0029	0.0064	0.0099
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	0.0030	0.0037	0.0083	0.0142
Ruta Angulo Angulo	0.0142	0.0185	1.3722	2.3072
Ruta Angulo Angulo Intersección	0.0151	0.0195	1.3736	2.2957
Ruta Angulo Angulo Opt	0.0167	0.0209	1.3767	2.3082
Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	0.0168	0.0213	1.3787	2.3180
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	0.0013	0.0014	0.0032	0.0068
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	0.0020	0.0025	0.0047	0.0108

Heurística	9 Nodos	10 Nodos	15 Nodos	20 Nodos
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	0.0033	0.0041	0.0079	0.0149
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	0.0037	0.0046	0.0116	0.0188
Ruta Lejano Angulo Intersección	0.0123	0.0156	1.1915	2.0797
Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	0.0141	0.0179	1.1951	2.0959
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	0.0018	0.0024	0.0050	0.0111
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	0.0043	0.0046	0.0103	0.0178
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	0.0077	0.0099	0.6450	1.1066
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	0.0127	0.0148	0.6535	1.1217
<b>Tiempo Total Procesamiento Heurísticas</b>	<b>0.1596</b>	<b>0.1985</b>	<b>10.0158</b>	<b>16.7298</b>
<b>Tiempo Promedio de Procesamiento</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0076</b>	<b>0.3852</b>	<b>0.6435</b>
<b>Máximo Tiempo de procesamiento</b>	<b>0.0168</b>	<b>0.0213</b>	<b>1.3787</b>	<b>2.3180</b>

En la tabla 4 Número de heurísticas con la ruta corta, se muestra la frecuencia del número de heurísticas con la ruta corta.

**Tabla 4 Número de heurísticas con la ruta corta**

Nodos	9		10		15		20	
	Frec	% acum.						
1	13	13%	227	23%	563	56%	750	75%
2	13	26%	153	38%	206	77%	161	91%
3	8	34%	106	49%	95	86%	48	96%
4	7	41%	96	58%	56	92%	25	98%
5	10	51%	76	66%	36	96%	10	99%
6	12	63%	67	73%	19	98%	2	100%
7	2	65%	67	79%	13	99%	2	100%
8	6	71%	44	84%	4	99%	1	100%
9	6	77%	37	87%	5	100%	1	100%
10	1	78%	28	90%	0	100%	0	100%
11	4	82%	24	93%	1	100%	0	100%
12	4	86%	16	94%	1	100%	0	100%
13	2	88%	14	96%	0	100%	0	100%
14	3	91%	15	97%	1	100%	0	100%
15	4	95%	11	98%	0	100%	0	100%
16	1	96%	4	99%	0	100%	0	100%
17	3	99%	9	99%	0	100%	0	100%
18	0	99%	3	100%	0	100%	0	100%
19	0	99%	0	100%	0	100%	0	100%
20	1	100%	0	100%	0	100%	0	100%
21	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%
22	0	100%	1	100%	0	100%	0	100%
23	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%
24	0	100%	2	100%	0	100%	0	100%
25	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%

Nodos	9		10		15		20	
Heurísticas con la ruta corta	Frec	% acum.						
26	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%
27	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%

## 4. ALGORITMO RUTEADOR

Al momento de diseñar una ruta no solo se debe tener en cuenta la posición geográfica de los destinos y los tiempos de desplazamiento, sino también la capacidad de carga en peso y volumen de los vehículos de la flota, además los horarios de recepción de los diferentes destinatarios. El método seleccionado es el de barrido en el cual primero se asignan los nodos a un vehículo determinado y después es diseñada la ruta respectiva.

A continuación se describe la información requerida y los algoritmos utilizados por el modelo para generar las rutas de una red de distribución:

### 4.1 INFORMACIÓN DE LOS DESTINATARIOS

La siguiente información debe registrarse en la hoja "Nodos" del libro de Excel donde se programó el algoritmo por cada uno de los nodos que componen la red de distribución.

El nodo origen o centro de distribución debe registrarse en la primera línea de dicha hoja.

- **Nodo:** Código como se identifica el destinatario.
- **Zona:** Código como se identifica a un grupo de nodos que por su posición geográfica son susceptibles de enrutar en un mismo camión.
- **X:** Coordenada cartesiana que denota la posición desde un punto de referencia seleccionado por el usuario en la dirección occidente oriente.
- **Y:** Coordenada cartesiana que denota la posición desde un punto de referencia seleccionado por el usuario en la dirección sur norte.
- **Ventana:** Hora en que el pedido debe entregarse en determinado destinatario.
- **Tiempo de entrega:** Duración del proceso de entrega de la mercancía en el destinatario, este depende de la cantidad de referencias, cantidad de unidades a entregar, entrega certificada, radicación de facturas, etc.
- **Peso:** Peso total de los pedidos a entregar en el destinatario.
- **Volumen:** Volumen total de los pedidos a entregar en el destinatario.

### 4.2 HORARIOS Y DESPLAZAMIENTO:

Esta información es solicitada por el programa al momento de ejecución del mismo:

**Tiempo desplazamiento por unidad:** Es el tiempo promedio que se demora el desplazamiento de un vehículo por unidad cartesiana.

**Hora de inicio:** Es la hora en que los camiones comienzan el recorrido de la ruta partiendo del nodo origen.

**Hora de terminación:** Es la hora máxima en la cual los camiones deben terminar el recorrido de la ruta y regresar al origen.

### 4.3 VEHÍCULOS:

Esta información debe registrarse en la hoja “Vehículos” del libro de Excel donde se programó el algoritmo.

**Vehículo:** Código como se identifica el vehículo.

**Volumen:** Capacidad máxima de carga en volumen de un vehículo (esta debe tener en cuenta la capacidad de arrume de la mercancía a distribuir).

**Peso:** Capacidad máxima de carga en peso de un vehículo.

### 4.4 ALGORITMO DE SELECCIÓN DEL VEHÍCULO

Cuando se usa la modalidad de paqueteo para la entrega de un pedido, es porque este es relativamente liviano comparado con la capacidad de los vehículos utilizados para el transporte de la mercancía. La restricción que se propone para la selección de un vehículo a enrutar es su capacidad de carga en volumen, con lo cual se busca optimizar la cantidad de pedidos despachados por vehículo, seleccionando el vehículo de mayor capacidad disponible.

Paso: 1. Verifique que se encuentren camiones disponibles a enrutar en la flota de vehículos.

Paso: 2. Verifique el volumen de todos los camiones disponibles.

Paso: 3. Seleccione el vehículo con mayor volumen disponible.

Paso: 4. Marque el camión como ya enrutado.

En las tabla Selección de vehículos se muestra el orden en que se enrutarían los diferentes vehículos de la tabla Vehículos.

**Tabla 5. Vehículos**

# Vehículo	Capacidad Volumen	Capacidad Peso
A	10	3,500
B	9	4,500
C	8	1,000
D	14	3,500
E	12	3,500
F	16	4,500
G	12	3,500

**Tabla 6. Selección n de vehículos**

# Vehículo	Capacidad Volumen	Capacidad Peso
f	16	4,500
d	14	3,500
e	12	3,500
g	12	3,500
a	10	3,500
b	9	4,500
h	9	4,500

H	9	4,500
I	7	1,000

c	8	1,000
i	7	1,000

#### 4.5 BLOQUEO DE NODOS NO RUTEABLES

Este algoritmo identifica los nodos que por sus características (distancia al nodo origen, ventana horaria, etc.) no se pueden rutear, ya que no se podría llegar dentro de los horarios de distribución o en la ventana horaria exigida. Posteriormente estos nodos son relacionados en el informe de rutas.

Paso: 1. Determinar la distancia entre el nodo origen y el nodo.

Paso: 2. Hallar el tiempo de tránsito entre el nodo origen y el nodo, teniendo en cuenta el tiempo de desplazamiento por unidad.

Paso: 3. Si el nodo tiene ventana de entrega, verificar que el tiempo de inicio sumado al tiempo de tránsito entre el origen y el nodo, sea menor que la ventana.

Paso: 4. Si es así, verificar que la ventana sumada al tiempo de entrega sumado al tiempo de tránsito entre el nodo y el nodo origen sea menor que la hora de terminación de la ruta.

Paso: 5. Si no se cumple el paso 3 o el paso 4 bloquear el nodo para no ser tenido en cuenta en el diseño de las rutas.

Paso: 6. Si el nodo no tiene ventana, verifique que la hora de inicio sumada al tiempo de tránsito entre el origen y el nodo sumada al tiempo de entrega sumado al tiempo de tránsito entre el nodo y el origen sea menor a la hora de terminación de la ruta.

Paso: 7. Si no se cumple el paso 6 bloquee el nodo.

Teniendo en cuenta los parámetros del ruteo de la tabla 7,

**Tabla 7. Parámetros de inicio bloqueo de nodos**

<b>Hora de inicio</b>	06:00:00
<b>Tiempo de desplazamiento por unidad</b>	00:15:00
<b>Hora de terminación</b>	18:00:00

Los siguientes nodos serán bloqueados:

**Tabla 8. Nodos bloqueados**

<b>Nodo</b>	<b>Zona</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Ventana</b>	<b>Tiempo de entrega</b>	<b>Distancia al Origen</b>	<b>Tiempo de tránsito desde Origen</b>	<b>Hora mínima de arribo al destino</b>	<b>Hora de arribo al nodo origen</b>
2	1	10	7	07:40	00:15	12.2	03:03	09:03	
16	2	-8	2	17:00	00:20	8.2	02:03		19:23
18	2	-19	18		00:15	26.2	06:32		19:25

- El nodo 2 es bloqueado ya que la hora de inicio sumada al tiempo de tránsito entre el origen y el nodo es mayor a la ventana, lo que significa que para un vehículo no es posible arribar al destino antes de la ventana horaria.
- El nodo 16 es bloqueado ya que la ventana más el tiempo de entrega más el tiempo de tránsito entre el nodo y el nodo origen es mayor a la hora de terminación de la ruta, lo que significa que para un vehículo no es posible arribar al centro de distribución cumpliendo la ventana horaria antes del cierre del CD.
- El nodo 18 es bloqueado ya que la hora de inicio mas el tiempo de desplazamiento mas el tiempo de entrega más el tiempo de desplazamiento es mayor a la hora de terminación, lo que significa que para un vehículo no es posible desplazarse hasta el nodo y arribar al nodo origen antes del cierre del CD.

#### **4.6 SELECCIÓN DE DESTINOS A RUTEAR POR CAMIÓN**

El objetivo de este algoritmo es identificar los nodos a distribuir en el vehículo seleccionado por el algoritmo de selección de vehículos del punto 3.4. Estos nodos son seleccionados por su zona, peso y volumen.

Paso: 1. De los nodos que no se hallan ruteado, hallar el nodo con el mayor ángulo respecto al nodo origen.

Paso: 2. Determinar la zona a la cual pertenece el nodo hallado.

Paso: 3. Seleccionar todos los nodos que no se hallan ruteado de la zona del nodo de mayor ángulo hallado.

Paso: 4. Seleccionar los nodos sin cruce de ventanas:

Si un nodo tiene ventana horaria, verifique uno a uno con los demás nodos ya seleccionados que también tengan ventana, que la hora de la ventana del nodo con menor ventana, mas el tiempo de entrega en el nodo con menor ventana, mas el tiempo de tránsito entre los dos nodos, sea menor a la hora de la ventana del nodo con mayor ventana.

Si esta comparación es menor para todos los nodos ya seleccionados, agregue el nodo a esta selección.

Paso: 5. De los nodos escogidos en el paso anterior, seleccionar uno a uno en orden de menor a mayor ángulo, sumando el peso y volumen hasta que se terminen los nodos de la zona o hasta que se supere las capacidades de volumen o peso del vehículo.

Paso: 6. Si se acabaron los nodos de la zona, verifique que la ocupación del camión, sea mayor al 80% en volumen o en peso.

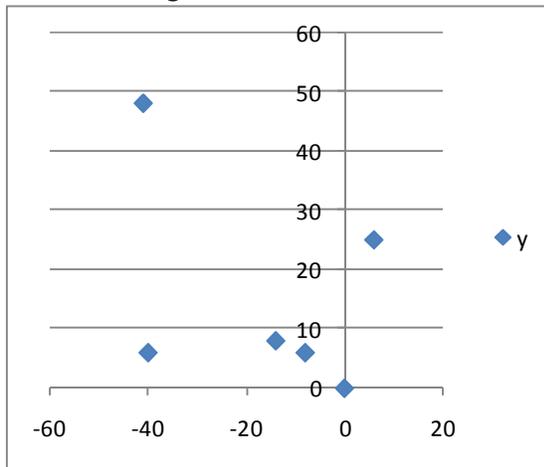
Paso: 7. Si la utilización no es mayor al 80%, buscar el nodo más cercano de otras zonas, adiciónalo a los nodos a rutear y repetir desde el paso 4, hasta que se cumpla la utilización esperada del vehículo o hasta haber probado todos los nodos a rutear.

Para un tiempo de desplazamiento por unidad de 1 y el camión enturnado por el Algoritmo de Selección del Vehículo del punto 3.4, con los siguientes nodos el algoritmo realizará los siguientes pasos:

**Tabla 9. Red de distribución Algoritmo selección de destinos a rutear por camión**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
Origen	0	0	0		00:30:00	NA	NA
1	1	-8	6	10:00:00 a.m.	00:20:00	1,800	3
2	1	-41	48	07:40:00 a.m.	00:15:00	1,400	4
3	1	-14	8		00:25:00	1,500	2
4	1	-40	6	10:20:00 a.m.	00:10:00	663	5
5	2	6	25	01:00:00 p.m.	00:35:00	400	5

**Figura 32. Red de distribución Algoritmo selección de destinos a rutear por camión**



Verifica que nodo forma el mayor ángulo respecto al origen. En este caso selecciona el nodo número 4.

**Tabla 10. Selección del nodo de mayor ángulo.**

Nodo	Zona	x	y	Radianes	Grados
Origen	0	0	0	Na	NA
1	1	-8	6	2.50	143
2	1	-41	48	2.28	131

Nodo	Zona	x	y	Radianes	Grados
3	1	-14	8	2.62	150
<b>4</b>	<b>1</b>	<b>-40</b>	<b>6</b>	2.99	<b>171</b>
5	2	6	25	1.34	77

Selecciona todos los nodos de la misma zona.

**Tabla 11. Nodos de la zona del nodo de mayor ángulo.**

Nodo	Zona
1	1
2	1
3	1
4	1

Verifica con los nodos que componen la zona, no se presente cruce de ventanas, en este caso el nodo 1 y 4 presentan cruce de ventanas por lo cual el nodo 4 es eliminado.

**Tabla 12. Verificación de cruce de ventanas.**

Nodo	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia	Tiempo de desplaz.	Ventana Menor más tiempo de entrega + desplaz.
1	-8	6	10:00:00 a.m.	00:20:00	32	00:32:00	10:52:00
4	-40	6	10:20:00 a.m.	00:10:00			

Verifica que la ocupación del vehículo no se sobrepase en volumen ni en peso, si es así elimina los nodos de mayor ángulo.

**Tabla 13. Verificación de ocupación.**

Nodo	Zona	Peso	Volumen	Grados
Origen	0	NA	NA	NA
1	1	1,800	3	172
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1,400</b>	<b>4</b>	<b>229</b>

Nodo	Zona	Peso	Volumen	Grados
3	1	1,500	2	115

**4,700      9**

Selecciona el siguiente nodo de zona diferente a la inicial.

**Tabla 14. Selección de nodos de otras zonas.**

Nodo	Zona
1	1
3	1
5	2

Verifica si se presentan cruce de ventanas con la inclusión del nuevo nodo. En este caso si las heurísticas de ruteo asignan al nodo 5 después del nodo 1 el vehículo tendría suficiente tiempo para transitar y cumplir la ventana horaria.

**Tabla 15. Verificación de cruce de ventanas.**

Nodo	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia	Tiempo de desplaz.	Tiempo de entrega Nodo1 + desplaz.	Hora mínima de arribo al nodo 5.
1	-8	6	10:00:00 a.m.	00:20:00	24	00:23:36	00:43:36	10:43:36
5	6	25	01:00:00 p.m.	00:35:00				

Verifica la ocupación del vehículo no supere las capacidades del vehículo, ni que su utilización sea menor al 80%.

**Tabla 16. Verificación de la ocupación del vehículo.**

Nodo	Zona	Peso	Volumen	Ocupación Peso	Ocupación Volumen
Origen	0	NA	NA	82%	63%
1	1	1,800	3		
3	1	1,500	2		
5	2	400	5		

Nodo	Zona	Peso	Volumen	Ocupación Peso	Ocupación Volumen
		3,700	10		

Finalmente determina los nodos a rutear.

**Tabla 17. Nodos seleccionados selección de destinos a rutear por camión**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
Origen	0	0	0		00:30:00	NA	NA
1	1	-8	6	10:00:00 a.m.	00:20:00	1,800	3
3	1	-14	8		00:25:00	1,500	2
5	2	6	25	01:00:00 p.m.	00:35:00	400	5

#### 4.7 GENERAR RUTA DE LOS DESTINOS SELECCIONADOS

Este algoritmo diseña una ruta a partir de los nodos seleccionados, toma los nodos sin ventana horaria, el nodo de menor ventana e iterando cada una de las heurísticas propuestas selecciona la ruta más corta que cumpla con la ventana horaria y la mayor cantidad de nodos. Si quedan nodos restantes vuelve a repetir el ciclo hasta terminar de incluir todos los nodos disponibles.

Paso: 1. Verificar si la red tiene ventanas de entrega.

Paso: 2. Si no tiene ventanas ejecutar las heurísticas de ruteo y guardar la ruta más corta generada.

Paso: 3. Si tiene ventanas hallar la ventana menor y eliminar las otras ventanas.

Paso: 4. Ejecutar las heurísticas de ruteo.

Paso: 5. Para cada una de las rutas generadas por las heurísticas defina el sentido de la ruta teniendo en cuenta la posición del nodo ventana y la hora de la ventana.

Paso: 6. Si la ventana menos la hora de inicio de la ruta es menor a la mitad del tiempo de tránsito de la ruta y si la posición del destinatario es menor a la mitad de todos los destinatarios, la ruta se planea según el orden dado por la heurística.

Paso: 7. Si la ventana menos la hora de inicio de la ruta es menor a la mitad del tiempo de tránsito de la ruta y si la posición del destinatario es mayor a la mitad de todos los destinatarios, la ruta se planea en el orden inverso dado por la heurística.

Paso: 8. Si la ventana menos la hora de inicio de la ruta es mayor a la mitad del tiempo de tránsito de la ruta y si la posición del destinatario es menor a la mitad de todos los destinatarios, la ruta se planea en el orden inverso dado por la heurística.

Paso: 9. Si la ventana menos la hora de inicio de la ruta es mayor a la mitad del tiempo de tránsito de la ruta y si la posición del destinatario es mayor a la mitad de todos los destinatarios, la ruta se planea según el orden dado por la heurística.

Paso 10. Si la ruta se planea con el orden dado por la heurística, entonces, seleccionar uno a uno los nodos exceptuando el nodo de la ventana, según la ruta definida por la heurística, mientras el tiempo de tránsito de la ruta más la hora de inicio sea menor a la ventana.

Paso 11. Si la ruta se planea con el orden inverso al dado por la heurística, entonces seleccionar uno a uno los nodos exceptuando el nodo de la ventana, de forma inversa a la ruta definida por la heurística, mientras el tiempo de tránsito de la ruta más la hora de inicio sea menor a la ventana.

Paso 12. Incluir el nodo de la ventana al final de la ruta.

Paso 13. Evaluar si el tiempo de inicio más el tiempo de tránsito hasta el nodo ventana es menor a la ventana.

Paso 14. Si el tiempo de tránsito no es menor entonces elimine el nodo anterior al nodo de la ventana y repita desde el paso 8.

Paso 15. De todas las rutas generadas teniendo en cuenta cada una de las heurísticas seleccione la que más nodos contenga y menor distancia recorra.

Paso 16. Si quedaron nodos no incluidos en la subruta, repita desde el paso uno, pero teniendo en cuenta que el nuevo tiempo de inicio de la ruta será la ventana horaria mas el tiempo de entrega en el nodo de la ventana.

Paso 17. Adicione la subruta hallada a la ruta anterior.

Paso 18. Como último nodo, colocar el nodo origen.

Paso 19. Verificar que la ruta regresa al nodo origen antes de la hora máxima de regreso.

Paso 20. Si no es así elimine el antepenúltimo nodo de la ruta y repita el Paso 19.

Para los siguientes parámetros:

**Tabla 18. Parámetros ejemplo algoritmo Generar ruta de los destinos seleccionados.**

<b>Inicio ruta</b>	06:00:00
<b>Tiempo de tránsito</b>	00:15:00
<b>Finalización ruta</b>	06:00:00

<b># Vehículo</b>	<b>Capacidad Volumen</b>	<b>Capacidad Peso</b>
F	16	4,500

Y la siguiente red de nodos, el algoritmo realizará los siguientes pasos:

**Tabla 19. Red de nodos de distribución ejemplo algoritmo generar ruta destinos seleccionados.**

<b>Nodo</b>	<b>Zona</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Ventana</b>	<b>Tiempo de entrega</b>	<b>Peso</b>	<b>Volumen</b>
Origen	1	0	0				
1	1	5	4	10:00	0:20:00	159	0.23
2	1	10	7	07:40	0:15:00	303	0.10
3	1	8	5		0:25:00	177	0.86
4	1	10	5	10:20	0:10:00	164	0.26
5	2	0	2	13:00	0:35:00	363	0.10

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
6	1	4	3		0:15:00	148	0.53
7	1	2	3	11:00	0:30:00	462	0.91
8	1	3	4	12:00	0:20:00	306	0.08
9	2	0	7	12:45	0:15:00	257	0.72
10	1	5	8	14:00	0:25:00	389	0.40
11	1	5	3		0:10:00	293	0.37
12	1	3	5	08:30	0:35:00	116	0.26
13	1	3	3		0:15:00	354	0.30
14	1	6	2	09:00	0:30:00	365	0.32
15	1	3	8		0:10:00	200	0.66
16	2	-8	2	17:00	0:20:00	247	0.13
17	2	-9	1		0:25:00	465	0.01
18	2	-19	18		0:15:00	107	0.24
19	2	-8	0		0:10:00	446	0.87
20	2	-4	4		0:35:00	212	0.20
21	2	-4	2		0:30:00	143	0.37

El algoritmo de bloqueo de nodos no ruteables, bloqueará los siguientes nodos como se explicó en el punto 3.3.

**Tabla 20. Nodos bloqueados ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
2	1	10	7	07:40	00:15
16	2	-8	2	17:00	00:20
18	2	-19	18		00:15

Quedando los siguientes nodos para generar la ruta:

**Tabla 21. Nodos para generar rutas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
Origen	1	0	0				
3	1	8	5		0:25:00	177	0.86
5	2	0	2	13:00	0:35:00	363	0.10
6	1	4	3		0:15:00	148	0.53
7	1	2	3	11:00	0:30:00	462	0.91
11	1	5	3		0:10:00	293	0.37
13	1	3	3		0:15:00	354	0.30
14	1	6	2	09:00	0:30:00	365	0.32

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
15	1	3	8		0:10:00	200	0.66
17	2	-9	1		0:25:00	465	0.01
19	2	-8	0		0:10:00	446	0.87
20	2	-4	4		0:35:00	212	0.20
21	2	-4	2		0:30:00	143	0.37

De estos nodos el algoritmo de selección de destinos a rutear por camión del punto 3.4 seleccionará los siguientes para enrutar en el vehículo seleccionado:

**Tabla 22 Nodos para generar la primera ruta primera iteración ejemplo algoritmo generar ruta destinos seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
Origen	1	0	0				
3	1	8	5		0:25:00	177	0.86
5	2	0	2	13:00	0:35:00	363	0.10
6	1	4	3		0:15:00	148	0.53
7	1	2	3	11:00	0:30:00	462	0.91
11	1	5	3		0:10:00	293	0.37
13	1	3	3		0:15:00	354	0.30
14	1	6	2	09:00	0:30:00	365	0.32
15	1	3	8		0:10:00	200	0.66
17	2	-9	1		0:25:00	465	0.01
19	2	-8	0		0:10:00	446	0.87
20	2	-4	4		0:35:00	212	0.20
21	2	-4	2		0:30:00	143	0.37

EL nodo con la menor ventana es el 14.

**Tabla 23 Nodo menor ventana primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
14	1	6	2	09:00	0:30:00	365	0.32

Por lo cual se seleccionan los siguientes nodos para generar la primera ruta:

**Tabla 24 Nodos para rutear primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
Origen	1	0	0				

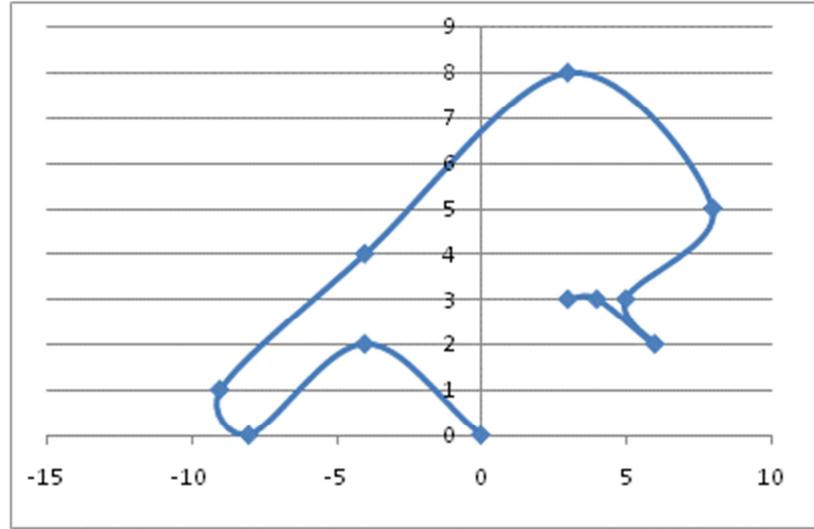
Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Peso	Volumen
3	1	8	5		0:25:00	177	0.86
5	2	0	2	13:00	0:35:00	363	0.10
6	1	4	3		0:15:00	148	0.53
7	1	2	3	11:00	0:30:00	462	0.91
11	1	5	3		0:10:00	293	0.37
13	1	3	3		0:15:00	354	0.30
14	1	6	2	09:00	0:30:00	365	0.32
15	1	3	8		0:10:00	200	0.66
17	2	-9	1		0:25:00	465	0.01
19	2	-8	0		0:10:00	446	0.87
20	2	-4	4		0:35:00	212	0.20
21	2	-4	2		0:30:00	143	0.37
<b>Totales:</b>						3.628	5.50

Una vez procesadas todas las rutas generadas por las heurísticas, la ruta con mayor número de nodos y menor distancia es la basada en la heurística ángulo máximo ángulo máximo con 4 opt del punto 2.15. Originalmente la heurística armó la siguiente ruta:

**Tabla 25 Ruta original primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	7:07:05	7:37:05
19	2	-8	0		0:10:00	4.5	1:07:05	8:44:10	8:54:10
17	2	-9	1		0:25:00	1.0	0:15:00	9:09:10	9:34:10
20	2	-4	4		0:35:00	2.0	0:30:00	10:04:10	10:39:10
15	1	3	8		0:10:00	3.2	0:47:26	11:26:36	11:36:36
3	1	8	5		0:25:00	6.7	1:40:37	13:17:13	13:42:13
11	1	5	3		0:10:00	13.9	3:28:23	17:10:36	17:20:36
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	17:41:49	18:11:49
6	1	4	3		0:15:00	5.7	1:24:51	19:36:40	19:51:40
13	1	3	3		0:15:00	2.0	0:30:00	20:21:40	20:36:40

**Figura 33. Ruta original primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados**

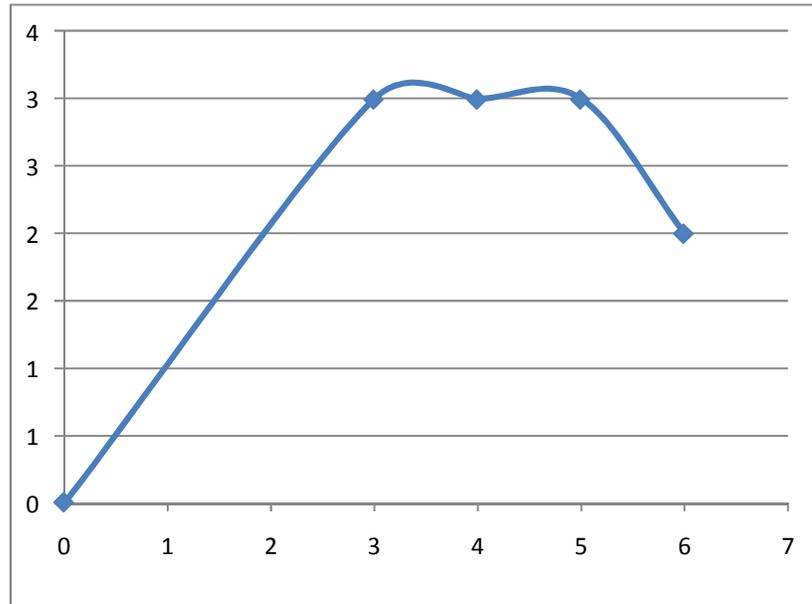


La cual fue planeada por el algoritmo en orden inverso, ajustando así el nodo con la ventana; quedando finalmente como:

**Tabla 26 Ruta ajustada primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00

**Figura 34. Ruta ajustada primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



Para el siguiente ciclo se toma como nodo de origen el último nodo ya ruteado, y su tiempo de inicio será su respectivo tiempo de salida; quedando así los siguientes nodos por rutear:

**Tabla 27 Nodos para generar la primera ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
14	1	6	2	09:00	0:30:00
3	1	8	5		0:25:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

EL nodo con la menor ventana es el 7.

**Tabla 28 Nodo menor ventana segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega
7	1	2	3	11:00	0:30:00

Por lo cual se seleccionan los siguientes nodos para continuar la generación de la primera ruta:

**Tabla 29 Nodos para rutear segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

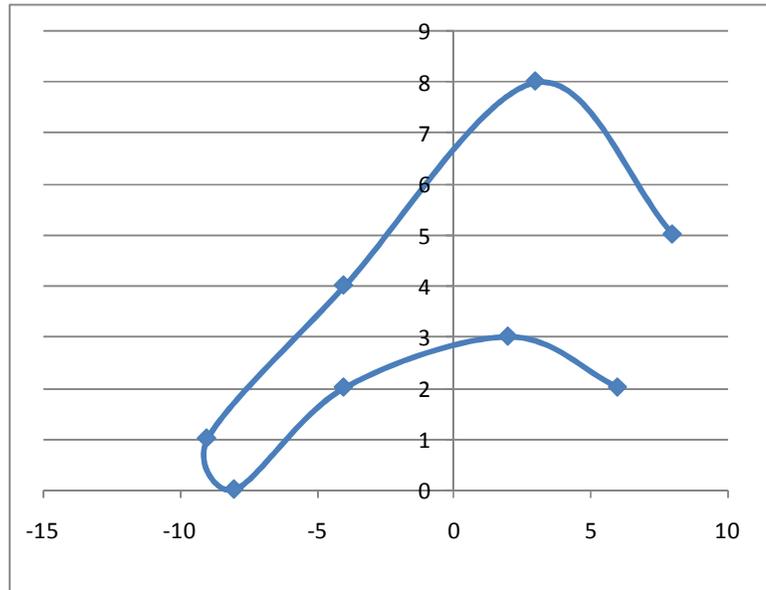
Nodo	Zona	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega
14	1	6	2	09:00	0:30:00
3	1	8	5		0:25:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

Una vez procesadas todas las rutas generadas por las heurísticas, la ruta con mayor número de nodos y menor distancia es la basada en el algoritmo de ruta perfecta del punto 1.2. Originalmente la heurística armó la siguiente ruta:

**Tabla 30 Ruta original segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
21	2	-4	2		0:30:00	6.1	1:31:14	13:01:14	13:31:14
19	2	-8	0		0:10:00	4.5	1:07:05	14:38:19	14:48:19
17	2	-9	1		0:25:00	1.4	0:21:13	15:09:32	15:34:32
20	2	-4	4		0:35:00	5.8	1:27:28	17:02:00	17:37:00
15	1	3	8		0:10:00	8.1	2:00:56	19:37:56	19:47:56
3	1	8	5		0:25:00	5.8	1:27:28	21:15:24	21:40:24

**Figura 35. Ruta original segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

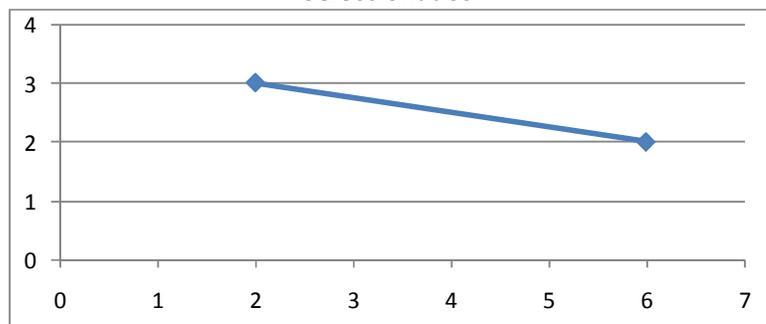


La cual fue planeada por el algoritmo en orden dado, ajustando así el nodo con la ventana; quedando finalmente como:

**Tabla 31 Ruta ajustada segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00

**Figura 36. Ruta ajustada segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



Para la siguiente iteración se tomará como nodo de origen el último nodo ya ruteado, y su tiempo de inicio será su respectivo tiempo de salida, quedando así los siguientes nodos por rutear:

**Tabla 32 Nodos para generar la primera ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
7	1	2	3	11:00	0:30:00
3	1	8	5		0:25:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

EL nodo con la menor ventana es el 5.

**Tabla 33 Nodo menor ventana tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega
5	2	0	2	13:00	0:35:00

Por lo cual se seleccionan los siguientes nodos para continuar la generación de la primera ruta:

**Tabla 34 Nodos para rutear tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega
7	1	2	3	11:00	0:30:00
3	1	8	5		0:25:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

Una vez procesadas todas las rutas generadas por las heurísticas, la ruta con mayor número de nodos y menor distancia es la basada en el algoritmo de ruta perfecta del punto 1.2. Originalmente la heurística armó la siguiente ruta:

**Tabla 35 Ruta original tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

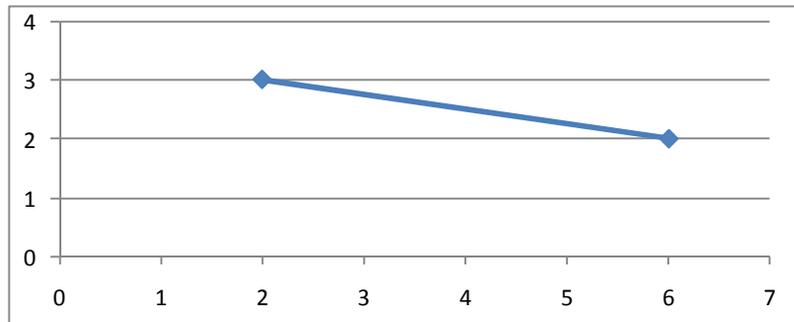
Nodo	Zona	X	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
21	2	-4	2		0:30:00	4.0	1:00:00	14:35:00	15:05:00
19	2	-8	0		0:10:00	4.5	1:07:05	16:12:05	16:22:05
17	2	-9	1		0:25:00	1.4	0:21:13	16:43:18	17:08:18
20	2	-4	4		0:35:00	5.8	1:27:28	18:35:46	19:10:46
15	1	3	8		0:10:00	8.1	2:00:56	21:11:42	21:21:42
3	1	8	5		0:25:00	5.8	1:27:28	22:49:09	23:14:09

La cual fue planeada por el algoritmo en el orden dado, ajustando así el nodo con la ventana; quedando finalmente como:

**Tabla 36 Ruta ajustada tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00

**Figura 37. Ruta ajustada tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



Para la siguiente iteración se tomará como nodo de origen el último nodo ya ruteado, y su tiempo de inicio será su respectivo tiempo de salida, quedando así los siguientes nodos por rutear:

**Tabla 37 Nodos para generar la primera ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
5	2	0	2	13:00	0:35:00

Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
3	1	8	5		0:25:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

Por lo cual no hay nodo con ventana a tener en cuenta.

Quedando los siguientes nodos para continuar la generación de la primera ruta:

**Tabla 38 Nodos para rutear cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

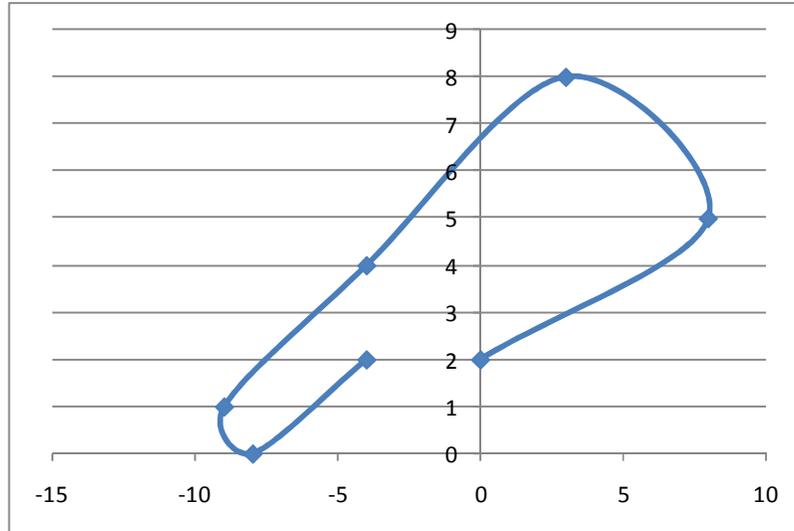
Nodo	Zona	X	y	Ventana	Tiempo de entrega
5	2	0	2	13:00	0:35:00
3	1	8	5		0:25:00
15	1	3	8		0:10:00
17	2	-9	1		0:25:00
19	2	-8	0		0:10:00
20	2	-4	4		0:35:00
21	2	-4	2		0:30:00

Una vez procesadas todas las rutas generadas por las heurísticas, la ruta con mayor número de nodos y menor distancia es la basada en la heurística es Vecino cercano con intersección y 4opt del punto 2.4 arrojando la siguiente ruta:

**Tabla 39 Ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	23:52:19	0:22:19

**Figura 38. Ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

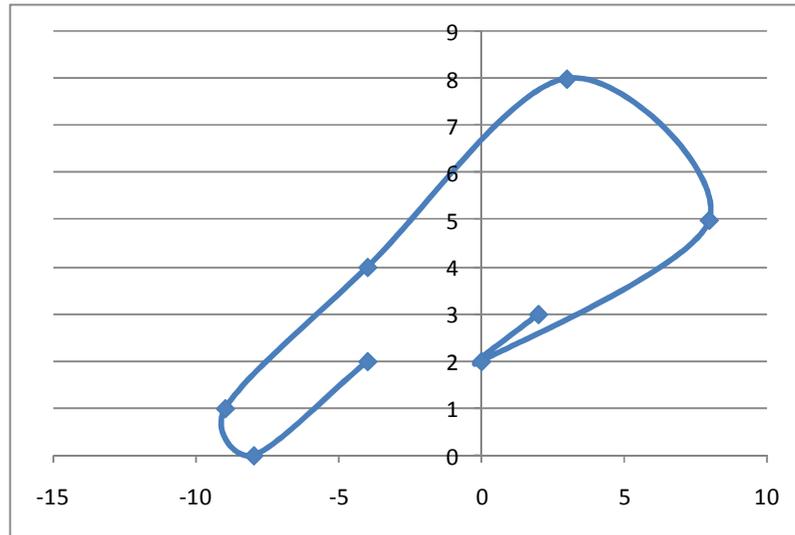


Posteriormente el algoritmo adiciona la última subruta con la penúltima subruta:

**Tabla 40 Adición de rutas primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	23:52:19	0:22:19

**Figura 39. Adición de rutas primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

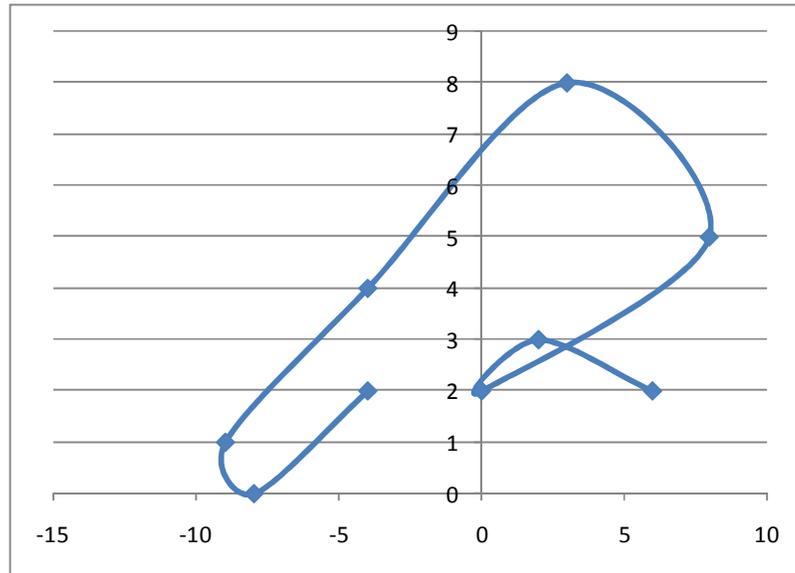


Posteriormente sigue adicionando las subrutas encontradas en orden inverso:

**Tabla 41 Adición de rutas segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	23:52:19	0:22:19

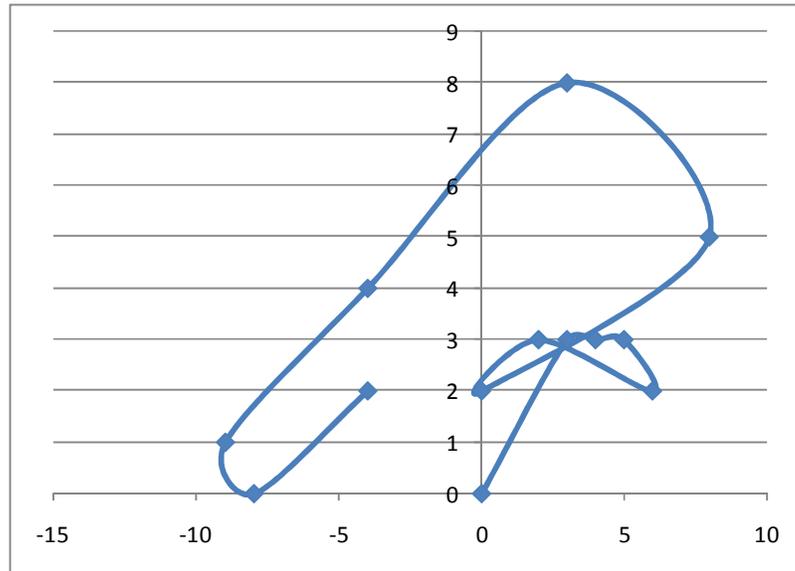
**Figura 40. Adición de rutas segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 42 Adición de rutas tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	23:52:19	0:22:19

**Figura 41. Adición de rutas tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

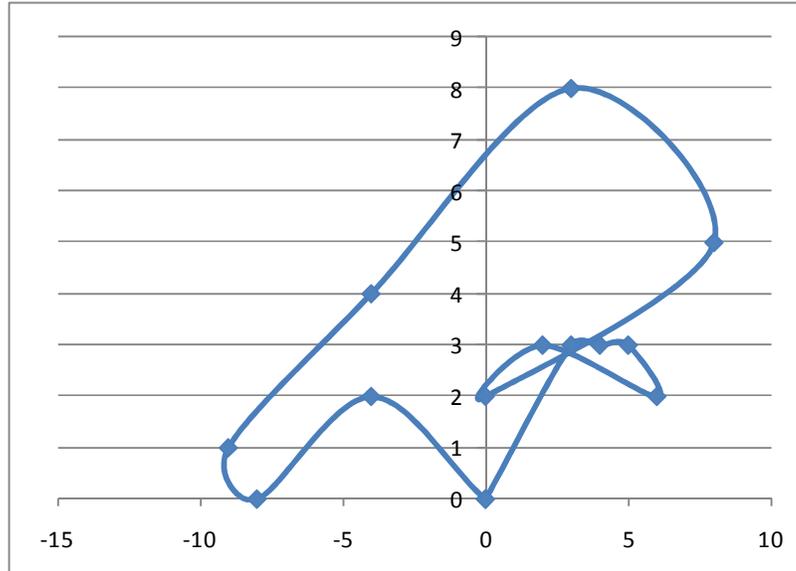


Una vez definida toda la ruta se adiciona el nodo origen para cerrar el lazo:

**Tabla 43 Adición de rutas cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
21	2	-4	2		0:30:00	4.5	1:07:05	23:52:19	0:22:19
Origen	1	0	0		0:00:00	4.5	1:07:05	1:29:24	1:29:24

**Figura 42. Adición de rutas cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

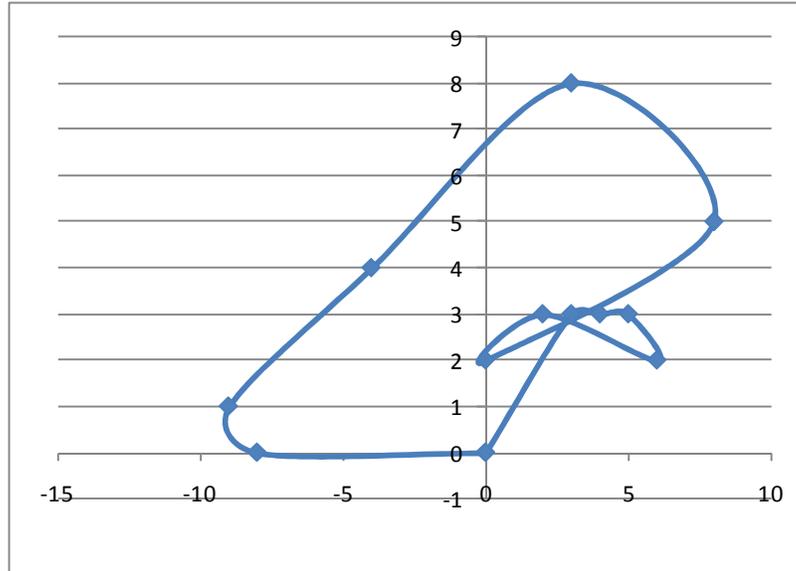


Ahora se empieza a ajustar la ruta de tal forma que la hora de arribo al nodo origen sea menor o igual a la hora de terminación ya parametrizada, eliminando de uno en uno el último nodo de la ruta:

**Tabla 44 Ajuste de ruta primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
19	2	-8	0		0:10:00	1.4	0:21:13	22:35:14	22:45:14
Origen	1	0	0		0:00:00	8.0	2:00:00	0:45:14	0:45:14

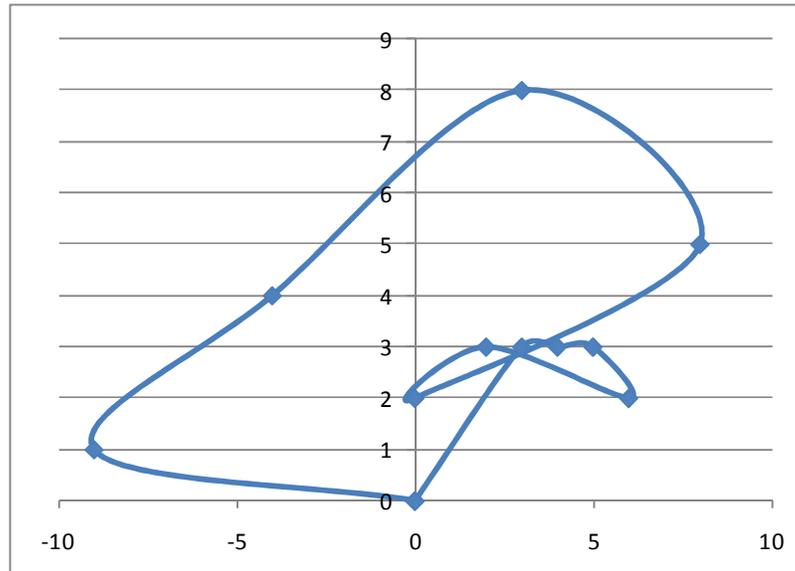
**Figura 43. Ajuste de ruta primera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 45 Ajuste de ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
17	2	-9	1		0:25:00	5.8	1:27:28	21:49:01	22:14:01
Origen	1	0	0		0:00:00	9.1	2:15:50	0:29:51	0:29:51

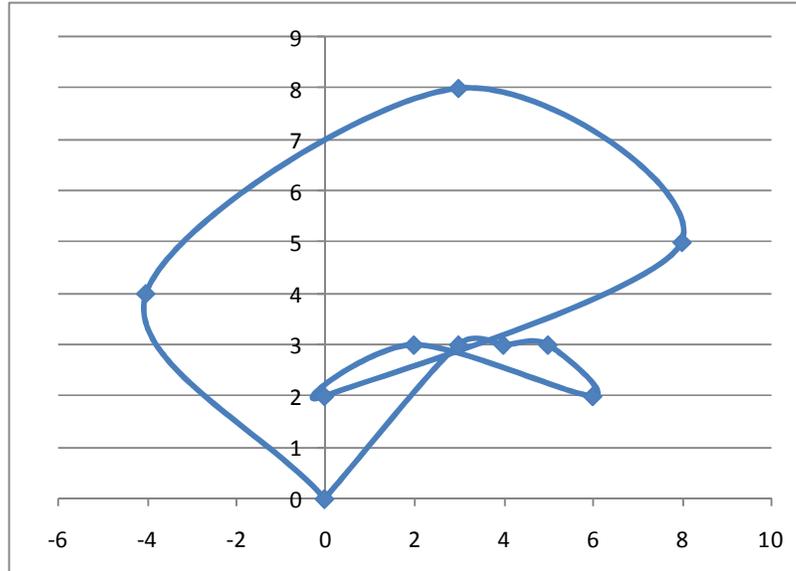
**Figura 44. Ajuste de ruta segunda iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 46 Ajuste de ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
20	2	-4	4		0:35:00	8.1	2:00:56	19:46:33	20:21:33
Origen	1	0	0		0:00:00	5.7	1:24:51	21:46:25	21:46:25

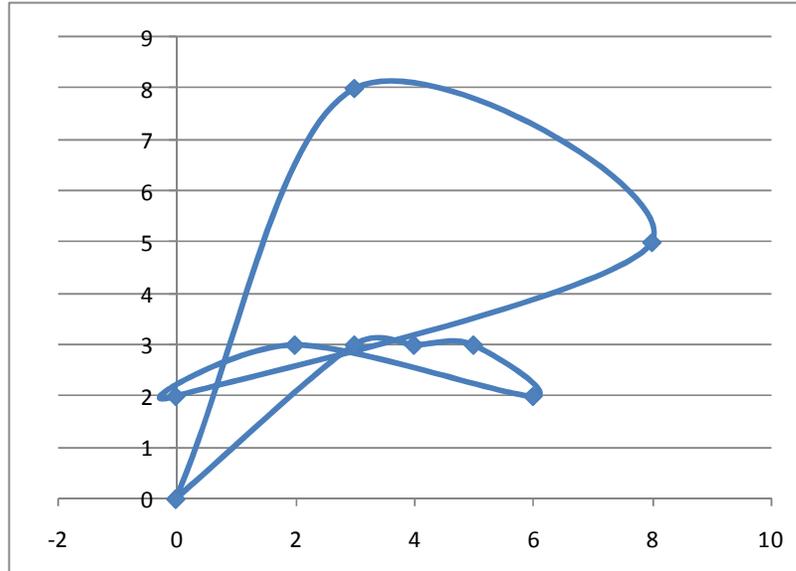
**Figura 45. Ajuste de ruta tercera iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 47 Ajuste de ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
15	1	3	8		0:10:00	5.8	1:27:28	17:35:37	17:45:37
Origen	1	0	0		0:00:00	8.5	2:08:10	19:53:47	19:53:47

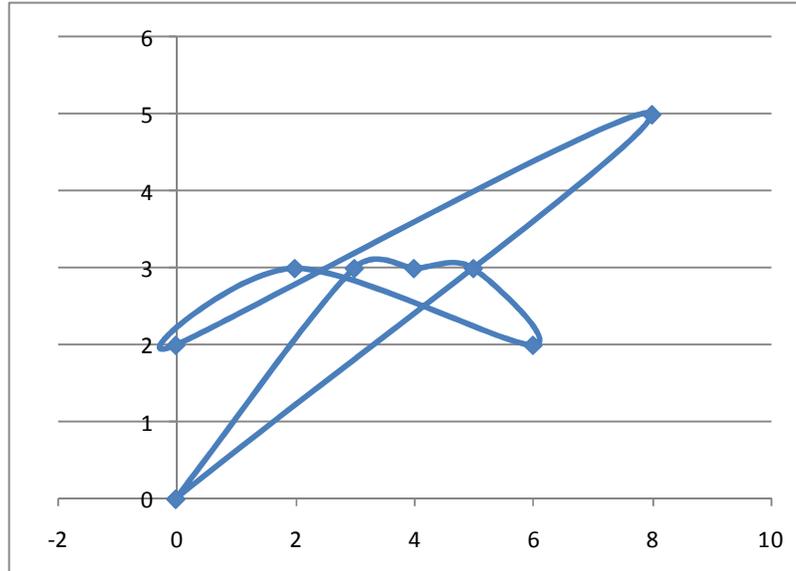
**Figura 46. Ajuste de ruta cuarta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 48 Ajuste de ruta quinta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
3	1	8	5		0:25:00	8.5	2:08:10	15:43:10	16:08:10
Origen	1	0	0		0:00:00	9.4	2:21:31	18:29:40	18:29:40

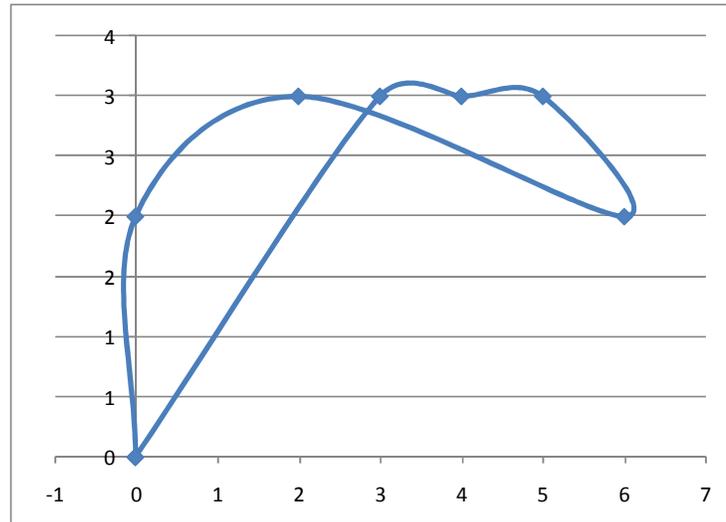
**Figura 47. Ajuste de ruta quinta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



**Tabla 49 Ajuste de ruta sexta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Nodo	Zona	x	Y	Ventana	Tiempo de entrega	Distancia Nodo Anterior	Tiempo de tránsito	Llegada	Salida
Origen	1	0	0		0:00:00	0.0	0:00:00	0:00:00	6:00:00
13	1	3	3		0:15:00	4.2	1:03:38	7:03:38	7:18:38
6	1	4	3		0:15:00	1.0	0:15:00	7:33:38	7:48:38
11	1	5	3		0:10:00	1.0	0:15:00	8:03:38	8:13:38
14	1	6	2	09:00	0:30:00	1.4	0:21:13	8:34:51	9:30:00
7	1	2	3	11:00	0:30:00	4.1	1:01:51	10:31:51	11:30:00
5	2	0	2	13:00	0:35:00	2.2	0:33:32	12:03:32	13:35:00
Origen	1	0	0		0:00:00	2.0	0:30:00	14:05:00	14:05:00

**Figura 48. Ajuste de ruta sexta iteración ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



#### **4.8 ALGORITMO GENERAL**

El siguiente es el algoritmo con el cual se rutea una red de nodos utilizando los algoritmos anteriormente descritos una vez el usuario ha diligenciado las hojas “Nodos” y “Vehículos”:

Paso: 1.Solicitar los horarios de operación.

Paso: 2.Solicitar el tiempo de desplazamiento por unidad de espacio.

Paso: 3.Eliminar los nodos que no son posibles de rutear con el algoritmo de bloqueo de nodos no ruteables del punto 3.5.

Paso: 4.Seleccionar el vehículo a rutear con el algoritmo de selección de vehículos punto 3.4.

Paso: 5. Elegir los destinos a rutear teniendo en cuenta las capacidades del vehículo seleccionado en el punto anterior con el algoritmo selección de destinos a rutear por camión del punto 3.6.

Paso: 6.Formar la ruta con el algoritmo generar ruta de los destinos seleccionados del punto 3.7.

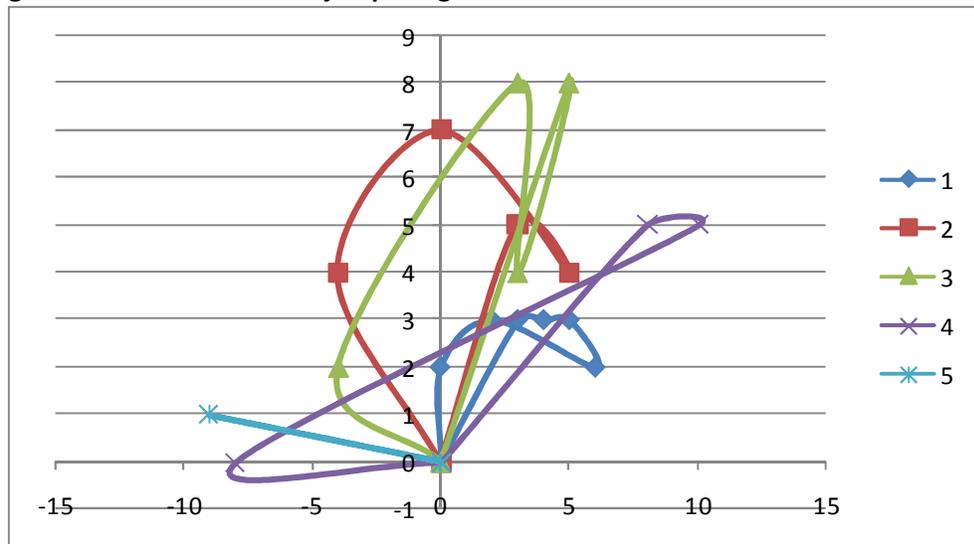
Paso: 7.Si aún quedan nodos y vehículos por rutear repita desde el paso 2.

Siguiendo el ejercicio realizado en el punto anterior, los nodos y vehículos restantes de la red son nuevamente procesados por los algoritmos, quedando formadas las siguientes rutas finalmente:

**Tabla 50 Rutas formadas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
1	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00		0.0		-	f	16	4500
1	1	13	3.00	3.00		7:03:38	0:15:00	7:18:38	0.3	0.3	354	354	f	16	4500
1	1	6	4.00	3.00		7:33:38	0:15:00	7:48:38	0.5	0.8	148	502	f	16	4500
1	1	11	5.00	3.00		8:03:38	0:10:00	8:13:38	0.4	1.2	293	795	f	16	4500
1	1	14	6.00	2.00	9:00:00	8:34:51	0:30:00	9:30:00	0.3	1.5	365	1,160	f	16	4500
1	1	7	2.00	3.00	11:00:00	10:31:51	0:30:00	11:30:00	0.9	2.4	462	1,622	f	16	4500
1	2	5	0.00	2.00	13:00:00	12:03:32	0:35:00	13:35:00	0.1	2.5	363	1,985	f	16	4500
1	1	Origen	0.00	0.00				14:05:00		2.5		1,985	f	16	4500
2	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00		0.0		-	d	14	3500
2	1	12	3.00	5.00	8:30:00	7:27:28	0:35:00	9:05:00	0.3	0.3	116	116	d	14	3500
2	1	1	5.00	4.00	10:00:00	9:38:32	0:20:00	10:20:00	0.2	0.5	159	275	d	14	3500
2	2	9	0.00	7.00	12:45:00	11:47:28	0:15:00	13:00:00	0.7	1.2	257	532	d	14	3500
2	2	20	-4.00	4.00		14:15:00	0:35:00	14:50:00	0.2	1.4	212	744	d	14	3500
2	1	Origen	0.00	0.00				16:14:51		1.4		744	d	14	3500
3	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00		0.0		-	e	12	3500
3	2	21	-4.00	2.00		7:07:05	0:30:00	7:37:05	0.4	0.4	143	143	e	12	3500
3	1	15	3.00	8.00		9:55:23	0:10:00	10:05:23	0.7	1.0	200	343	e	12	3500
3	1	8	3.00	4.00	12:00:00	11:05:23	0:20:00	12:20:00	0.1	1.1	306	649	e	12	3500
3	1	10	5.00	8.00	14:00:00	13:27:05	0:25:00	14:25:00	0.4	1.5	389	1,038	e	12	3500
3	1	Origen	0.00	0.00				16:46:31		1.5		1,038	e	12	3500
4	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00		0.0		-	g	12	3500
4	1	3	8.00	5.00		8:21:31	0:25:00	8:46:31	0.9	0.9	177	177	g	12	3500
4	1	4	10.00	5.00	10:20:00	9:16:31	0:10:00	10:30:00	0.3	1.1	164	341	g	12	3500
4	2	19	-8.00	0.00		15:10:13	0:10:00	15:20:13	0.9	2.0	446	787	g	12	3500
4	1	Origen	0.00	0.00				17:20:13		2.0		787	g	12	3500
5	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00		0.0		-	a	10	3500
5	2	17	-9.00	1.00		8:15:50	0:25:00	8:40:50	0.0	0.0	465	465	a	10	3500
5	1	Origen	0.00	0.00				10:56:40		0.0		465	a	10	3500

**Figura 49. Rutas formadas ejemplo algoritmo Generar Ruta Destinos Seleccionados.**



## 5. INFORMES GENERADOS

Con el fin de mostrar los resultados del modelo, el algoritmo presenta los siguientes informes en la hoja "Rutas Ventanas" del archivo de Excel:

### 5.1 INFORME DE RUTAS GENERADAS

En este informe se presenta las rutas generadas por el algoritmo mostrando los siguientes datos nodo a nodo:

- ✓ Ruta: Número de la ruta programada.
- ✓ Zona: Zona a la que pertenece el nodo enrutado.
- ✓ Nodo: Nombre del nodo enrutado.
- ✓ Latitud: coordenada x del nodo enrutado.
- ✓ Longitud: coordenada y del nodo enrutado.
- ✓ Ventana: Ventana horaria del nodo enrutado.
- ✓ Hora de llegada: Hora esperada de arribo del vehículo al nodo enrutado.
- ✓ Tiempo de espera: Tiempo de descargue del vehículo en el nodo enrutado.
- ✓ Hora de salida: Hora esperada de partida del nodo enrutado, en caso que el nodo tenga ventana de entrega, esta será igual a la ventana mas el tiempo de espera.
- ✓ Volumen: Volumen del pedido a entregar en el nodo enrutado.
- ✓ Volumen acumulado: Es la sumatoria del volumen de los pedidos que incluido el nodo del registro transporta el vehículo enrutado.
- ✓ Peso: Peso del pedido a entregar en el nodo enrutado.
- ✓ Peso acumulado: Es la sumatoria del peso de los pedidos que incluido el nodo del registro transporta el vehículo enrutado.
- ✓ Distancia: Es la distancia entre el nodo anterior de la ruta diseñada y el nodo del registro.
- ✓ Distancia Acumulada: Es la sumatoria de las distancias entre los nodos de la ruta diseñada hasta el registro.
- ✓ Nodo Ruta Corta: Es el nodo correspondiente a la ruta diseñada por el algoritmo si no hubiera ventanas.
- ✓ Latitud Ruta Corta: coordenada x del nodo de la ruta corta.
- ✓ Longitud Ruta Corta: coordenada y del nodo de la ruta corta.
- ✓ Distancia Ideal: es la distancia entre el nodo anterior de la ruta corta y el nodo del registro de la ruta corta.
- ✓ Distancia Acumulada Ideal: Es la sumatoria de las distancias entre los nodos de la ruta corta diseñada hasta el registro.
- ✓ Camión: Es el camión enrutado para la ruta a la cual pertenece el registro.
- ✓ Volumen Camión: Es la capacidad máxima de transporte de un vehículo dada en volumen.
- ✓ Peso Camión: Es la capacidad máxima de transporte de un vehículo dada en peso.

Para la red dada en el punto 3.7 Generar Ruta de los Destinos Seleccionados el informe presentaría la siguiente información:

**Tabla 51. Informe de rutas generadas**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión	
1	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00					0.00	0.00	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	13	3.00	3.00		7:03:38	0:15:00	7:18:38	0.30381574	0	354	354	4.24	4.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	6	4.00	3.00		7:33:38	0:15:00	7:48:38	0.53250628	1	148	502	1.00	5.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	11	5.00	3.00		8:03:38	0:10:00	8:13:38	0.36505119	1	293	795	1.00	6.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	14	6.00	2.00	9:00:00	8:34:51	0:30:00	9:04:51	0.30394766	2	365	1160	1.41	7.66	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	7	2.00	3.00	11:00:00	10:31:51	0:30:00	11:30:00	0.90673013	2	462	1622	4.12	11.78	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	2	5	0.00	2.00	13:00:00	12:03:32	0:35:00	13:35:00	0.09748095	3	363	1985	2.24	14.02	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	Origen	0.00	0.00		14:05:00		14:05:00		3		1985	2.00	16.02	0			0.00	0.00	f	16	4500	
2	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	116	116	5.83	5.83	0	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	d	14	3500
2	1	12	3.00	5.00	8:30:00	7:27:28	0:35:00	9:05:00	0.26469534	0	159	275	2.24	8.07	19	-8.00	0.00	4.47	8.94	d	14	3500	
2	1	1	5.00	4.00	10:00:00	9:38:32	0:20:00	10:20:00	0.23157801	0	159	532	5.83	13.90	17	-9.00	1.00	1.41	10.36	d	14	3500	
2	2	9	0.00	7.00	12:45:00	11:47:28	0:15:00	13:00:00	0.7223073	1	257	784	5.00	18.90	20	-4.00	4.00	5.83	16.19	d	14	3500	
2	2	20	-4.00	4.00		14:15:00	0:35:00	14:50:00	0.20397062	1	212	744	5.66	24.55	9	0.00	7.00	5.00	21.19	d	14	3500	
2	1	Origen	0.00	0.00		16:14:51		16:14:51		1		744	5.66	24.55	9	0.00	7.00	5.00	21.19	d	14	3500	
2	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	143	143	4.47	4.47	8	3.00	4.00	5.00	5.00	e	12	3500	
3	1	15	3.00	8.00		7:07:05	0:30:00	7:37:05	0.37107384	1	200	343	9.22	13.69	3	8.00	5.00	5.10	10.10	e	12	3500	
3	1	8	3.00	4.00	12:00:00	11:05:23	0:20:00	12:20:00	0.08361462	1	306	649	4.00	17.69	10	5.00	8.00	4.24	14.34	e	12	3500	
3	1	10	5.00	8.00	14:00:00	13:27:05	0:25:00	14:25:00	0.39862995	2	389	1038	4.47	22.16	15	3.00	8.00	2.00	16.34	e	12	3500	
3	1	Origen	0.00	0.00		16:46:31		16:46:31		2		1038	9.43	31.60	21	-4.00	2.00	9.22	25.56	e	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	177	177	9.43	9.43	19	-8.00	0.00	8.00	8.00	g	12	3500	
4	1	3	8.00	5.00		8:21:31	0:25:00	8:46:31	0.85944531	1	177	341	2.00	11.43	17	-9.00	1.00	1.41	9.41	g	12	3500	
4	1	4	10.00	5.00	10:20:00	9:16:31	0:10:00	10:30:00	0.25518838	1	164	787	8.00	30.12	3	8.00	5.00	17.46	26.88	g	12	3500	
4	2	19	-8.00	0.00		15:10:13	0:10:00	15:20:13	0.87431189	2	446	787	8.00	38.12	4	10.00	5.00	2.00	28.88	g	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		17:20:13		17:20:13		2		787	8.00	38.12	4	10.00	5.00	2.00	28.88	g	12	3500	
5	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	465	465	9.06	9.06	17	-9.00	1.00	9.06	9.06	a	10	3500	
5	2	17	-9.00	1.00		8:15:50	0:25:00	8:40:50	0.00540804	0	465	465	9.06	9.06	17	-9.00	1.00	9.06	9.06	a	10	3500	
5	1	Origen	0.00	0.00		10:56:40		10:56:40		0	465	465	9.06	18.11	Origen	0.00	0.00	9.06	18.11	a	10	3500	

**5.2 INFORME DE NODOS NO RUTEADOS**

Seguido del informe de las rutas generadas aparece el informe de Nodos no ruteados debido a la falta de camiones para rutear o porque fueron bloqueados para su ruteo por el algoritmo bloqueo de nodos no ruteables del punto 4.5; mostrando la siguiente información de cada uno de los nodos en la respectiva columna:

- ✓ Zona
- ✓ Nodo
- ✓ Latitud
- ✓ Longitud
- ✓ Ventana
- ✓ Tiempo de espera
- ✓ Volumen
- ✓ Peso

**Tabla 52. Informe de nodos no ruteados**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión	
1	1	Origen	0.00	0.00				6:00:00					0.00	0.00	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	13	3.00	3.00		7:03:38	0:15:00	7:18:38	0.30381574	0	354	354	4.24	4.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	6	4.00	3.00		7:33:38	0:15:00	7:48:38	0.53250628	1	148	502	1.00	5.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	11	5.00	3.00		8:03:38	0:10:00	8:13:38	0.36505119	1	293	795	1.00	6.24	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	14	6.00	2.00	9:00:00	8:34:51	0:30:00	9:30:00	0.30394766	2	365	1160	1.41	7.66	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	7	2.00	3.00	11:00:00	10:31:51	0:30:00	11:30:00	0.90673013	2	462	1622	4.12	11.78	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	2	5	0.00	2.00	13:00:00	12:03:32	0:35:00	13:35:00	0.09748095	3	363	1985	2.24	14.02	0			0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	Origen	0.00	0.00		14:05:00		14:05:00		3		1985	2.00	16.02	0			0.00	0.00	f	16	4500	
2	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	116	116	5.83	5.83	0	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	d	14	3500
2	1	12	3.00	5.00	8:30:00	7:27:28	0:35:00	9:05:00	0.26469534	0	159	275	2.24	8.07	19	-8.00	0.00	4.47	8.94	d	14	3500	
2	1	1	5.00	4.00	10:00:00	9:38:32	0:20:00	10:20:00	0.23157801	0	159	532	5.83	13.90	17	-9.00	1.00	1.41	10.36	d	14	3500	
2	2	9	0.00	7.00	12:45:00	11:47:28	0:15:00	13:00:00	0.7223073	1	257	784	5.00	18.90	20	-4.00	4.00	5.83	16.19	d	14	3500	
2	2	20	-4.00	4.00		14:15:00	0:35:00	14:50:00	0.20397062	1	212	744	5.66	24.55	9	0.00	7.00	5.00	21.19	d	14	3500	
2	1	Origen	0.00	0.00		16:14:51		16:14:51		1		744	5.66	24.55	9	0.00	7.00	5.00	21.19	d	14	3500	
2	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	143	143	4.47	4.47	8	3.00	4.00	5.00	5.00	e	12	3500	
3	1	15	3.00	8.00		7:07:05	0:30:00	7:37:05	0.37107384	1	200	343	9.22	13.69	3	8.00	5.00	5.10	10.10	e	12	3500	
3	1	8	3.00	4.00	12:00:00	11:05:23	0:20:00	12:20:00	0.08361462	1	306	649	4.00	17.69	10	5.00	8.00	4.24	14.34	e	12	3500	
3	1	10	5.00	8.00	14:00:00	13:27:05	0:25:00	14:25:00	0.39862995	2	389	1038	4.47	22.16	15	3.00	8.00	2.00	16.34	e	12	3500	
3	1	Origen	0.00	0.00		16:46:31		16:46:31		2		1038	9.43	31.60	21	-4.00	2.00	9.22	25.56	e	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	177	177	9.43	9.43	19	-8.00	0.00	8.00	8.00	g	12	3500	
4	1	3	8.00	5.00		8:21:31	0:25:00	8:46:31	0.85944531	1	177	341	2.00	11.43	17	-9.00	1.00	1.41	9.41	g	12	3500	
4	2	19	-8.00	0.00		15:10:13	0:10:00	15:20:13	0.87431189	2	446	787	8.00	30.12	3	8.00	5.00	17.46	26.88	g	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		17:20:13		17:20:13		2		787	8.00	38.12	4	10.00	5.00	2.00	28.88	g	12	3500	
5	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0	465	465	9.06	9.06	17	-9.00	1.00	9.06	9.06	a	10	3500	
5	2	17	-9.00	1.00		8:15:50	0:25:00	8:40:50	0.00540804	0	465	465	9.06	9.06	17	-9.00	1.00	9.06	9.06	a	10	3500	
5	1	Origen	0.00	0.00		10:56:40		10:56:40		0	465	465	9.06	18.11	Origen	0.00	0.00	9.06	18.11	a	10	3500	
<b>Nodos no ruteados</b>																							
1	2	10.00	7.00	7:40:00		0:15:00		0:09746355			303												
2	16	-8.00	2.00	17:00:00		0:20:00		0.1324107			247												
2	18	-19.00	18.00			0:15:00		0.24185977			107												

En caso que todos los nodos se encuentren ruteados, el informe no se publicará.

### 5.3 INFORME DE CAMIONES NO RUTEADOS

Seguido del informe de los nodos no ruteados aparece el informe de vehículos no ruteados; mostrando la siguiente información de cada uno de los camiones en la respectiva columna:

- ✓ Camión
- ✓ Volumen Camión
- ✓ Peso Camión

**Tabla 53. Informe de Vehículos no ruteados.**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión	
1	1	Origen	0.00	0.00		7:03:38	0:15:00	7:18:38	0.30381574	0	354	354	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	13	3.00	3.00		7:33:38	0:15:00	7:48:38	0.53250628	1	148	502	4.24	4.24	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	6	4.00	3.00		8:03:38	0:10:00	8:13:38	0.36505119	1	293	795	1.00	6.24	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	14	6.00	2.00	9:00:00	8:34:51	0:30:00	9:30:00	0.20304766	2	365	1160	1.41	7.66	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	7	2.00	3.00	11:00:00	10:31:51	0:30:00	11:30:00	0.50673013	2	462	1422	4.12	11.78	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	2	5	0.00	2.00	13:00:00	12:03:32	0:35:00	13:35:00	0.09748095	3	363	1985	2.24	14.02	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
1	1	Origen	0.00	0.00		14:05:00		14:05:00		3		1,985	2.00	16.02	0	0.00	0.00	0.00	0.00	f	16	4500	
2	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		0		0.00	0.00	0.00	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	d	14	3500	
2	1	12	3.00	5.00	8:30:00	7:27:28	0:35:00	9:05:00	0.26469534	0	116	116	5.83	5.83	21	-4.00	2.00	4.47	4.47	d	14	3500	
2	1	1	5.00	4.00	10:00:00	9:38:32	0:20:00	10:20:00	0.23157801	0	159	275	2.24	8.07	19	-8.00	0.00	4.47	8.94	d	14	3500	
2	2	9	0.00	7.00	12:45:00	11:47:28	0:15:00	13:00:00	0.72230793	1	257	532	5.83	13.90	17	-9.00	1.00	1.41	10.36	d	14	3500	
2	2	20	-4.00	4.00		14:15:00	0:35:00	14:50:00	0.20399762	1	212	744	5.00	18.90	20	-4.00	4.00	5.83	16.19	d	14	3500	
2	1	Origen	0.00	0.00		16:14:51		16:14:51		1		744	5.66	24.55	9	0.00	7.00	5.00	21.19	d	14	3500	
3	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		-		-	0.00	0.00	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	e	12	3500	
3	2	21	-4.00	2.00		7:07:05	0:30:00	7:37:05	0.37107384	0	143	143	4.47	4.47	8	3.00	4.00	5.00	5.00	e	12	3500	
3	1	15	3.00	8.00	12:00:00	9:55:23	0:10:00	10:05:23	0.65507915	1	200	343	9.22	13.69	3	18.00	15.00	15.10	10.10	e	12	3500	
3	1	8	3.00	4.00		11:05:23	0:20:00	12:20:00	0.08361462	1	306	649	4.00	17.69	10	5.00	8.00	4.24	14.34	e	12	3500	
3	1	10	5.00	8.00	14:00:00	13:27:05	0:25:00	14:25:00	0.39862995	2	389	1,038	4.47	22.16	15	3.00	8.00	2.00	16.34	e	12	3500	
3	1	Origen	0.00	0.00		16:46:31		16:46:31		2		1,038	9.43	31.60	21	-4.00	2.00	9.22	25.56	e	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		-		-	0.00	0.00	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	g	12	2500	
4	1	3	8.00	5.00		8:21:31	0:25:00	8:46:31	0.8594531	1	177	177	9.43	9.43	19	-8.00	0.00	8.00	8.00	g	12	3500	
4	1	4	10.00	5.00	10:20:00	9:16:31	0:10:00	10:30:00	0.25518838	1	164	341	2.00	11.43	17	-9.00	1.00	1.41	9.41	g	12	3500	
4	2	19	-8.00	0.00		15:10:13	0:10:00	15:20:13	0.87431189	2	446	787	18.68	30.12	3	8.00	5.00	17.46	26.88	g	12	3500	
4	1	Origen	0.00	0.00		17:20:13		17:20:13		2		787	8.00	38.12	4	10.00	5.00	2.00	28.88	g	12	2500	
5	1	Origen	0.00	0.00		6:00:00		6:00:00		-		-	0.00	0.00	Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	a	10	3500	
5	2	17	-9.00	1.00		8:15:50	0:25:00	8:40:50	0.00540804	0	465	465	9.06	9.06	17	-9.00	1.00	9.06	9.06	a	10	3500	
5	1	Origen	0.00	0.00		10:56:40		10:56:40		0		465	9.06	18.11	Origen	0.00	0.00	9.06	18.11	a	10	3500	
<b>Nodos no ruteados</b>																							
1	2	10:00	7:00	7:40:00		0:15:00		0:07:40:00			303									b	9	4500	
2	16	-8:00	2:00	17:00:00		0:20:00		0:13:24:00			247									c	8	1000	
2	18	-18:00	18:00			0:15:00		0:24:18:00			107									d	7	1000	
<b>Camiones no ruteados</b>																							
																					b	9	4500
																					c	8	1000
																					d	7	1000

En caso que todos los camiones se encuentren ruteados, el informe no aparecerá. Si no hay informe de nodo no ruteados, el informe de los camiones aparecerá inmediatamente después del informe de rutas generadas.

### 5.4 INFORME GRAFICO RUTAS

Además de los anteriores informes en la hoja Gráfico Rutas del archivo Excel, se encuentra la opción de graficar una a una las rutas generadas por el algoritmo y su correspondiente ruta ideal. Además de la grafica aparecerán los datos mostrados por el informe de rutas generadas del punto 4.1 para la ruta seleccionada.

Siguiendo con la red de nodos del punto 3.7 Generar Ruta de los Destinos Seleccionados, el informe arrojará las siguientes gráficas con su correspondiente tabla de datos:

**Tabla 54. Informe gráfico rutas, ruta No 1.**

Seleccione la ruta <b>1</b>																						
Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
1	1	Origen	0	0				06:00:00 a.m.		0.00	0	0	0	0	Origen	0	0	0.00	0.00	f	16	4500
1	1	13	3	3		07:03:38 a.m.	0:15:00	07:18:38 a.m.	0.30	0.30	354	354	4.24	4.24	5	0	2	2.0	2.0	f	16	4500
1	1	6	4	3		07:33:38 a.m.	0:15:00	07:48:38 a.m.	0.53	0.84	148	502	1	5.2	7	2	3	2.2	4.2	f	16	4500
1	1	11	5	3		08:03:38 a.m.	0:10:00	08:13:38 a.m.	0.37	1.20	293	795	1	6.2	13	3	3	1.0	5.2	f	16	4500
1	1	14	6	2	09:00:00 a.m.	08:34:51 a.m.	0:30:00	09:30:00 a.m.	0.32	1.52	365	1160	1.41	4.12	6	4	3	1.0	6.2	f	16	4500
1	1	7	2	3	11:00:00 a.m.	10:31:51 a.m.	0:30:00	11:30:00 a.m.	0.91	2.43	462	1622	4.12	8.24	11	5	3	1.0	7.2	f	16	4500
1	2	5	0	2	01:00:00 p.m.	12:03:32 p.m.	0:35:00	01:35:00 p.m.	0.10	2.53	363	1985	2.24	10.48	14	6	2	1.4	8.7	f	16	4500
1	1	Origen	0	0		02:05:00 p.m.		02:05:00 p.m.		2.53		1985	2	16.0	Origen	0	0	6.3	15.0	f	16	4500

Figura 50. Informe gráfico rutas, ruta No 1.

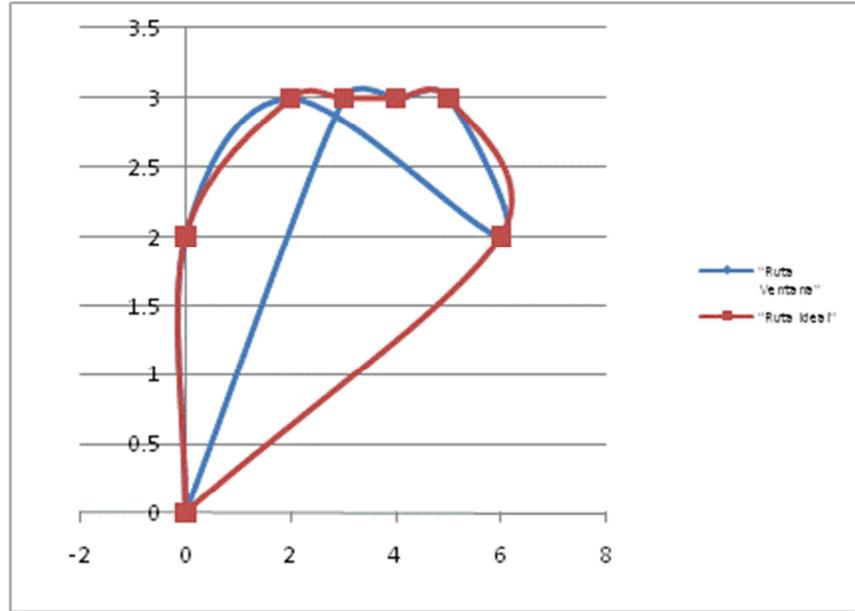
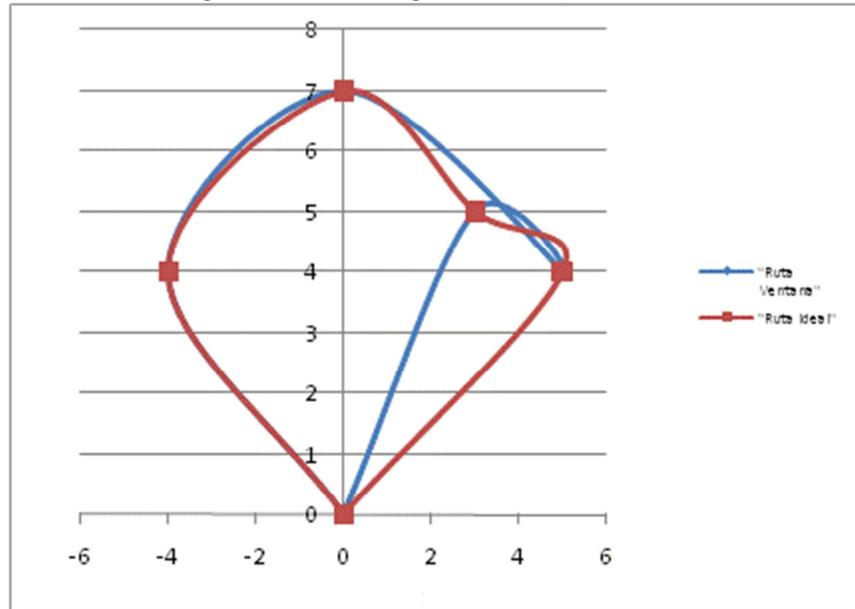


Tabla 55. Informe gráfico rutas, ruta No 2.

Seleccione la ruta **2**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
2	1	Origen	0	0			06:00:00 a.m.		0.00	0.00	0	0	0.0	0.0	Origen	0	0	0.0	0.0	d	14	3500
2	1	12	3	5	08:30:00 a.m.	07:27:28 a.m.	0:35:00	09:05:00 a.m.	0.26	0.26	116	116	5.830951895	5.8	20	-4	4	5.7	5.7	d	14	3500
2	1	1	5	4	10:00:00 a.m.	09:38:32 a.m.	0:20:00	10:20:00 a.m.	0.23	0.50	159	275	2.236067977	8.1	9	0	7	5.0	10.7	d	14	3500
2	2	9	0	7	12:45:00 p.m.	11:47:28 a.m.	0:15:00	01:00:00 p.m.	0.72	1.22	257	532	5.830951895	13.9	12	3	5	3.6	14.3	d	14	3500
2	2	20	-4	4		02:15:00 p.m.	0:35:00	02:50:00 p.m.	0.20	1.42	212	744	5	18.9	1	5	4	2.2	16.5	d	14	3500
2	1	Origen	0	0		04:14:51 p.m.		04:14:51 p.m.	1.42		744	5.656854249	24.6	Origen	0	0	6.4	22.9	d	14	3500	

Figura 51. Informe gráfico rutas, ruta No 2.

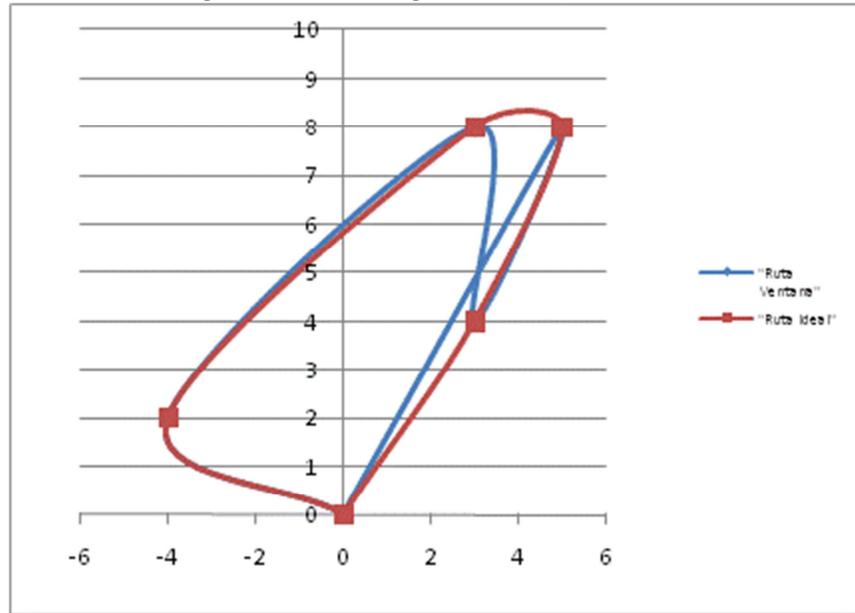


**Tabla 56. Informe gráfico rutas, ruta No 3.**

Seleccione la ruta **3**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
3	1	Origen	0	0			06:00:00 a.m.		0.00	0.00	0	0	0.0	0.0	Origen	0	0	0.0	0.0	e	12	3500
3	2	21	-4	2		07:07:05 a.m.	0:30:00	07:37:05 a.m.	0.37	0.37	143	143	4.472135955	4.5	21	-4	2	4.5	4.5	e	12	3500
3	1	15	3	8		09:55:23 a.m.	0:10:00	10:05:23 a.m.	0.66	1.03	200	343	9.219544457	13.7	15	3	8	9.2	13.7	e	12	3500
3	1	8	3	4	12:00:00 p.m.	11:05:23 a.m.	0:20:00	12:20:00 p.m.	0.08	1.11	306	649	4	17.7	10	5	8	2.0	15.7	e	12	3500
3	1	10	5	8	02:00:00 p.m.	01:27:05 p.m.	0:25:00	02:25:00 p.m.	0.40	1.51	389	1038	4.472135955	22.2	8	3	4	4.5	20.2	e	12	3500
3	1	Origen	0	0		04:46:31 p.m.		04:46:31 p.m.	1.51	1.51	1038	1038	9.433981132	31.6	Origen	0	0	5.0	25.2	e	12	3500

**Figura 52. Informe gráfico rutas, ruta No 3.**



**Tabla 57. Informe gráfico rutas, ruta No 4.**

Seleccione la ruta **4**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
4	1	Origen	0	0			06:00:00 a.m.		0.00	0.00	0	0	0.0	0.0	Origen	0	0	0.0	0.0	g	12	3500
4	1	3	8	5		08:21:31 a.m.	0:25:00	08:46:31 a.m.	0.86	0.86	177	177	9.433981132	9.4	19	-8	0	8.0	8.0	g	12	3500
4	1	4	10	5	10:20:00 a.m.	09:16:31 a.m.	0:10:00	10:30:00 a.m.	0.26	1.11	164	341	2	11.4	3	8	5	16.8	24.8	g	12	3500
4	2	19	-8	0		03:10:13 p.m.	0:10:00	03:20:13 p.m.	0.87	1.99	446	787	18.68154169	30.1	4	10	5	2.0	26.8	g	12	3500
4	1	Origen	0	0		05:20:13 p.m.		05:20:13 p.m.	1.99	1.99	787	787	8	38.1	Origen	0	0	11.2	37.9	g	12	3500

Figura 53. Informe gráfico rutas, ruta No 4.

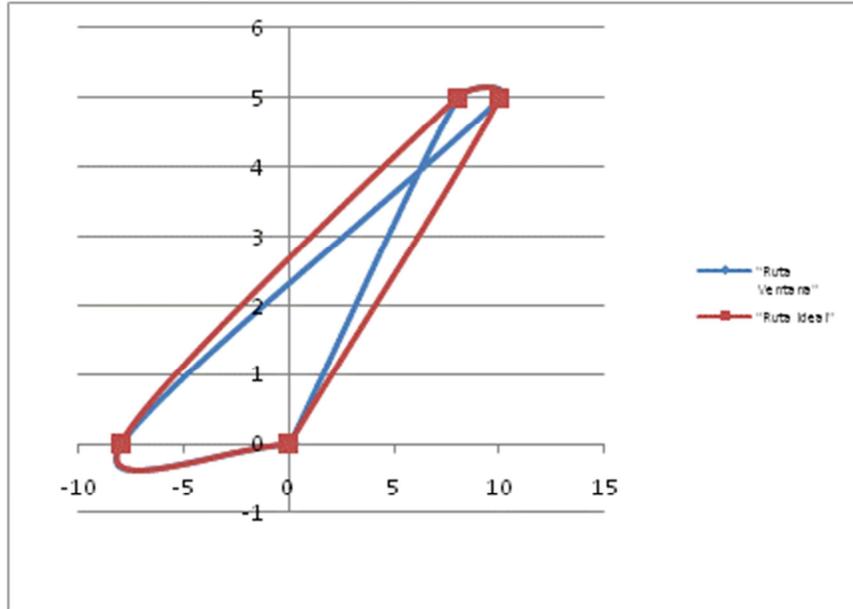
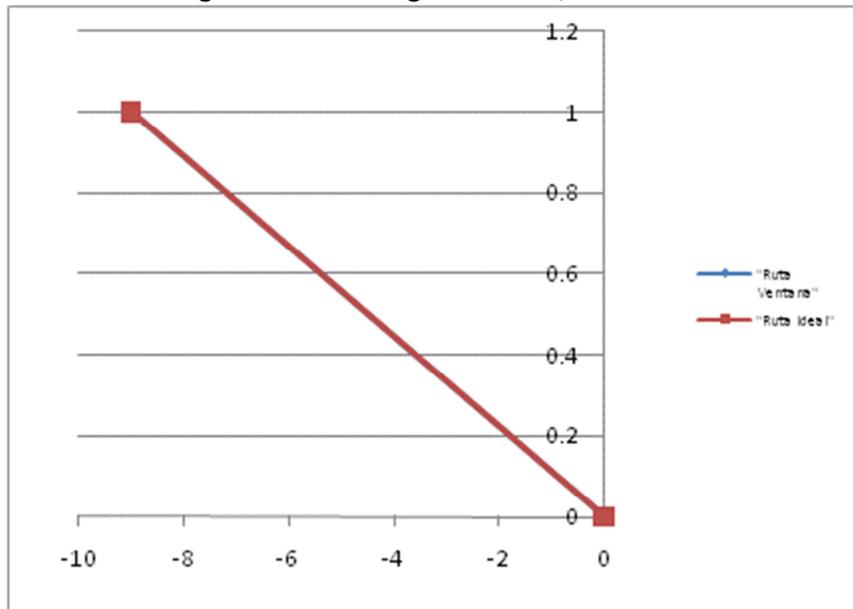


Tabla 58. Informe gráfico rutas, ruta No 5.

Seleccione la ruta **5**

Ruta	Zona	Nodo	Latitud	Longitud	Ventana	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de salida	Volumen	Volumen acumulado	Peso	Peso acumulado	Distancia	Distancia Acumulada	Nodo Ruta Corta	Latitud Ruta Corta	Longitud Ruta Corta	Distancia Ideal	Distancia Acumulada Ideal	Camión	Volumen Camión	Peso Camión
5	1	Origen	0	0				06:00:00 a.m.	0.00	0.00	0	0	0.0	0.0	Origen	0	0	0.0	0.0	a	10	3500
5	2	17	-9	1		08:15:50 a.m.	0:25:00	08:40:50 a.m.	0.01	0.01	465	465	9.055385138	9.1	17	-9	1	9.1	9.1	a	10	3500
5	1	Origen	0	0		10:56:40 a.m.		10:56:40 a.m.	0.01	0.01	465	465	9.055385138	18.1	Origen	0	0	9.1	18.1	a	10	3500

Figura 54. Informe gráfico rutas, ruta No 5.



## 6. CONCLUSIONES

- Debido a los tiempos de iteración del algoritmo de la ruta perfecta presentados en la tabla número 2 Tiempo de iteración calculado ruta perfecta, los problemas de ruteo de redes de más de 10 nodos, deben ser atacados por medio de las heurísticas, las cuales se acercan a una solución optima de una forma más ágil, que el tiempo de procesamiento del algoritmo de ruta perfecta del punto 3.2.
- De la siguiente Tabla se concluye que la heurística con más fuerza para las redes de nodos estudiadas es la Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt, la cual reúne todos los principios de las heurísticas diseñadas al aplicar el opt y la intersección para el diseño de las rutas y la propende por la forma de gota del lazo de la ruta.

**Tabla 59 Comparativo efectividad heurísticas**

Orden por 9 nodos		Orden por 10 nodos		Orden por 15 nodos		Orden por 20 nodos	
Heurística	9 Nodos	Heurística	10 Nodos	Heurística	15 Nodos	Heurística	20 Nodos
Ruta Perfercta	100%	Ruta Perfercta	NA	Ruta Perfercta	NA	Ruta Perfercta	NA
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	61%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	64%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	51%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt	48%
Ruta Angulo Angulo Opt	53%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	39%	Ruta Cercano Cercano Opt	21%	Ruta Cercano Cercano Opt	17%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	50%	Ruta Angulo Angulo Opt	36%	Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	17%	Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	16%
Ruta Cercano Cercano Opt	40%	Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	33%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	12%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	9%
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	35%	Ruta Cercano Cercano Opt	33%	Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	12%	Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	8%
Ruta Cercano Cercano Intersección Opt	34%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	30%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	10%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección Opt	6%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	30%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	28%	Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	10%	Ruta Angulo Cercano Opt	6%
Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	26%	Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	26%	Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	9%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	6%
Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	26%	Ruta Angulo Cercano Opt	26%	Ruta Angulo Cercano Opt	9%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección Opt	6%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	25%	Ruta Angulo Cercano Intersección Opt	25%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	9%	Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	6%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	25%	Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	25%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	8%	Ruta Angulo Angulo Intersección Opt	5%
Ruta Lejano Angulo Intersección Opt	25%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección Opt	25%	Ruta Angulo Angulo Opt	7%	Ruta Cercano Cercano	2%
Ruta Cercano Cercano	19%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Opt	21%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	7%	Ruta Cercano Cercano Intersección	2%
Ruta Angulo Cercano Opt	19%	Ruta Cercano Cercano Intersección	13%	Ruta Cercano Cercano Intersección	6%	Ruta Angulo Angulo Opt	1%
Ruta Cercano Cercano Intersección	18%	Ruta Cercano Cercano Intersección	12%	Ruta Cercano Cercano Intersección	4%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Opt	1%
Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	15%	Ruta Angulo Cercano Intersección	9%	Ruta Angulo Cercano Intersección	2%	Ruta Angulo Cercano Intersección	1%
Ruta Angulo Mínimo Cercano	13%	Ruta Angulo Mínimo Cercano	7%	Ruta Angulo Cercano Intersección	1%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	1%
Ruta Angulo Cercano Intersección	9%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	7%	Ruta Angulo Mínimo Cercano	1%	Ruta Angulo Mínimo Cercano	1%
Ruta Angulo Cercano	6%	Ruta Angulo Cercano Intersección	6%	Ruta Angulo Mínimo Cercano Intersección	1%	Ruta Angulo Cercano	1%
Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	6%	Ruta Angulo Angulo Intersección	3%	Ruta Angulo Angulo Intersección	0%	Ruta Angulo Angulo Intersección	0%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	4%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	3%	Ruta Lejano Angulo Intersección	0%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	0%
Ruta Lejano Angulo Intersección	3%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	3%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	0%	Ruta Angulo Angulo	0%
Ruta Angulo Angulo Intersección	2%	Ruta Lejano Angulo Intersección	2%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo Intersección	0%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	0%
Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	2%	Ruta Angulo Angulo	2%	Ruta Angulo Angulo	0%	Ruta Lejano Angulo Intersección	0%
Ruta Angulo Angulo	0%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	2%	Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	0%	Ruta Lejano Angulo Mínimo Intersección	0%
Ruta Angulo Mínimo Angulo Mínimo	0%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	2%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	0%	Ruta Lejano Doble Angulo Intersección	0%

- La heurística Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt, a pesar de ser de ser la heurística con mayor efectividad, no es la de mayor tiempo de procesamiento, situándose este siempre por debajo del promedio de tiempo entre todas las heurísticas de una determinada red.
- Se observa también que las heurísticas con opt son las que presentan mayor efectividad en la consecución de las rutas cortas.
- Siguiendo con el análisis de la tabla 59, también se observa que todas las heurísticas fueron efectivas para el caso de las redes de 10 nodos, por lo cual no es imperativo el descarte de ninguna de ellas en el procesamiento de datos con el fin de disminuir los tiempos de procesamiento.
- Entre mayor es el número de nodos de las redes a procesar la efectividad de cada heurística disminuye, en el caso de las redes de 9 nodos 12 de las heurísticas tenían una efectividad de más del 20 % y para las redes de 20 nodos solo la heurística de Ruta Lejano Doble Angulo Intersección Opt cumple con esa condición.
- De la Tabla 4 Número de heurísticas con la ruta corta, se observa que para redes pequeñas, muchas de las heurísticas confluyen en la misma solución, en la red de 9 nodos en el 59% de las redes ruteadas 5 o más heurísticas diseñaron la ruta más corta, sin embargo para las redes de 20 nodos solamente el 1% de las redes cumplió esta condición.
- Las rutas cortas diseñadas por las heurísticas para una red de nodos son altamente modificadas cuando hay presencia de nodos con ventanas horarias, y es por esto que se presentan cruces en los lazos diseñados.
- Debido al diseño del algoritmo, este da mayor eficiencia a los primeros camiones ruteados que son los que más destinos llevan y su ruta es más larga, pero debido a la desviación provocada por las ventanas horarias, los últimos camiones son ruteados con pocos nodos con ventanas que se cruzaban con las ventanas de los nodos ya ruteados, siendo su ruta de menor tamaño, más rápida en su desarrollo y el aprovechamiento del vehículo menor en peso y volumen.

## 7. RECOMENDACIONES

Como evolución del algoritmo se pueden implementar los siguientes puntos:

- Las iteraciones de la ruta perfecta deberían tener en cuenta la longitud de la ruta al agregar cada nodo con el fin de salir del ciclo en el momento que la ruta sea mayor a la ruta mínima hallada en iteraciones anteriores.
- Para las rutas finales que vienen siendo las rutas con pocos nodos y de menores tiempos de desplazamiento, se deberían utilizar los vehículos de menor tamaño, que vendrían siendo los de menor costo de operación. Además a dichos vehículos se les debe asignar una ruta dos a más veces, aumentando la utilización diaria de la flota de vehículos disponible.
- Se pueden generar las rutas en forma paralela con el fin de mejorar la densidad de los nodos por camión ruteado.
- Para el caso de los cruces de los lazos debido a las ventanas horarias, se podrían atacar con un algoritmo que los detecte y dependiendo si tiene ventana o no, los ubique en una posición posterior de la ruta o los incluya en otra ruta.
- Igualmente para las ventanas se pueden renegociar con los destinatarios los horarios de entrega con el fin de mejorar los diseños de las rutas.
- Colocar tiempos de desplazamiento por zona con el fin de mejorar los cálculos del algoritmo.
- Para las zonas lejanas y de baja densidad de nodos se deben utilizar medios alternativos como lo son el uso de otras transportadoras, motorizados, entregas en muelle, etc.
- Igualmente se puede explorar la posibilidad de realizar recogidas de pedidos durante la ruta de los vehículos con el fin de optimizar la utilización de los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN ICONTEC, Trabajos Escritos: presentación y referencias bibliográficas. Bogotá D.C. ICONTEC, 2010.

BALLOU, Ronald H. Logística administración de la cadena de abastecimiento. México, Pearson Educación. 2004.

HAKSERVER C., RENDER B, RUSELL R, MURDICK R. Service Management and Operations. Prentice Hall. 2000.

TORRES DELGADO José Fidel, GONZALES BUTRÓN Edgar. Un caso real en Colombia de aplicación de Heurísticas en el Problema de Programación de rutas para Helicópteros.

LÓPEZ PÉREZ Jesús Fabián, BADIH Mohammad H. Algoritmo genético para un problema de ruteo con entrega y recolección de producto con restricciones de ventana de horario. Ciencia UANL, abril – junio, año/vol. VIII número 002, Universidad Autónoma de Nuevo León. "005

MANQUERA N.G., ABENSUR D., PARRACHO A., Logística inversa y ruteo de vehículos: Búsqueda dispersa aplicada al problema de ruteo de vehículos con colecta y entrega simultanea. Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro, Zaragoza. 2007.