

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN
EN MATERIALES S.A. DE C.V.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“Optimización de rutas de transporte en redes de distribución LTL
(Less-Than-Truckload), mediante Algoritmo Genético Heurístico”**

TESIS

Para obtener el Grado Académico de

**Maestra en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial y de
Manufactura**

PRESENTA:

Mariana Sánchez Barrientos

Lugar y fecha:

Saltillo, Coahuila

29 de Septiembre de 2017

“Optimización de rutas de transporte en redes de distribución LTL (Less-Than-Truckload), mediante Algoritmo Genético Heurístico”

Por:

Mariana Sánchez Barrientos

TESIS

Presentada al Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología

Sede

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C. V.

Como requisito parcial para obtener el Grado Académico de

Maestra en Ciencia y Tecnología

en Ingeniería Industrial y de Manufactura

Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA/CONACYT

Lugar y fecha

Saltillo, Coahuila

29 de Septiembre 2017

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES S.A.
DE C.V.
GERENCIA DE DESARROLLO HUMANO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los abajo firmantes miembros del comité tutorial recomendamos que la Tesis “OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN LTL (LESS-THAN-TRUCKLOAD), MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO HEURÍSTICO” realizada por la alumna Mariana Sánchez Barrientos, matrícula 1506IM1120 sea aceptada para su defensa como Maestra en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial y de Manufactura.

El Comité tutorial:

Tutor académico
Directora de tesis
Dra. Pamela Chiñas Sánchez

Cotutor académico
Co-director de tesis
Dr. Elías G. Carrum Siller

Vo.Bo.
Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador General de Estudios de Posgrado
COMIMSA

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES S.A.
DE C.V.
GERENCIA DE DESARROLLO HUMANO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Grado de la alumna Mariana Sánchez Barrientos, una vez leída y revisada la Tesis titulada “OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN LTL (LESS-THAN-TRUCKLOAD) MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO HEURÍSTICO”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 29 días del mes de Septiembre del año 2017.

Dr. Juan Pablo Nieto González

Presidente

Dra. Pamela Chiñas Sánchez

Secretario

Dr. Pedro Pérez Villanueva

Vocal

DEDICATORIA

*Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente;
no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios
estará contigo en donde quiera que vayas.*

Josué 1:9. RV1960

Para mi grande y verdadero Dios, a él sea la gloria hoy y siempre. Porque me ha amado tanto que se entregó por mí y me ha dado más de lo que necesito solo por amor, que nunca me ha dejado porque ha estado conmigo, me ha sustentado en cada prueba y me ha librado del desierto, porque ha sido fiel y su palabra ha permanecido en mi vida. Porque es por Él y para Él, la honra y la gloria. A Él está dedicada esta tesis y mi vida entera. Gracias maravilloso Dios Todopoderoso, te amo con todo mi ser.

Para mis padres Maximino Sánchez y Gabriela Barrientos, mi más grande ejemplo de lucha y por su amor hacia nuestra familia. Los amo grandemente y estaré siempre agradecida con Dios por dármeles como padres. Siempre han sido un motor en mi vida y sin su apoyo, este difícil sueño no se habría convertido en una realidad.

Para ti mi amor, que llegaste justo a mitad de camino. Llegaste sin esperar nada, llegaste sin pretender nada y ahora estas a mi lado, siempre motivándome para terminar lo que se empezó, siempre enseñándome y poniendo mis pies en la tierra para afrontar la adversidad. Porque Dios cumplió su promesa al ponerte en mi vida, Dios cumplió las peticiones de mi corazón (Salmos 37:4, RV 1960), te amo Heriberto Rodríguez Castañeda.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional en Ciencia y Tecnología (CONACYT), por creer en mí, por permitirme ser parte de este programa que impulsa el talento mexicano en el desarrollo de profesionistas y por apoyarme en la decisión tomada al brindarme el apoyo económico para mi sustento.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), por aceptarme y darme la oportunidad de desarrollarme en este proyecto de maestría y dar con esto, un paso más hacia mi desarrollo profesional.

A la Dra. Pamela Chiñas, por la valentía y profesionalismo al tomar el reto en la recta final de este proyecto y brindarme su apoyo cuando estaba a punto de claudicar.

A mi familia completa Maximino Sánchez y Gabriela Barrientos, mis padres. Melissa, Max y Gaby, mis hermanos que siempre han estado presentes en mi corazón y a mis sobrinos Luis Ángel y Diana, por aguantarme en los momentos más difíciles. Los amo.

A la Iglesia Bautista Misionera Shalom y a los hermanos pertenecientes, por formar parte de mi familia, por darme su cariño y estar siempre al pendiente de mis necesidades. A mis líderes, consejeros y grandes amigos Alfredo y Rocío Téllez, que desde que los conocí me amaron y han estado cerca de mí desde entonces, gracias por animarme, apoyarme y exhortarme siempre de acuerdo con la palabra de Dios, gracias por estar ahí en los momentos más difíciles y ser testigos de las respuestas de Dios en mi vida. A los chicos de la célula de profesionistas y en general a los jóvenes que han marcado mi vida con las suyas, porque han sido parte de mis tribulaciones y son de gran bendición en mi vida.

Agradezco a cada uno de los doctores que formaron parte del desarrollo de todo este proyecto, gracias por transmitir sus enseñanzas a lo largo de todo este tiempo, por la

paciencia y dedicación al enseñar y por todo el trabajo que algunos días fue más duro que otro, pero siempre con el fin de crecimiento.

Por último, agradezco a todas las personas que no menciono sus nombres pero que han estado presentes en toda esta etapa de mi vida, que me vieron crecer desde el comienzo de la ingeniería y que continuaron hasta esta etapa de posgrado, algunas ya no están permanecen en mi corazón. Dios bendiga sus vidas.

SÍNTESIS

Debido a la importancia del transporte por carretera para el movimiento de embarques en la industria automotriz, la presente investigación describe un problema presente en redes de transporte LTL (Less-Than-truckload), donde los embarques son de pequeño a mediano tamaño y requieren la consolidación de diferentes cargas para minimizar los costos de envío.

Se realiza una extensa revisión de los problemas que enfrenta este tipo de transporte visto como un CVRP (Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado) y de las formas de solución utilizadas en la actualidad.

Además, se presenta la modelación científica de diferentes estrategias empleadas para este transporte de embarques, que tienen como objetivo reducir los costos de envío. Contemplando también las diferentes composiciones de costos partiendo del uso de este transporte como un servicio subcontratado.

Con base en la composición de costos mencionada y en la gran cantidad de variables que intervienen en este problema, se propone el uso de técnicas de aproximación como las técnicas de Soft Computing, las cuales no garantizan encontrar una solución óptima al problema pero si encuentran una solución factible en términos de tiempo de computación. Específicamente, para el caso de estudio se abordan los Algoritmos Genéticos, mediante el cual se seleccionan las rutas de transporte partiendo de diversas características.

Esta investigación contribuye al cuerpo de conocimientos acerca de este servicio de transporte donde se mueven cargas pequeñas con el objetivo de reducir los costos de transporte.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	5
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1.1. CASO DE ESTUDIO.....	6
1.1.2. PROBLEMÁTICA.....	10
1.2. OBJETIVOS.....	13
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	14
1.4. HIPÓTESIS	14
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	15
CAPÍTULO II	16
2.1. MARCO TEÓRICO	16
2.1.1. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS	16
2.1.2. MODELO GENERAL DEL VRP	19
2.1.3. ALGORITMO GENÉTICO.....	20
2.2. ESTADO DEL ARTE	25
2.3. METODOLOGÍA	36
2.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	37
CAPÍTULO III.....	39
3.1. EXPERIMENTACIÓN	39
3.1.1. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	39

3.1.2. COMPARACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS CON OTRAS PLATAFORMAS O SOFTWARE.....	40
3.1.3. CREACIÓN DE MATRICES DE DISTANCIAS Y COSTOS	48
3.1.4. MODELO CIENTÍFICO DE ESTRATEGIAS	49
3.1.5. CODIFICACIÓN DEL MODELO	54
3.1.6. OPTIMIZACIÓN CON ALGORITMO GENÉTICO HEURÍSTICO.....	63
CAPÍTULO IV	75
4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	75
CAPÍTULO V	79
5.1. APORTACIÓN	79
5.2. ALCANCES	79
5.3. LIMITACIONES.....	80
CONCLUSIONES	81
TRABAJO FUTURO.....	86
ANEXOS	87
BIBLIOGRAFÍA	106

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Esquemas de envío Origen-Destino. Fuente: elaboración propia.	7
Ilustración 2. Red de distribución para envíos LTL. Fuente: elaboración propia.	9
Ilustración 3. Ejemplo de codificación binaria de un solo individuo.	24
Ilustración 4. Ejemplo de codificación de permutación de un solo individuo.	24
Ilustración 5. Tipo de red I (Barcos et al., 2010).	26
Ilustración 6. Tipo de red II (Barcos et al., 2010).	27
Ilustración 7. Red de transporte con centro de carga (Musa et al., 2010).....	28
Ilustración 8. Concepto de centro de carga o crossdocking (Liao & Shih, 2010).....	29
Ilustración 9. Tres tipos de envío LTL (Hosseini et al., 2014).	30
Ilustración 10. Metodología. Fuente: elaboración propia.	36
Ilustración 11. Estaciones de servicio	40
Ilustración 12. Ubicación de proveedores, CC y CD.	40
Ilustración 13. Ubicación de los 7 proveedores y CC.	41
Ilustración 14. Consideraciones de las órdenes de recolección.	41
Ilustración 15. Órdenes de recolección y envío.	41
Ilustración 16. Consideraciones de los vehículos.	42
Ilustración 17. Ingreso de vehículos de recolección.	42
Ilustración 18. Distribución de rutas.	43
Ilustración 19. Resultados de rutas (distancia-costos).	43
Ilustración 20. Detalle resultados de rutas.	44
Ilustración 21. Distribución de rutas.	45
Ilustración 22. Distribución de rutas 2.	45
Ilustración 23. Resultados de rutas (distancia-costos).	45
Ilustración 24. Detalle resultados de rutas	46
Ilustración 25. Composición genotípica de la población	58
Ilustración 26. Codificación de ED (ejemplo 1)	58
Ilustración 27. Codificación de ED y EI (ejemplo 2).	59
Ilustración 28. Codificación de EMR (I) (ejemplo 3).....	59

Ilustración 29. Codificación de EMR (II) (ejemplo 4).....	59
Ilustración 30. Individuo de la población seleccionada	61
Ilustración 31. Máscara generada.....	61
Ilustración 32. Hijo generado.....	61
Ilustración 33. Hijo generado mediante el cruce.....	61
Ilustración 34. Hijo mutado.....	62
Ilustración 35. Gráfica de convergencia AGI. Orden 1.	65
Ilustración 36. Gráfica de convergencia AGII. Orden 1.	65
Ilustración 37. Gráfica de convergencia AGI. Orden 2.	67
Ilustración 38. Gráfica de convergencia AGII. Orden 2.	67
Ilustración 39. Gráfica de convergencia AGI. Orden 3.	69
Ilustración 40. Gráfica de convergencia AGII. Orden 3.	69
Ilustración 41. Gráfica de convergencia AGI. Orden 4	71
Ilustración 42. Gráfica de convergencia AGII. Orden 4	71
Ilustración 43. Gráfica de convergencia AGI. Prueba 5.	73
Ilustración 44. Gráfica de convergencia AGII. Prueba 5.....	73

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Reporte de envíos enero 2016. Fuente: QSL	87
Anexo 2. Tabla de órdenes de embarques 7 de Abril 2016	88
Anexo 3. Tabla de horas de recolección de embarques por proveedor	88
Anexo 4. Tabla de comparación de resultados	88
Anexo 5. Tabla de horas de recolección de embarques por proveedor	88
Anexo 6. Comparación de resultados	89
Anexo 7. Matriz proveedor-CD. Fuente: elaboración propia.	89
Anexo 8. Matriz de costos proveedor Centro de Distribución	90
Anexo 9. Matriz proveedor-CC. Fuente: elaboración propia.	91
Anexo 10. Matriz Proveedor-Proveedor. Fuente: elaboración propia.	92
Anexo 11. Código para la Función de evaluación	93
Anexo 12. Resultados experimento 1 pruebas pequeñas	98
Anexo 13. Resultados experimento 2 pruebas pequeñas	99
Anexo 14. Resultados experimento 3 pruebas pequeñas	100
Anexo 15. Resultados experimento 4 pruebas pequeñas	101
Anexo 16. Resultados experimento 5 pruebas pequeñas	102
Anexo 17. Carta de aceptación de memorias del congreso WIEM	103
Anexo 18. Artículo 1: presentado en congreso CiLOG	104
Anexo 19. Artículo 2: presentado en congreso CiLOG	105

NOMENCLATURA

TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
PIB	Producto Interno Bruto
QSL	QUIMMCO Servicios Logísticos
SISAMEX	Sistemas Automotrices de México
FTL	Full Truckload
LTL	Less-Than-truckload
VRP	Vehicle Routing Problem
CVRP	Capacited Vehicle Routing Problem
CCC	Centro de Consolidación de Carga
CDD	Centro De Distribución
ED	Envío Directo
EI	Envío Indirecto
EC	Envío Combo
EMR	Envío MilkRun
CD	Centro de Distribución
CC	Centro de Consolidación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MDVRP	Multi Depot Vehicle Routing Problem
PVRP	Period Vehicle Routing Problem
SDVRP	Split Delivery Vehicle Routing Problem
SVRP	Stochastic Vehicle Routing Problem
VPPD	Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery
MFVRP	Mix Fleet Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
AG	Algoritmo Genético
AGG	Algoritmo Genético Generacional
AGNGE	Algoritmo Genético No Generacional Elitista

AGI	Algoritmo Genético Generacional
AGII	Algoritmo Genético No Generacional Elitista
NTI	Número Total de Individuos
NTGEN	Número Total de Generaciones
PC	Probabilidad de Cruce
PM	Probabilidad de Mutación

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz es un importante sector económico que ha crecido a un ritmo acelerado durante las pasadas décadas. En sus inicios, se requerían aproximadamente 3,000 componentes para el ensamble de un automóvil, pero hoy en día, la realidad refleja que esta cifra ha aumentado a los 20,000 componentes para el ensamble de este producto (considerando que esta cifra varía de acuerdo con el tipo de automóvil y/o de la empresa productora) (Cedillo, 2015).

Lo anterior se debe a que día con día, la demanda para la fabricación de automóviles crece, dados los diferentes requerimientos de compra del cliente. Incrementado con esto no solo el volumen de producción, sino también la variedad del producto (Kotzab et al., 2009).

Este importante sector industrial está conformado por una gran cantidad de compañías, las cuales abarcan principalmente las plantas de ensamble (Mortimor et. al., 2005), e incorpora todas aquellas empresas que participan directa o indirectamente en la fabricación de un automóvil. Particularmente en América, estas industrias forman parte de un sector productivo sustentado por el TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte). En los acuerdos de este tratado, las empresas tanto proveedoras y clientes que pertenecen a este sector, trabajan en conjunto para importar y exportar, de forma conveniente, partes de todo el proceso productivo de este producto, aunque se encuentren ubicados en los diferentes países que están dentro del tratado (Estados Unidos, México y Canadá).

Debido a lo anterior, la industria automotriz es considerada como un pilar económico no solo para los países anteriormente mencionados dentro del TLCAN, sino para cualquier país en el cual se lleve a cabo esta actividad económica (Miranda, 2007). Este es un resultado que refleja la fabricación de un automóvil, ya que principalmente se requieren diversas actividades económicas que traen consigo múltiples beneficios como la generación de empleos a gran escala, la capacitación al personal, la modernización económica de las ciudades, el desarrollo de proveedores locales e internacionales, por mencionar algunos (Mesa & Ukkusuri, 2013).

Según cifras de la Secretaría de Economía (SE, Informe, 2012), solo en México la Industria automotriz representa uno de los sectores económicos más importantes del país, por ser uno de los elementos primordiales para la modernización y globalización.

Dentro del sector automotriz, una de las actividades logísticas más importantes para esta industria es el traslado o transporte de materiales (ya sea materia prima, material en proceso o producto final). Esta actividad es un elemento clave en la competitividad del sector (Mesa & Ukkusuri, 2013) puesto que, como se mencionó anteriormente esta industria está conformada por eslabones de diferentes empresas que trabajan en conjunto para cumplir con el objetivo en la fabricación de un automóvil (Ávila Pompa, 2013).

De acuerdo con lo anterior, es importante considerar que se debe realizar una adecuada planeación de ese transporte para lograr un abastecimiento correcto de cada uno de los materiales necesarios entre estas empresas o el abastecimiento correcto entre los proveedores de los mismos. Con abastecimiento, se hace referencia al suministro entre empresas tanto de materia prima, de material en proceso o de producto terminado dependiendo de la parte de la cadena de suministro (eslabón del sector) en la cual se requiera. Como ya se mencionó, dentro de la planeación del abastecimiento es importante considerar como elemento clave el transporte de estos materiales, puesto que es uno de los puntos principales de exigencia del cliente (ya sea un cliente interno o externo), primordialmente porque refleja la competitividad de las mismas empresas o del sector automotriz en general.

En ese contexto, la planeación del transporte de materiales o mercancías es un factor clave en la coordinación de las operaciones de cualquier empresa. Esta situación engloba

la gestión y control de las actividades que se realizan para mover la carga (los materiales) de un lugar a otro, a lo largo de toda la cadena de suministro (Chopra & Meindl, 2008), involucrando así, todas aquellas actividades relacionadas con los movimientos de la carga desde que sale de un proveedor o centro de producción, hasta que llega a su destino final (Ballou, 2004).

A lo anterior se agrega, que este proceso no siempre se realiza directamente de un lugar o nodo de origen (proveedor, centro productivo o planta) a un lugar o nodo de destino final (otros centros productivos, clientes internos o cliente final). Lo anterior depende del tipo del movimiento/embarque, la carga que puede ser transportada a través de diferentes puntos intermedios, como almacenes, centros de distribución, centros de paso de carga (crossdocking) o plataformas logísticas (Antún, 2013).

A finales de 2010, Estados Unidos reportó un crecimiento del 9.1% en el transporte de mercancías (o materiales) con respecto a años anteriores, lo cual significó un aumento de \$1,316 billones de dólares. El 28% de ese aumento corresponde a movimientos realizados en transporte por carretera, 15.7% a transporte por aire y 8% a traslados ferroviarios (Mesa & Ukkusuri, 2013).

En general, para Estados Unidos el autotransporte de carga asciende al 81% del total de los fletes que son trasladados en el país (Cranic, 2002). De acuerdo con esto, James F. Campbell (2005) menciona que el transporte de carga terrestre es el modo de traslado de mercancías más importante del mundo.

De la misma manera que en el país contiguo, en México durante el 2014 a través del transporte por carretera se realizó el 55% del total de movimientos para el transporte de mercancías (materiales/productos), el 12.5% realizado por transporte ferroviario, 31.9% por marítimo y 0.1% por transporte aéreo (SCT, 2014). Siendo así, que el transporte por carretera representó el 5.9% del PIB nacional (SE, Reporte de la dirección de estudios económicos, 2015). En ese mismo año, el autotransporte de mercancías registró en México la generación de 1.8 millones de empleos directos (SCT, 2013).

Las cifras expuestas en el párrafo anterior, es un ejemplo de los requerimientos diarios dentro del mercado competitivo tanto para las empresas como para los diferentes

países en donde el sector automotriz juega un rol importante de su economía. Esto exige a las empresas calidad, bajos costos y altos niveles de servicio (Ballou, 2004). Para cumplir con esos requerimientos, la logística busca la correlación de los diferentes factores de servicio para cumplir con los requisitos del mercado (Mesa & Ukkusuri, 2013) como por ejemplo, a través de un eficiente servicio de transporte de bienes (materia prima, producto en proceso o producto terminado).

Lo anterior forma parte clave del cumplimiento de los objetivos en cada empresa en donde la mayoría de estas buscan reducir los costos utilizando al máximo los recursos disponibles, siendo precisamente el transporte de bienes uno de los costos logísticos más elevados. De acuerdo a lo anterior, se visualiza una gran área de oportunidad para el sector automotriz y para la logística en general, en donde se requiere reducir (en la medida de lo posible), los costos de transporte. Para ello, se espera que el traslado de bienes sea lo más fluido posible (sin interrupciones en el proceso) (Cedillo et al., 2015) de acuerdo a las características de las redes de distribución (Chopra & Meindl, 2008).

Dentro de esta investigación se muestra un caso de estudio presentado por Grupo QUIMMCO que es un consorcio de empresas que forman parte del sector automotriz en México. Como parte de este grupo existe QUIMMCO Servicios Logísticos (QSL), la cual es una compañía encargada exclusivamente de coordinar el transporte de materiales de las empresas que forman parte del grupo.

Específicamente, se presenta el caso de la empresa SISAMEX (Servicios Automotrices de México) perteneciente al Grupo QUIMMCO, reconocida por ser un fabricante de clase mundial de componentes automotrices. Hoy en día, QSL coordina el transporte de los materiales de esta empresa.

El presente documento comprende cinco capítulos. En el capítulo I, se presenta el problema de la investigación, los objetivos, preguntas de investigación, hipótesis y justificación. En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico y el estado del arte, así como la metodología de trabajo. El capítulo III, presenta la experimentación realizada. El capítulo IV, describe los resultados obtenidos de la experimentación, mientras que el capítulo V presenta los alcances, delimitaciones, publicaciones e infraestructura y apoyo técnico con el cual se llevó a cabo esta investigación.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de los diferentes tipos de transporte que existen, el transporte por carretera es de los más utilizados para mover cargas de un origen a un destino. Este, aborda directamente los problemas de ruteo de vehículos (o VRP por las siglas en inglés Vehicle Routing Problem), dentro de los cuales se encuentra comúnmente el problema de ruteo de vehículos capacitado (o CVRP por las siglas en inglés Capacited Vehicle Routing Problem). Este problema busca satisfacer la demanda de uno o más clientes contemplando la capacidad de carga máxima del vehículo o vehículos que son utilizados.

Con base en lo anterior y dependiendo de las características del envío, se divide en dos principales esquemas: el servicio en FTL (por sus siglas en inglés Full Truckload) y el servicio en servicio LTL (por sus siglas en inglés Less-than-Truckload), los cuales se abordan más adelante.

Como parte de una revisión general, específicamente el servicio de transporte LTL se enfoca en la variante de VRP capacitado, puesto que involucra directamente la capacidad de carga de los vehículos. De acuerdo con esto, la problemática presentada en esta investigación, toma como caso de estudio un problema de ruteo de vehículos capacitado de una empresa de la localidad, descrita a continuación.

1.1.1. CASO DE ESTUDIO

Para el desarrollo de la presente investigación, se colaboró con la empresa SISAMEX siendo esta, una empresa perteneciente al Grupo QUIMMCO, cuya rama industrial es reconocida como fabricante de clase mundial de componentes automotrices. Entre los productos que SISAMEX fabrica se encuentran ejes, frenos y algunos otros componentes relacionados para el ensamble de camiones y tracto camiones, localizando su planta de operaciones en Escobedo, Nuevo León.

Dentro de grupo QUIMMCO, existe una empresa llamada QUIMMCO Servicios Logísticos (QSL), quien coordina el transporte de los materiales que son requeridos en la planta de SISAMEX. Este transporte, constituye un reto diario para QSL principalmente porque se recolectan diferentes tamaños de embarques de las mercancías, desde 72 diferentes proveedores localizados en Estados Unidos y Canadá. Al mismo tiempo, se trabaja con un centro de consolidación de carga (CCC) en Jeffersonville, Indiana y un centro de distribución (CDD) en la frontera de Laredo, Texas. Por cuestiones de términos de envío, este CDD representa el destino final para todos los embarques recolectados independientemente del esquema de envío.

Los esquemas de envío mencionados anteriormente, se ejemplifican en Ilustración 1.

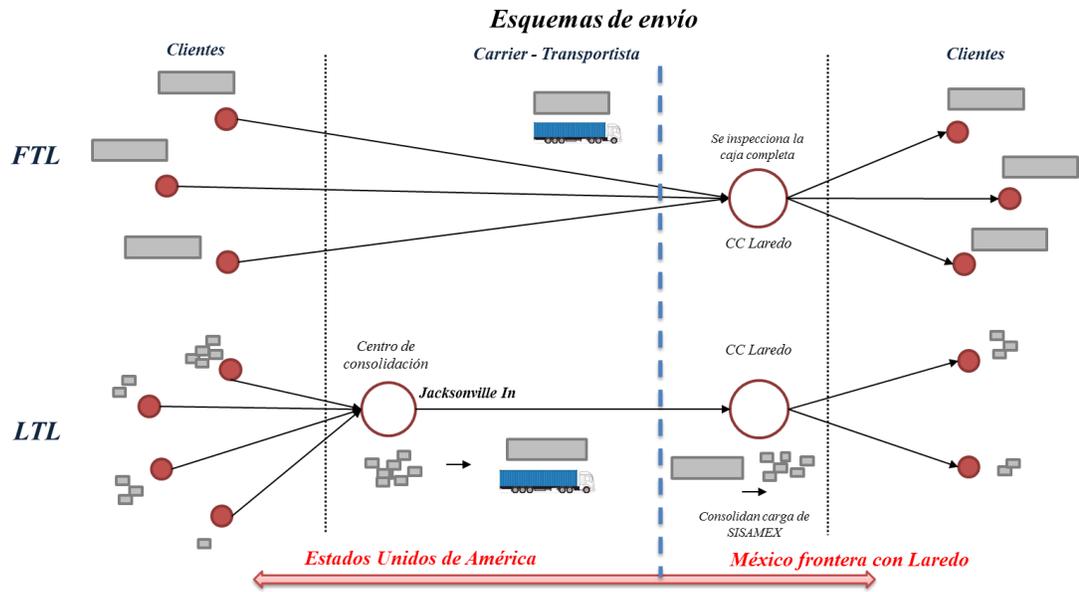


Ilustración 1. Esquemas de envío Origen-Destino. Fuente: elaboración propia.

El primero de los esquemas nombrados, es el servicio FTL (Braekers et al., 2011)(Li & Lu, 2014) que se traduce al español como camión de carga completa o camión lleno. Este tipo de autotransporte se utiliza cuando los embarques que son trasladados de un origen a un destino, cargan totalmente la capacidad de un camión (Mendoza et al., 2010), de ahí el nombre Full Truckload (Arunapuram et al., 2003). Cuando QSL realiza un envío en FTL, contempla principalmente que el embarque pese como mínimo 20,000 libras (destacando que la capacidad de carga máxima de un camión es de 40,000).

El otro esquema de transporte por carretera es el servicio LTL, mismo que se traduce como menos que un camión, lo cual significa que los embarques trasladados no cargan el camión en su capacidad máxima, cuyos embarques se encuentran con diferentes pesos entre 150 y 20,000 libras. Debido a la naturaleza de este esquema de transporte, se requiere utilizar diferentes centros intermedios entre el origen y el destino, para realizar la consolidación, almacenamiento o distribución de las diferentes cargas LTL, con el objetivo de cargar un camión a su máxima capacidad uniendo múltiples embarques de diferentes proveedores para aprovechar el espacio disponible en el vehículo (camión) con el fin de reducir los costos de envío (Li et al., 2016). Este esquema es un aspecto

crítico para QSL, ya que de los 72 proveedores que suministran material a la planta de SISAMEX, 54 de ellos trabajan bajo este esquema.

Como se mencionó, SISAMEX utiliza un centro de consolidación de carga (CCC) para minimizar los altos costos de los envíos individuales LTL. Sin embargo, el uso de este centro aumenta la complejidad de la red de transporte, debido a las diferentes rutas que se generan y que afectan directamente el costo de estos envíos.

Como parte del servicio en LTL, QSL maneja tres diferentes estrategias de envío para los embarques: envíos directos (ED), envíos indirectos (EI) y combos (EC), que son descritas a continuación:

- 1. Envíos directos (ED):** QSL considera como ED aquellos embarques con pesos entre 18,000 y 20,000 libras, mismos que son enviados directamente al CD ubicado en Laredo Texas (destino final de la red analizada). Para este tipo de envío, se cuenta con un solo transportista subcontratado.
- 2. Envíos indirectos (EI):** para llevar a cabo esta estrategia, se consideran todos aquellos embarques menores de 18,000 libras, en los cuales no es ventajoso enviarlos al CD, por lo tanto la mayoría de estos embarques necesitan la consolidación entre sí para aprovechar el espacio disponible en el vehículo y compensar el costo de utilizar un camión completo. Como consecuencia de esto, Debido a esto, QSL maneja dos transportistas, uno encargado de mover del proveedor al CC y otro diferente que mueve del CC al CD.
- 3. Envíos en Combos (EC):** por último se tienen los combos. Estos conforman una estrategia definida por QSL, que se realiza cuando se presentan dos embarques de pesos similares (entre 10,000 y 18,000 libras). En esta estrategia, se realiza una consolidación en ruta de los dos embarques.

Las estrategias descritas en los párrafos anteriores, son mostradas en la Ilustración 2.

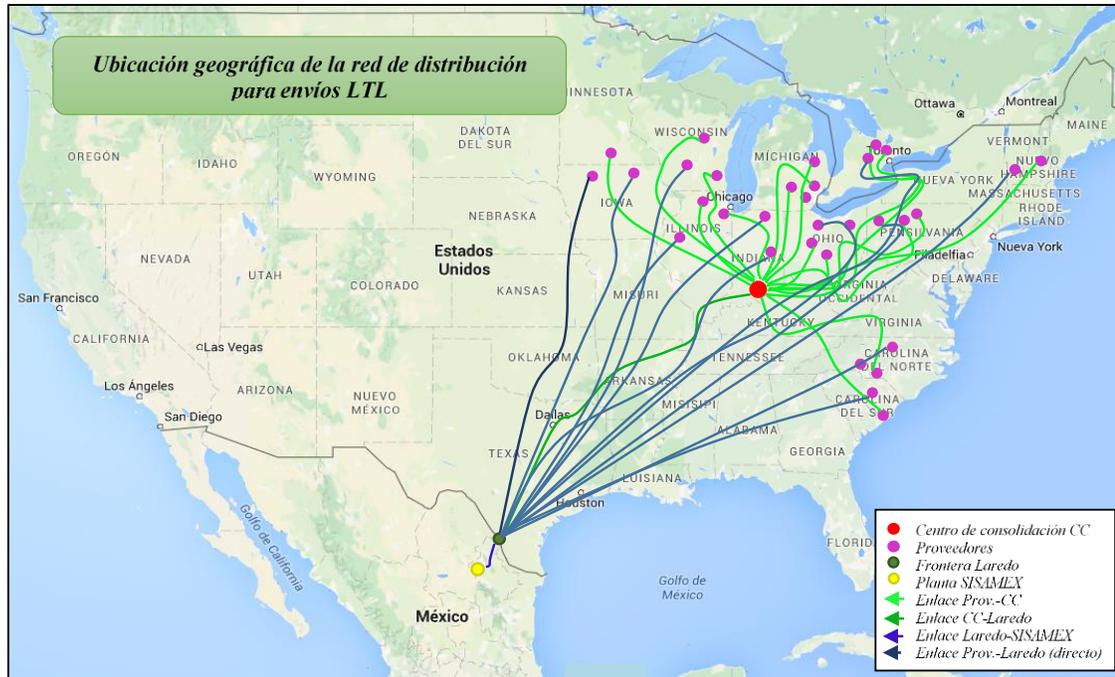


Ilustración 2. Red de distribución para envíos LTL. Fuente: elaboración propia.

Además de las tres estrategias de envío utilizadas por QSL para transportar los embarques en servicio LTL, dentro de la literatura existen estrategias de envío tipo Milk Run. (Campbell, 2005)(Chopra & Meindl, 2008). Estos envíos (EMR) hacen referencia al recorrido de un vehículo ya sea de recolección o entrega (o en casos específicos una mezcla de ambas) para consolidar en la misma ruta embarques de pequeño a mediano tamaño de diferentes proveedores, generando con esto la conocida Milk Run (traducido al español como ruta lechera) análogo al sistema tradicional de venta de leche en el Oeste de Estados Unidos (Brar & Saini, 2011)(Nemoto et al., 2010). Según Hosseini et al (2014), en este tipo de envío, se consolidan las cargas sin la intervención de un CCC (Brar et al, 2011). Para un EMR se considera que la ruta inicia en un proveedor, realiza el recorrido de recolección necesario hacia los demás proveedores y una vez se completa la capacidad máxima de carga del vehículo, se traslada hacia el CD (que es el destino final en el presente caso de estudio) (Hall, 1993)(Barnhart & Kim, 1995).

Por lo anterior expuesto, en el presente proyecto se contempla como estrategia de envío los EMR, eliminando con esto la estrategia de combos (EC), puesto que se componen de dos paradas y se considera como un EMR.

1.1.2. PROBLEMÁTICA

El establecimiento de rutas de recolección para los embarques en servicio de transporte LTL, es el principal problema que enfrenta cada día QSL y muchas empresas que trabajan con este esquema de transporte. Dicha situación crea la necesidad de mejorar las rutas de recolección de los embarques que utilizan un CC, con el objetivo de reducir los costos de transporte (Brown, 2003).

Por lo anterior, es importante definir un modelo científico que contemple las tres estrategias de envío consideradas en esta investigación, para embarques en servicio LTL (ED, EI y EMR) y además considerar las diferentes situaciones como variables del caso de estudio, que son descritas a continuación:

- ❑ Para abastecer la planta de producción, se cuenta con 54 diferentes proveedores ubicados en Estados Unidos y Canadá.
- ❑ Se trabaja con 4 transportistas (o carriers) y son asignados dependiendo de las características de los embarques. Destacando que es un servicio subcontratado.
- ❑ Se encuentra ubicado un Centro de Consolidación (CC) en la ciudad de Jeffersonville Indiana.
- ❑ Todos los embarques tienen como destino final (para el caso de estudio) el CD en Laredo.

Cuando se utiliza el servicio subcontratado es cuando los embarques son transportados en servicio LTL, mismos que abarcan desde un 5% a un 45% de la capacidad completa de un vehículo. Sin embargo, con esas cifras no se aprovecha el volumen de un camión completo incrementando los costos de envío de cada embarque (Powell & Sheffi, 1983)(Powell, 1986).

Por lo tanto, el problema que se aborda en esta investigación es en el servicio de transporte en LTL para el traslado de embarques desde diversos orígenes (proveedores) hasta un único destino (cualquier que este represente), donde no cuenta con las rutas de

transporte óptimas, debido a que la capacidad máxima de los vehículos no se aprovecha por ser embarques de pequeño a mediano tamaño y que se utiliza un CC para consolidar los embarques. Con lo cual, es necesario definir la estrategia o una combinación de las estrategias presentadas, mediante las cuales se mejore el uso de la capacidad los vehículos utilizados, con el fin de minimizar los costos del transporte de los embarques.

La selección de la estrategia o estrategias de envío que minimicen los costos de transporte y mejoren la capacidad de los vehículos, se conoce comúnmente como un problema de diseño de redes de transporte. Sin embargo, realizar ese diseño no es una tarea sencilla, debido a que constituye uno de los problemas de optimización combinatoria más complejos: el ruteo de vehículo capacitado (CVRP) dependiendo de las características de cada envío, el cual fue mencionado a modo de introducción del presente capítulo (Machado et al., 2002) (Toth & Vigo, 2002) (Wang & Lu, 2009) (Toth & Vigo, 2014).

Por otra parte, este problema se encuentra dentro del espacio de problemas NP-Duro (Maldonado & Gómez, 2010) debido a que el tiempo en el cual son resueltos, aumenta exponencialmente dependiendo de la cantidad de variables y restricciones del problema (Villagra et al., 2011)(Medina et al, 2011).

En el caso de estudio inicialmente se presentan múltiples orígenes (54 proveedores en LTL), múltiples tamaños de embarques que van de las 100 a las 20,000 libras, diferentes estrategias de envío (3 presentadas), un CC (Jeffersonville Indiana) y un CD como destino final (Laredo Texas). Estas variables, simbolizan alrededor de $1.2696403353658275925965100847567 * e^{73}$ posibles combinaciones (obtenido del factorial de 55, ya que se tienen 54 orígenes posibles o proveedores, incluido un destino siendo este el CC o el CD) que se pueden realizar entre las estrategias de envío para seleccionar las rutas de transporte que minimicen los costos de envío del presente problema.

A razón de lo expuesto, no se considera utilizar técnicas clásicas (Fisher, 1995) debido a que en problemas complejos, la búsqueda de una solución óptima puede resultar en óptimos locales, además de incrementar el tiempo computacional de solución (Clarke & Ramser, 1964). Dicha situación no es factible para resolver problemas del día

a día como el que se presenta en el caso de estudio. Con base en este escenario, se propone el uso de técnicas de Computación Suave (o Soft Computing), las cuales son técnicas utilizadas para encontrar solución a problemas complejos que ofrecen buenos resultados en términos de tiempos de cómputo (Medina et al, 2011)(Maldonado & Gómez, 2010).

En resumen, el problema expone la necesidad de determinar la combinación de estrategias de envío que definan rutas de transporte para embarques LTL, las cuales mejoren la capacidad de carga de los vehículos, con el fin de reducir los costos de transporte. Este entorno demuestra un área de oportunidad en la búsqueda de reducción de costos para el transporte por carretera, específicamente en servicio LTL.

En la siguiente sección se presenta el objetivo general del proyecto, así como los objetivos específicos, las preguntas de investigación, la hipótesis y la justificación que sustenta la presente investigación.

1.2. OBJETIVOS

De acuerdo con la problemática presentada en la sección anterior, se establecen los siguientes objetivos para dar solución al problema.

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar rutas de recolección con base en las órdenes programadas para los embarques LTL, que reduzcan los costos de transporte de acuerdo con las estrategias de envío analizadas, mediante la adaptación de un algoritmo genético.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el estado actual de la red de transporte para embarques en servicio LTL.
- Construir un modelo científico donde se contemplen las diferentes estrategias de envío para embarques LTL.
- Adaptar el algoritmo genético al problema planteado y el modelo científico que considera las tres estrategias de envío.
- Diseñar rutas de transporte para embarques LTL que minimicen los costos de envío, de acuerdo con el modelo científico planteado y con base en los resultados del algoritmo.

1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿Qué técnicas para análisis de redes de distribución en servicio LTL se utilizan actualmente?
- 2) ¿Cómo se podrán modelar las tres estrategias de envío LTL en un solo modelo científico?
- 3) ¿De qué forma será adaptado el algoritmo genético a este problema?
- 4) ¿Con base en que criterios serán construidas las rutas de transporte que minimicen los costos de envío?

1.4. HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo de un modelo científico que considera las tres estrategias de envío y la adaptación de un algoritmo genético, se reducirán los costos de transporte de acuerdo con las rutas generadas por el algoritmo genético adaptado.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Como justificación a esta investigación, se presentan las cifras de importancia en el uso del transporte por carretera, así como de los embarques transportados en servicio LTL en México. Adicional a lo anterior, se presentan las ventajas de utilizar este servicio de transporte analizadas por diferentes autores.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México durante el 2015 se registró un total de 72.443,960 libras en importación de componentes para el ensamble de camiones y de tracto camiones provenientes de Estados Unidos (INEGI, 2012). La situación anterior refleja un punto crítico en la economía del país, entorno a la importación de autopartes provenientes de Estados Unidos.

De la cifra de importaciones mencionada y particularmente analizando el presente caso de estudio, alrededor de 6.445,716 libras son movidas en servicio LTL. Este monto representa el 8.89% del total de importaciones anuales de Estados Unidos hacia México.

De acuerdo con la cantidad de importaciones anuales, se observa que existe un área de oportunidad en este tema, puesto que se manejan grandes cantidades de libras en cada movimiento de los embarques para el servicio LTL.

Una situación de suma importancia que se analiza en esta investigación, es que se trabaja con un servicio de transporte subcontratado, por lo tanto las variables consideradas para esta investigación son numerosas y diversas dependiendo principalmente de la composición del costo con cada transportista, basado en cada una de las estrategias (esto se revisa a detalle en el capítulo III con la modelación de las mismas).

En el mercado actual existen diferentes herramientas para la selección de rutas de transporte. Sin embargo (como se mencionó), es a causa de la composición de costos para este tipo de red en servicio LTL (el cual es un problema complejo), que se requiere abordar el problema desde otra perspectiva, como la programación del modelo en específico.

CAPÍTULO II

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de ruteo de vehículos conocido como VRP (por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem), es un problema de optimización combinatoria el cual se genera a causa de las múltiples combinaciones que se pueden realizar con las variables y parámetros utilizados en cada problema (Barnhart & Laporte, 2007)(Toth & Vigo, 2014)(Machado et al., 2002). Se representa como un grafo compuesto por nodos y arcos, que simbolizan los clientes y las vías (o carreteras) por las cuales deben circular los vehículos. Según Dantzig et al. (1959) & Clarke et al., (1964) el problema de ruteo de vehículos se puede generalizar como la tarea de seleccionar/encontrar el camino o ruta más corta (o más económica) que debe recorrer una flota de vehículos (k), con capacidad de carga (q), desde un depósito (*nodo* O), hasta un grupo de clientes geográficamente dispersos (*nodos* N), (Toth & Vigo, 2014), para entregar las cargas solicitadas y satisfacer los requerimientos de todos los clientes.

Dentro del VRP existen diferentes variantes y restricciones, las cuales dependen de las características del problema que se quiere solucionar. Con base en Villagra et al.

(2011), se consideran 8 variantes del VRP siendo los más significativos en la actualidad. Estas variantes se describen a continuación:

- ❑ CVRP (Capacited VRP o VRP capacitado) se conoce como el tipo de VRP mas general, ya que se compone de un vehículo o una flota de vehículos (p) con capacidad limitada y constante (q), los cuales tienen como función entregar diversos bienes asignados (Q) según la demanda de cada cliente que es atendido (N) (Wang & Lu, 2009). Para el problema de servicio de transporte LTL, este tipo de VRP constituye la base para la formulación del modelo, ya que la principal característica del transporte LTL es que los embarques no llenan un camión en su totalidad, con lo cual es primordial considerar el tamaño de los embarques, además de la capacidad de cada uno de los vehículos utilizados para las entregas (Campbell, 2005)(Argueta et al., 2014)(Kofer, 2014)(Arunapuram et al., 2003)(Kim, 1995)(Powell & Sheffi, 1983)(Nemoto et al., 2010)(Clarke & Wright, 1964)(Lu, 2009).
- ❑ MDVRP (*Multi-Depot VRP* o VRP multi deposito). Es el VRP en donde existen múltiples depósitos y cada uno tiene una flota independiente de vehículos, los cuales deben visitar a todos los clientes. Esta variante de VRP se puede observar en las redes LTL que están compuestas por diversos orígenes y puntos de transbordo (o *crossdocking*) (Barcos et al., 2010)(Ma et al., 2010)(Villagra et al., 2011).
- ❑ PVRP (*Period VRP* o VRP periódico). En esta variante, cada cliente debe ser visitado durante un horizonte de operación de ciertos días. Como ejemplo de este tipo de VRP en las redes de servicio LTL, se encuentran las rutas lecheras (*Milk Runs*) (Toth & Vigo, 2014)(Brar & Saini, 2011)(Villagra et al., 2011).
- ❑ SDVRP (*Split Delivery VRP* o VRP de entrega dividida). En este tipo de problema, el cliente puede ser atendido por diferentes vehículos con el

objetivo de reducir costos. De igual forma que los ejemplos anteriores, esta variante del problema de ruteo es comúnmente utilizada para las redes de servicio LTL cuando se trata de consolidar las cargas en diferentes centros, que aumenta las posibilidades de que los embarques de cada cliente, sean entregados en diferentes vehículos dependiendo de las políticas, consideraciones o tiempos de entrega de los centros de consolidación(Toth & Vigo, 2014)(Villagra et al., 2011).

- ❑ SVRP (*Stochastic VRP* o VRP estocástico). En ese VRP uno o algunos de sus componentes son aleatorios. Por ejemplo, no se conoce la demanda de los clientes. Este tipo de variante es un aspecto clave en las redes de transporte LTL, por lo cual algunos autores consideran en las formulaciones de los problemas, la posibilidad de enviar los camiones con carga disponible, para asegurar que la recolección de los embarques se lleve a cabo de manera óptima (Villagra et al., 2011), con lo cual se da paso al VRPPD.
- ❑ VRPPD (*VRP Pickup and Delivery* o VRP con entrega y recolección), este VRP se presenta cuando los clientes pueden devolver diferentes bienes, entonces, se debe considerar un espacio adicional en el vehículo para estas devoluciones. Algunos autores consideran el traslado de las cajas vacías para la recolección de embarques. Los trabajos de Sadjadi et al. (2009), Berbeglia et al. (2010) & Barcos et al. (2010) están relacionados al servicio de transporte en LTL que presentan estas dos variantes de VRP.
- ❑ MFVRP (*Mix Fleet VRP* o VRP de flota mixta). Es aquel en donde se trabaja con una flota de vehículos mixta con capacidades distintas. Por lo anterior, se debe tomar en cuenta esta consideración en la planeación de las rutas, dado que en muchas ocasiones cuando se utilizan centros de consolidación, los transportistas suelen utilizar vehículos con capacidades diferentes para la recolección de los pedidos, desde un camión pequeño

hasta un camión de caja grande o de doble caja, dependiendo de las políticas de recolección establecidas (Campbell, 2005)(Wang & Kopfer, 2014)(Dantzig & Ramser, 1959).

- ❑ Otra de las variantes más características en el transporte LTL, son las ventanas de tiempo conocido como VRPTW (por sus siglas en inglés VRP With Time Windows). Este se caracteriza por incluir la restricción que cada cliente solo está dispuesto a recibir los pedidos en el transcurso de una ventana de tiempo en específico, con lo cual se debe programar la entrega o recolección para la hora definida en la que el vehículo no puede llegar antes o después de esta hora (Cranic, 2002)(Argueta et al., 2014)(Wang & Kopfer, 2014)(Sadjadi et al., 2009)(Berbeglia et al., 2010)(Arunapuram, 2003).

2.1.2. MODELO GENERAL DEL VRP

El VRP está basado en el problema general del transporte y su modelación parte del modelo de transporte. Sin embargo, de acuerdo con el tipo de VRP, las modificaciones al modelo cambian y aumenta. El modelo general para problemas de transporte es el siguiente (Laporte, 2007)(Hillier & Lieberman, 2010):

Variable de decisión:

x_{ij} = número de cargas enviadas de origen i al destino j (camino de i a j)

c_{ij} = el costo por enviar de i a j

i = origen (donde $i = 1, 2, 3, \dots, m$)

j = destinos (donde $j = 1, 2, 3, \dots, n$)

s_i = suministro de cada origen i

d_j = demanda de cada destino j

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeta a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i \text{ para toda } i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ji} = d_j \text{ para toda } j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ para toda } i \text{ y } j. \quad (4)$$

La función objetivo (1), representa el costo total del transporte, en donde se pretende minimizar la sumatoria de los costos de mover cargas de los nodos i a los nodos j . La ecuación (2) define que la sumatoria de las cargas que se mueven de los nodos i a los nodos j satisfacen la oferta del cliente, mientras que la ecuación (3) establece que la sumatoria de todas las cargas que se mueven de j a i , cubren la oferta establecida y la ecuación (4) satisface la no negatividad de las variables de decisión. La mayoría de las formulaciones que intentan resolver un VRP parten del modelo general de transporte, pero las modificaciones y las diferencias entre cada modelo dependen principalmente de las restricciones del problema bajo estudio.

2.1.3. ALGORITMO GENÉTICO

Dentro de la Inteligencia Artificial, existe una rama llamada Soft Computing (SC) o Computación Suave, que encarga de dar solución a problemas complejos, los cuales no pueden ser resueltos mediante el uso de técnicas exactas dada la cantidad de variables involucradas, las cuales aumentan la dificultad de solución. Entre las técnicas más

comunes en SC, se encuentra la computación bio-inspirada, en donde se desarrollan programas basados en el estudio del comportamiento y las dinámicas de sistemas vivos, en esta área se encuentran los Algoritmos Evolutivos (Maldonado & Gómez, 2010) dentro de los cuales están los Algoritmos Genéticos (AG).

Los AG imitan los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, en donde solo sobreviven los individuos de una población que se adaptan más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno (Coello Coello, 1995). Estas técnicas de búsqueda de soluciones factibles a problemas complejos, están basadas en la mecánica de la selección natural y la genética, descritas en la teoría de la evolución de Darwin, que utilizan la información histórica para seleccionar nuevos valores de búsqueda y encontrar una mejor solución a un problema complejo (Reeves, 2003).

El algoritmo genético se caracteriza principalmente de cuatro etapas en donde desarrolla todo el proceso evolutivo: crear una población de individuos de tamaño NTI (número total de individuos) y NTPR (número total de parámetros), evaluar su función objetivo (función de fitness), seleccionar mejores individuos y crear nuevos a partir de los seleccionados mediante los operadores de cruce y mutación (los cuales se encargan de generar la variación genética). Este proceso continúa hasta que el algoritmo localiza un valor óptimo, no encuentra una solución mejor o se establecen y se cumplen ciertos criterios para detener el algoritmo como el NTGEN (número total de generaciones). A continuación se muestra el pseudocódigo principal de un algoritmo genético.

Pseudocódigo AG

P ← Crear Población (NTI, NTPR)

Inicio de ciclo desde 1: NTGEN

FE ← Evaluar *P* (*P*)

PS ← Seleccionar *P* (*FE*, *P*)

P ← Variar *P* (*PS*, *PM*, *PC*)

Fin de ciclo

El algoritmo comienza con la generación de una población de tamaño NTI-NTPR, ya sea de forma aleatoria u orientada, la cual posee diversas características con las que se desea iniciar una población. Una vez que la población es creada, comienza el ciclo evolutivo.

El siguiente paso es la evaluación de cada uno de los individuos que pertenecen a la población de forma independiente, mediante el desarrollo del modelo de optimización que se pretende resolver para asignar un valor de evaluación a cada individuo.

Una vez que cada uno de los individuos es evaluado, se procede a la selección de individuos. En esta parte, se determina cuáles sobreviven y cuales desaparecen con el paso de las generaciones, dependiendo de las técnicas de selección que se utilicen. En la actualidad, existen diversas técnicas de selección de individuos comúnmente utilizadas en algoritmos genéticos, entre las más conocidas se encuentran: la selección por torneo y la selección por ruleta.

❑ **Selección por ruleta:** cada uno de los individuos de la población tendrá una fracción proporcional de la ruleta, asignada según su valor de evaluación. Esta porción de ruleta será mayor o menor, de acuerdo con la puntuación obtenida en la función de evaluación. Debido a esto, el individuo con mayor puntuación tendrá una probabilidad más alta de ser seleccionado. Sin embargo, una de las desventajas de este tipo de selección es cuando un individuo de la población tiene un 90% de probabilidad de ser seleccionado (Coello Coello, 1995), en cuyo caso el algoritmo se podría estancar en óptimos locales.

❑ **Selección por torneo:** en esta selección, se elige aleatoriamente un número determinado de individuos de la población, en donde el individuo con mejor o peor evaluación (dependiendo del objetivo del problema), será el que se reproducirá sustituyendo al individuo con evaluación peor o mejor (Rodríguez-Piñero, 2003).

Posteriormente que se seleccionan los individuos mejor evaluados, se procede con la siguiente etapa que es la variación, y comprende el intercambio o mezcla entre las

composiciones genotípicas de los individuos. Para esto, se utilizan los operadores de cruce y mutación. Los cuales se describen a continuación:

- ❑ **Operador de cruce:** estos operadores representan una de las partes más importantes del algoritmo genético, puesto que en ellos se intercambian diversas características entre las poblaciones de cada generación, por lo tanto es en esta parte, en donde la población evoluciona. Utiliza una probabilidad de ejecución la cual, según en la literatura inicia en 60% y cambia de acuerdo con el comportamiento del algoritmo con el paso de las generaciones (Goldberg, 1989). El principal objetivo de un cruce es el intercambio en la información genética de individuos padres y conservando algunas partes, para crear individuos hijos. Existen diferentes tipos de cruce, dependiendo del tipo de AG con el cual se trabaje AG simple o AG de permutaciones (se expondrán estos tipos más adelante), pero los más conocidos son cruce de uno o dos puntos para el primer caso y cruce OX, CX o ERX para el segundo caso.

- ❑ **Operador de mutación:** este operador permite que una o más de una de las partes intercambiadas entre individuos, cambien individualmente es decir, que muten. Lo anterior permite que se genere la diversidad genética de los individuos. Entre las más conocidas se encuentran la mutación por intercambio, la mutación por inversión y la mutación dirigida.

Como se mencionó en párrafos anteriores, existen principalmente dos tipos de algoritmos genéticos, el simple y el de permutaciones. Uno difiere del otro por el tipo de codificación que se realiza en la programación del mismo y esto depende del tipo de problema que se quiere resolver.

2.1.3.1. Algoritmo genético simple

Un algoritmo genético simple se representa mediante una codificación binaria (es decir de ceros y unos), la cual es la más utilizada puesto que permite mayor facilidad en el desarrollo de la programación del problema, ya que la aplicación de los operadores genéticos es más sencilla (Coello Coello, 1995). En él, se utiliza frecuentemente el cruce de uno o dos puntos y la mutación por inversión o intercambio (Ilustración 3).

$$I1 = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1]$$

Ilustración 3. Ejemplo de codificación binaria de un solo individuo

2.1.3.2. Algoritmo genético de permutaciones

Un ejemplo claro para explicar el algoritmo genético de permutaciones se puede representar con el problema del agente viajero, en donde a cada una de las ciudades a visitar se le asigna un número entero y el viajero tiene que recorrer la secuencia de números, ya sea sin repetir ciudades o repitiéndolas (dependiendo del problema con el que se esté trabajando). Cada secuencia se conforma por las combinaciones en las permutaciones de los n números de ciudades a visitar, entonces el espacio de búsqueda de soluciones se presenta en un $n!$ de las ciudades del problema (Pérez, 2010) (Ilustración 4).

$$IP = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7]$$

Ilustración 4. Ejemplo de codificación de permutación de un solo individuo

2.2. ESTADO DEL ARTE

A continuación se presenta el estado del arte, en donde se realiza una revisión de las investigaciones clave para el presente proyecto. Específicamente, se analizan diferentes problemas enfocados al ruteo de vehículos en redes de transporte LTL, así como las diferentes modelaciones para cada uno de ellos, dependiendo de las características de estos, las diferentes formas de abordar cada uno de ellos así como las técnicas o herramientas para solucionarlos.

Warren B. Powell (1986), presenta un modelo para el problema de planeación de carga para redes LTL, en el cual define como problema el exceso en las secuencias mínimas de los enlaces de la red, por lo cual el modelo que propone considera de manera inteligente la agregación y eliminación de enlaces de la red para mejorar el nivel de servicio. Utiliza una heurística de mejora local para optimizar la red.

Barnhart et al. (1995), presentan un diseño óptimo de rutas de servicio para entrega y recolección en el problema de entrega en un grupo interno de transporte regional a larga distancia. En su modelo (ecuación (5)), consideran el uso de camiones para dobles cajas en los envíos de larga distancia, con servicio simultáneo para entrega y recolección. Los autores proponen un procedimiento de solución aproximado, basado en teoría de juegos (Hillier & Lieberman, 2010). El modelo que ellos proponen es el siguiente:

$$\text{Minimizar } c^T \tag{5}$$

Chu (2005) presenta un modelo matemático para la optimización de una red de transporte, en donde la demanda de los clientes excede la capacidad definida de los vehículos con los que cuenta la empresa. Para solucionar el problema se tienen dos opciones, contratar nuevos camiones para completar el exceso de demanda o suplir ese exceso contratando servicios externos de LTL, por lo tanto, el modelo se compone de dos tipos, transporte privado y el subcontratado en LTL, como variables de decisión. El objetivo es establecer las rutas de transporte para la flota privada y determinar el servicio

LTL que se contratara para cumplir con la entrega. El autor utiliza un algoritmo heurístico que minimiza los costos de envío y la cantidad de vehículos utilizados.

Sadjadi et al. (2009), proponen un modelo para diseño de rutas de transporte LTL mostrado en la ecuación (6), en el cual además de contemplar los vehículos requeridos para el transporte, también incluyen el tiempo que se utiliza para recoger y entregar cada pedido, además del inventario de cada pieza transportada. El modelo propuesto es el siguiente:

$$\text{Minimizar } \sum_t \sum_k \sum_i \sum_j [C_{kij} + \hat{C}] Y_{tkij} + \sum_t \sum_P H_p \times X_{tp}^M \quad (6)$$

Como se mencionó anteriormente, en los diferentes tipos de VRP, existen situaciones en las que el vehículo de entrega, debe recoger simultáneamente diversos embarques, ya sea con carga o contenedor vacío. Con base en esta situación Ai et al. (2009), proponen una formulación para resolver este problema el cual resuelven mediante el algoritmo de optimización por partículas de enjambre (Blum & Li, 2008).

Por otro lado, Barcos et al. (2010), presentan el problema de determinar el flujo de los envíos cuando son consolidados en redes LTL. En su trabajo presentan dos diferentes estrategias de transporte. La primera de ellas se enfoca en dos terminales de fin de línea (una de origen y una de destino), ambas funcionan como entrega y recolecta simultáneamente. Estas terminales de fin de línea, se encuentran ubicadas en una región como lo muestra la Ilustración 5, dentro de la cual se realiza la recolección o entrega particular de cada envío. Para la recolección, esa terminal de fin de línea se encarga de consolidar la carga para enviarla a la terminal final. Para la entrega, esa terminal se encarga de desconsolidarla y entregar los pedidos a cada cliente individual.

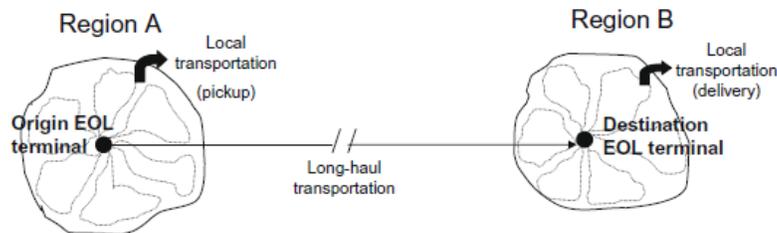


Ilustración 5. Tipo de red I(Barcos et al., 2010).

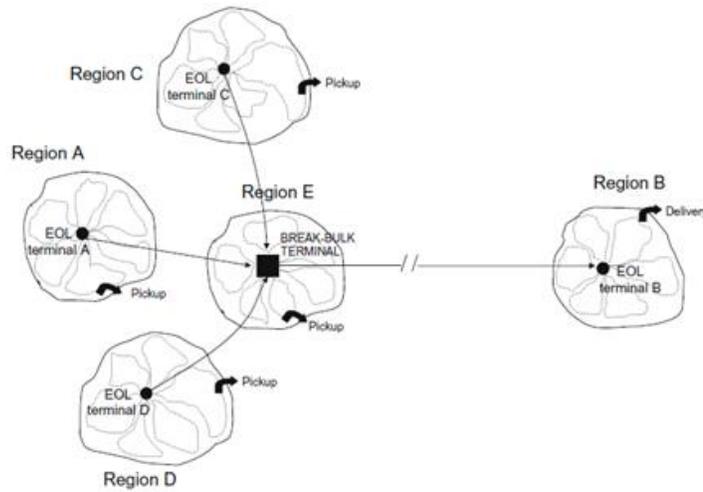


Ilustración 6. Tipo de red II (Barcos et al., 2010).

Como segundo tipo de red entre ambas terminales de fin de línea, se encuentra la terminal de carga fraccionada o break-haul terminal, por donde tiene que pasar la carga para su consolidación, antes de llegar a la terminal de fin de línea de destino cuando el envío es de larga distancia (ver Ilustración 6). El objetivo que establecen es encontrar la mejor ruta en los pares origen-destino que minimice los costos de transporte y al mismo tiempo asegurar un cierto nivel de servicio. Los autores estudian el uso de un algoritmo meta-heurístico basado en técnicas de optimización por colonia de hormigas (ACP por sus siglas en inglés Ant Colony Optimization)(Wang & Lu, 2009)(Musa et al., 2010). El modelo que ellos proponen, se presenta a continuación:

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in ST} \sum_{j \in DT} (2P + R D_{ij}) V_{ij}^E \quad (7)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el uso de centros de carga es frecuente en redes de transporte LTL. Musa et al. (2010), consideran un problema de ruteo de vehículos el cual depende del uso de este centro para realizar las operaciones de transferencias entre orígenes y destinos o con transbordos para consolidación de carga. Como lo muestra la Ilustración 7, el uso de centros de carga contribuye al control físico del flujo de las mercancías en los traslados LTL para minimizar los costos de transporte. Sin embargo,

este tipo de problema involucra diferentes situaciones como la decisión de asignación de puertas, así como la distribución interna del mismo.

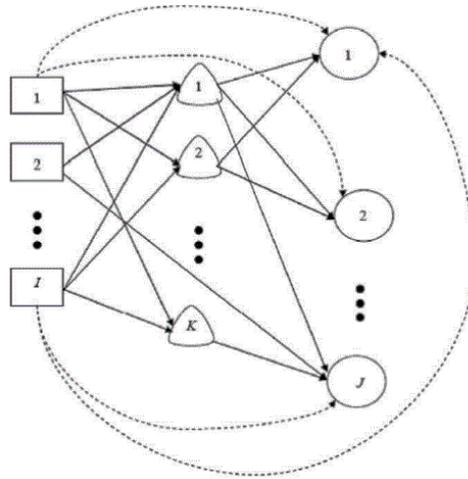


Ilustración 7. Red de transporte con centro de carga (Musa et al., 2010)

En ambos casos, se consideran como elemento clave los costos de manipulación de las cargas. También se propone un modelo en el cual consideran la asignación de vehículos a la red de transporte y la capacidad de los vehículos. Los resultados del estudio demuestran que en este tipo de red compleja, es importante considerar las decisiones que se toman para las actividades en el centro de carga ya que de lo contrario, se omiten variables importantes que afectan las operaciones de toda la red en general, por ejemplo los tiempos de carga y descarga para la consolidación. Ellos utilizan un algoritmo de optimización por colonia de hormigas(Dorigo & Stützle, 2005) (Wang & Lu, 2009) (Musa et al., 2010).

De igual forma que Ma et al. (2010), Liao et al. (2010), consideran el uso de centros de carga (crossdocking) en el ruteo de vehículos como un método eficiente para el control del flujo en los inventarios.

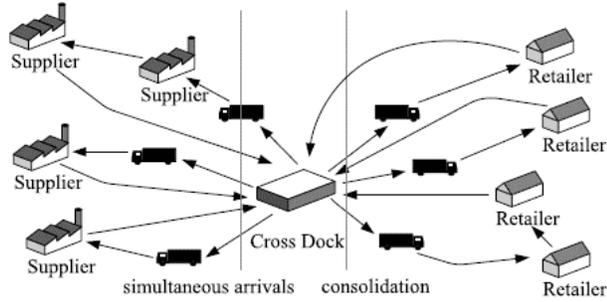


Ilustración 8. Concepto de centro de carga o crossdocking (*Liao & Shih, 2010*).

Este tipo de problemas se considera para el transporte de bienes en un horizonte de planeación, en donde cada cliente debe ser visitado una vez y la cantidad de demanda debe ser menor a la capacidad de los vehículos. El objetivo es determinar el número de vehículos y la programación de rutas para el traslado de los bienes. Ellos proponen un algoritmo de búsqueda tabú. Los resultados muestran una reducción en el número de unidades requeridas para el traslado de las mercancías a través de centros de carga o crossdocking (Ma et al., 2010).

Hernández et al. (2011), muestran un modelo de colaboración dinámica entre transportistas para la pequeña y mediana empresa de transporte LTL. En este trabajo los autores investigan las oportunidades de la participación colaborativa entre transportistas como lo son la reducción de costos, la optimización del movimiento de los fletes, mínimos tiempos de entrega, además del incremento en la utilización y nivel de los servicios. Para esto, proponen un modelo (ecuación (8)) en el cual consideran la capacidad que tienen los transportistas de realizar la cooperación y de los costos por manipulación de la carga entre estos por medio de plataformas logísticas, centros de distribución o crossdocking, el cual resuelven utilizando un algoritmo de ramificación y corte, comparándolo contra el método simplex. Los resultados para este estudio fueron favorables, sin embargo ellos resaltan que los costos por manipulación de la carga constituyen un factor clave para la sinergia entre los transportistas.

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} \varsigma_{aq} d_k Y_{kaqt} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \vartheta_i d_k X_{kit} \quad (8)$$

Hosseini et al. (2014), proponen un modelo novedoso (ver ecuación (9)) para el problema de ruteo de vehículos en una red de consolidación, en donde los envíos son realizados de los proveedores a los clientes por medio de tres sistemas de transporte: envíos directos, envíos a través de crossdocking o centros de carga (envíos indirectos) y Milk Runs (Toth & Vigo, 2014). Las Milk Runs están basadas en el sistema tradicional de venta de leche, con el cual se pueden evitar costos por manipulación e incrementar la rapidez de los movimientos de transporte.

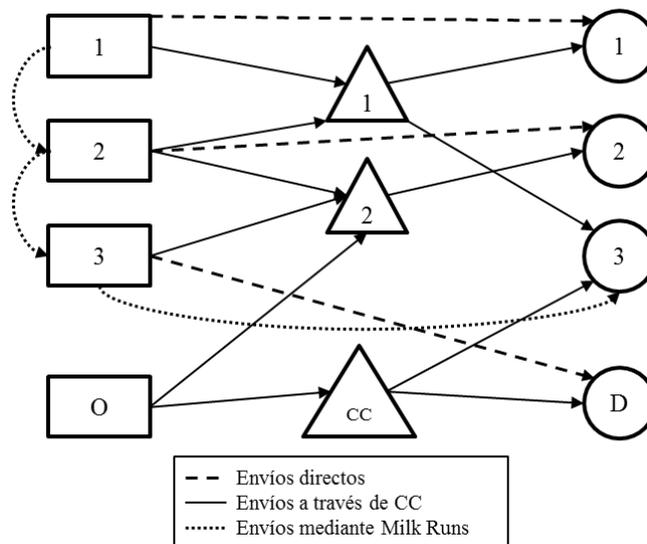


Ilustración 9. Tres tipos de envío LTL (Hosseini et al., 2014).

Este trabajo es especialmente importante para los sistemas de transporte LTL considerados en esta investigación, ya que considera tres formas de traslado para este tipo de red (Ilustración 9). El modelo matemático que los autores proponen trata de minimizar los costos de la suma de los envíos directos, envíos indirectos y Milk Runs (ecuación (9)). El problema es resuelto mediante una hibridación entre una novedosa técnica heurística de búsqueda armónica (HS por sus siglas en inglés Harmony Search) (Abdolalipour & Alibabae, 2012) y la técnica de recocido simulado (SA por sus siglas en inglés Simulate Annealing) (Davis, 1987). La solución del problema demuestra que esta técnica obtiene mejores resultados que SA.

A manera de resumen, el análisis del estado del arte revisado por problemas en redes de transporte LTL, se muestra en la Tabla 1. Por otro lado, la Tabla 2 muestra un resumen del estado de arte revisado.

Tabla 1. Resumen estado del arte.

Año	Autor	Modelo	Característica
1959	Dantzig & Ramser [44]	VRP	Generalización del problema del agente viajero
1964	Clarke & Wright [45]	CVRP	Múltiple demanda y múltiple capacidad de vehículos
1986	Powell, W. B. [60]	CVRP VRPPD	Recolección y entrega de cajas llenas y vacías.
1993	Hall, R. W. [38]	CVRP VRPPD MFVRP	Relación entre diferentes terminales de carga
1995	Barnhart & Kim [38]	CVRP VRPPD MFVRP	Envíos de larga distancia, con vehículos de doble caja
2003	Brown, A. M. [37]	CVRP VRPPD VRPTW	Operaciones en los crossdocking
2005	Chu, C. W. [53]	CVRP MFVRP	Uso de vehículos privados y subcontratados
2009	Sadjadi et al. [15], Dai & Chen [22], Ai et al. [57]	CVRP VRPTW VRPPD	Considera el inventario de material, colaboración entre transportistas
2010	Barcos et al. [26]	CVRP VRPPD MDVRP	Considera el nivel de servicio de las rutas
2010	Musa et al. [55], Liao et al. [56]	CVRP	Dos tipos de envíos: directos e indirectos, inventario
2011	Hernández et al. [24], Musa et al. [42]	CVRP VRPTW	Colaboración entre transportistas, descuento en costos de transporte e inventario
2013	Ma & Sun [28]	CVRP VRPTW VRPPD MRVRP	Abordan rutas lecheras con tiempo de terminación más rápido
2014	Wang & Kopfer [52]	VRPTW	Colaboración entre transportistas
2014	Argueta et al. [13], Hosseini et al. [47]	CVRP VRPPD	Demoras en aduanas, tres tipos de envíos: directos, indirectos y rutas lecheras

Tabla 2. Resumen estado del arte por técnicas de solución

Método	Autor	Año	Modelo	Característica
Algoritmo de construcción	Clarke & Wright [45], Brown [37], Chu [53]	1964, 2003, 2005	CVRP	Múltiple demanda y múltiple capacidad de vehículos
Desintegración en subproblemas	Powell, W. B. [60]	1986	CVRP VRPPD	Recolección y entrega de cajas llenas y vacías.
Preprocesa, construye rutas y secuencia las rutas	Barnhart & Kim [38]	1995	CVRP VRPPD MFVRP	Envíos de larga distancia, con vehículos de doble caja
AG (Algoritmo genético)	Sadjadi ET AL. [15]	2009	CVRP VRPTW VRPPD	Considera el inventario de material
Relajación Lagrangiana	Dai & Chen [22], Argueta et al. [13]	2009, 2014	CVRP VRPTW VRPPD	Colaboración entre transportistas, demoras en aduanas
ACO (Optimización por enjambre de partículas)	Ai et al. [57] Barcos et al. [26], Musa et al. [55], Ma [28]	2009 2010 2013	CVRP VRPPD MDVRP	Considera el nivel de servicio de las rutas, envíos directos e indirectos, rutas lecheras
TS (Búsqueda Tabú)	Liao et al. [56]	2010	CVRP VRPTW	Inventario
B&C (Ramificación y corte)	Hernández et al. [24]	2011	CVRP VRPTW	Colaboración entre transportistas
SWO (Squeaky Wheel Optimization) AG (Algoritmo genético)	Ma et al. [28]	2011	CVRP VRPTW	Descuento en costos de transporte e inventario
Búsqueda por vecindario	Wang & Kopfer [52]	2014	VRPTW	Colaboración entre transportistas
HS (Harmony Search) SA (Recocido Simulado)	Hosseini et al. [47]	2014	CVRP VRPPD	Tres tipos de envíos: directos, indirectos y rutas lecheras

Dentro de la revisión de la literatura, se encontró el modelo propuesto por (Hosseini et al., 2014), en el cual abordan tres tipos de envíos en servicio de transporte LTL, los cuales fueron mencionados en párrafos anteriores. Con base en este modelo, se comparó el presente problema, ya que presentan las tres estrategias abordadas en esta investigación. Sin embargo, no se utiliza ese modelo debido a la forma de análisis de los costos de envío, ya que QSL no define los costos de la misma manera que Hosseini. De manera contraria, se consideran diferentes aspectos, tales como la distancia entre origen y destino, los costos o tarifas para cada uno, el peso transportado, el costo por gasolina del envío, descuentos por transportista, entre otras características. Sin embargo, de acuerdo con ese modelo (ecuación (9)), se toman ideas para adaptar el modelo que será

usado en esta investigación, el cual se define en la siguiente sección. El modelo propuesto por (Hosseini et al., 2014), se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} u_{ij} c_{ij} + \sum_{i \in O} \sum_{j \in CC} m_{ik} c_{ik} + \sum_{i \in CC} \sum_{j \in D} n_{kj} c_{kj} \\
 & + \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} \sum_{g \in W} \sum_{r \in V_4} x_{igr}^j c_{ig}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Independientemente de las particularidades del problema, cabe destacar que cualquier tipo de VRP es un problema complejo, por lo tanto la mayoría de los autores presentados deciden abordar estos temas con diferentes técnicas de aproximación. De acuerdo con la forma en que los diferentes problemas son abordados, la revisión de estos artículos constituyó a la elección del AG (Algoritmo Genético) como la técnica de optimización del modelo matemático que se usará (descritos a detalle en el siguiente capítulo), sin embargo, la programación del mismo será un caso muy particular con respecto a los trabajos previamente analizados.

Además de lo anterior, dentro de la literatura se establecen múltiples ventajas por utilizar este servicio de transporte, donde también se presentan diferentes desventajas, principalmente por la utilización de CC. La Tabla 3, presenta las diferentes ventajas y desventajas al utilizar este servicio de transporte (Barnhart & Kim, 1995) (Dai & Chen, 2009) (Sadjadi et al., 2009) (Barcos et al., 2010)(Hernández et al., 2011) (Argueta et al., 2014).

Tabla 3. Ventajas y desventajas del servicio de transporte LTL (diferentes autores).

Característica	Ventajas	Desventajas
Tamaño de la carga	De pequeño a mediano tamaño.	Cuando las cargas son demasiado pequeñas o mayores a 20, 000 libras.
Transporte	No se paga el costo por usar un camión completo, se comparte el uso del vehículo en el trayecto.	Requiere de paradas en diferentes lugares para la consolidación de las cargas, dependiendo de la estrategia de envío.
Transportistas	Se establecen acuerdos para el movimiento de la carga.	Requiere la coordinación de los diferentes transportistas que participan en los envíos, por lo tanto se necesita determinar la disponibilidad de ellos.
Centros de Consolidación	No requiere del almacenamiento en un lugar especial, ya que la mayoría de los CC funcionan como crossdocking.	Costo externo por uso del CC.
Consolidación de carga	Se paga una parte proporcional del transporte de la mercancía, dependiendo del peso/volumen del embarque.	Existen riesgos por manipulación de las cargas debido a los cambios entre un vehículo y otro.
Costos	Ahorro en costos de transporte, ya que se comparten principalmente los gastos de envío.	Incremento en costos por múltiples envíos y posibles demoras por el uso de centros de consolidación.

Oportunidad de colaboración	Dependiendo de la disponibilidad de los transportistas, se establece la colaboración entre los mismos, para lograr una entrega efectiva, dependiendo de la ubicación de recolección y/o entrega.	Incremento en tiempos de entrega debido a la disponibilidad de los intercambios entre los transportistas involucrados.
Nivel de servicio	Se maximiza el nivel de servicio de cada uno de los envíos, por aprovechar la capacidad de carga de un camión debido a la consolidación de las mismas.	Se ve afectado por factores ajenos a las operaciones, por ejemplo terceras personas que están involucrados debido a la consolidación de las cargas.
Inventario	Se reduce el inventario, ya que se realizan envíos pequeños sin necesidad de almacenar la carga.	No se tiene la capacidad para envíos imprevistos por la falta de inventario.
Tiempos de entrega	Se establecen acuerdos entre los transportistas para determinar periodos de entrega considerablemente más amplios.	Se incrementa el tiempo de entrega por el envío indirecto al centro de consolidación.

2.3. METODOLOGÍA

Esta sección presenta la metodología utilizada en el desarrollo de la presente investigación. La Ilustración 10 muestra el diagrama de flujo de la metodología empleada, la cual es descrita más adelante.

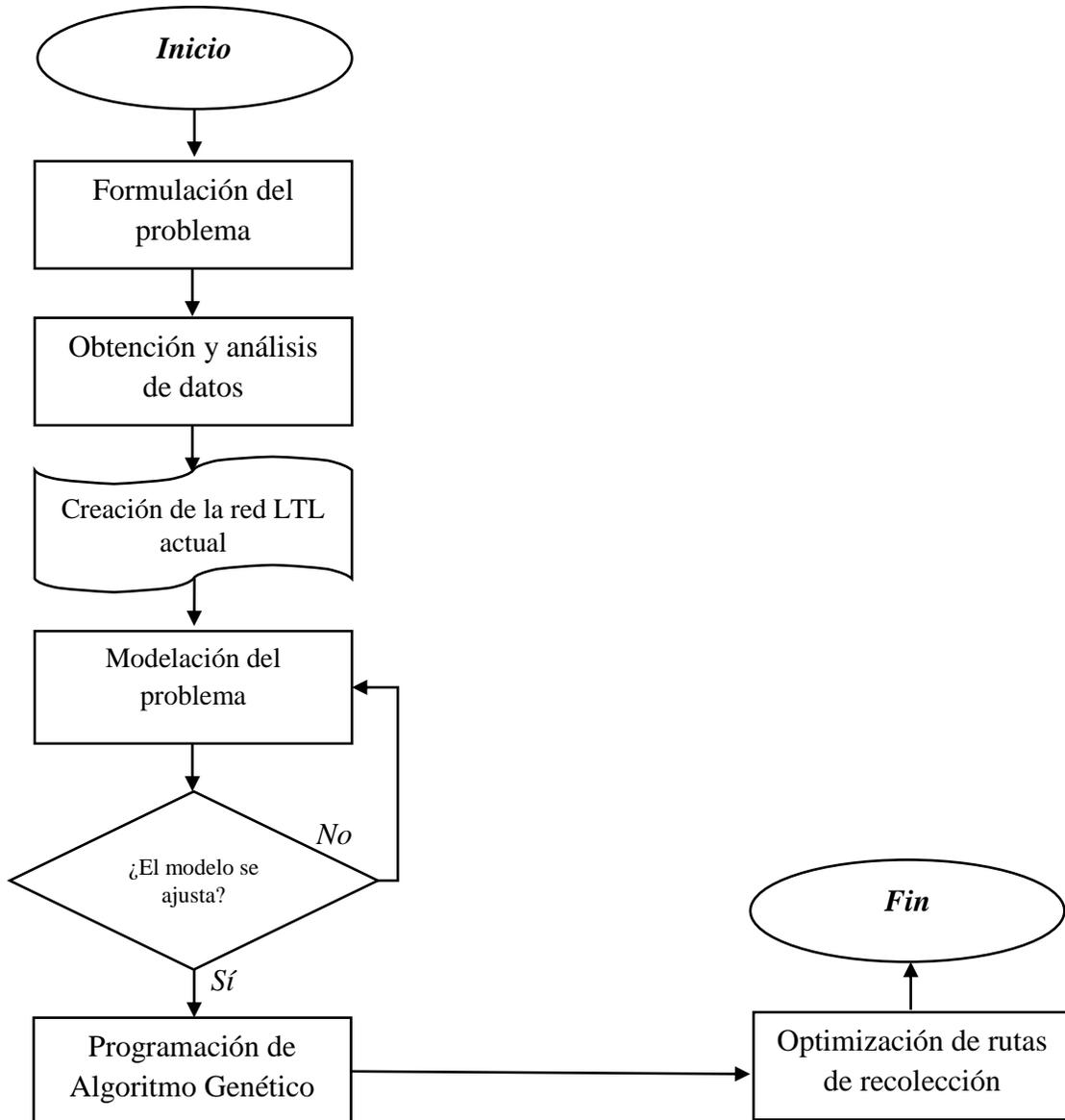


Ilustración 10. Metodología. Fuente: elaboración propia.

2.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Inicialmente, se establece la formulación del problema que es descrita en el primer capítulo, y se resume en determinar rutas de recolección de los embarques LTL, con base en las órdenes programadas, que reduzcan los costos de transporte de acuerdo con las estrategias de envío presentadas.

Para iniciar continuar con la metodología, se procede a realizar la obtención y el análisis de datos, los cuales deben contener la siguiente información:

- Ubicación de proveedores, CC y CD (direcciones exactas/localización geográfica).
- Distancias entre proveedores, entre proveedores y CC, entre proveedores y CD, entre CC y CD.
- Tamaños de embarques y tipos de rangos.
- Entre otros (por ejemplo: el porcentaje de cargo por combustible).

Una vez obtenidos los datos, se continúa con la creación de las matrices de distancias (que son expuestas en el siguiente capítulo), además de la red de distribución actual para determinar la forma de trabajo que se efectúa actualmente.

Después de obtener las matrices de distancias y la red de distribución actual, se procede a crear el modelo científico que contempla las estrategias de envío previamente analizadas, basados principalmente en la composición de costos para cada una.

La forma de ajuste del modelo con la que se trabaja, es de acuerdo con la información histórica, en donde se prueba el modelo con los parámetros y datos de 5 diferentes días y cantidades de embarques desde las 150 a las 18000, los cuales ya han sido entregados, anteriormente por QSL. El modelo fue modificado cada día con 4 cargas diferentes en cada una de las estrategias. De acuerdo con lo anterior se realizan los ajustes necesarios en cuanto a costos y distancias para que este modelo represente adecuadamente el problema bajo estudio.

Cuando el modelo es ajustado y representa correctamente las estrategias de envío con base en los parámetros analizados, se continúa con la programación del algoritmo genético. Definiendo dos tipos de algoritmos para esta investigación, un Algoritmo Genético No Generacional y un Algoritmo Genético Generacional Elitista. Para la programación de ambos, se realiza una codificación muy particular principalmente del genotipo para los individuos, pero también tanto de la función de evaluación, como en los operadores de cruce y mutación, debido a la composición del modelo y a la forma de representación de las estrategias en esta investigación. En cuanto al procedimiento de selección, se utilizan los dos tipos más comunes: selección por ruleta y por torneo.

Ambos algoritmos son analizados con diferentes experimentos, haciendo una comparación de los resultados en tiempo de ejecución y en el costo total de las rutas generadas.

CAPÍTULO III

3.1. EXPERIMENTACIÓN

3.1.1. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Como parte de la experimentación inicial del proyecto, se tiene la recolección de datos de la empresa. Esta información incluye para cada uno los siguientes puntos:

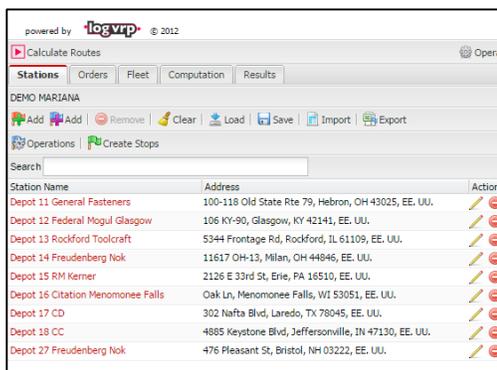
- Dirección: calle, número, ciudad, estado, código postal y país de origen de los proveedores.
- Peso de la carga (libras).
- Tiempos de procesamiento de las órdenes de recolección.
- Datos históricos desde 2015.

Esta información ha sido recopilada de la base de datos del caso de estudio mostrado en el capítulo I, misma que es ingresada al sistema tanto por los proveedores (quienes cargan las órdenes que serán recolectadas), como el personal de la misma empresa. Los transportistas que recolectan las cargas son asignados, así como el agente aduanal quien se encarga de recibir los embarques en las bodegas de la aduana o el CD. El Anexo 1 presenta el ejemplo de un reporte de envíos mensual de cada proveedor.

3.1.2. COMPARACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS CON OTRAS PLATAFORMAS O SOFTWARE

Se analiza el software LogVRP®, para comparar los costos de envío de QSL con los resultados de envío del software. Para lo cual, se realiza una prueba con un día de órdenes de embarques (obtenido de los datos históricos). En este día, se presentó un registro de 7 EI todos procedentes de diferentes proveedores. Tales envíos fueron trasladados al CC para después transportarlos al CD. Los datos mencionados se muestran en el Anexo 2.

Se comienza con la cargar la información en el software desde las estaciones de servicio siendo éstas orígenes o destinos de la red de transporte. En este caso se definen 9 depósitos (o estaciones de servicio), de los cuales 7 son orígenes (proveedores) de donde se recolectan los embarques y 2 son destinos, el CC y CD. Para la primera prueba, se toma en cuenta como único destino el CC (Ilustración 11). La distribución geográfica de los depósitos o estaciones de servicio es mostrada en Ilustración 12 e Ilustración 13. Sin embargo, una de las limitantes que presenta este software es que en la versión gratis solo se pueden ingresar 10 estaciones o depósitos por proyecto.



Station Name	Address	Action
Depot 11 General Fasteners	100-118 Old State Rte 79, Hebron, OH 43025, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 12 Federal Mogul Glasgow	106 KY-90, Glasgow, KY 42141, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 13 Rockford Toolcraft	5344 Frontage Rd, Rockford, IL 61109, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 14 Freudenberg Nok	11617 OH-13, Milan, OH 44846, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 15 RM Kerner	2126 E 33rd St, Erie, PA 16510, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 16 Citation Menomonee Falls	Oak Ln, Menomonee Falls, WI 53051, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 17 CD	302 Nafta Blvd, Laredo, TX 78045, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 18 CC	4885 Keystone Blvd, Jeffersonville, IN 47130, EE. UU.	[Edit] [Delete]
Depot 27 Freudenberg Nok	476 Pleasant St, Bristol, NH 03222, EE. UU.	[Edit] [Delete]

Ilustración 11. Estaciones de servicio

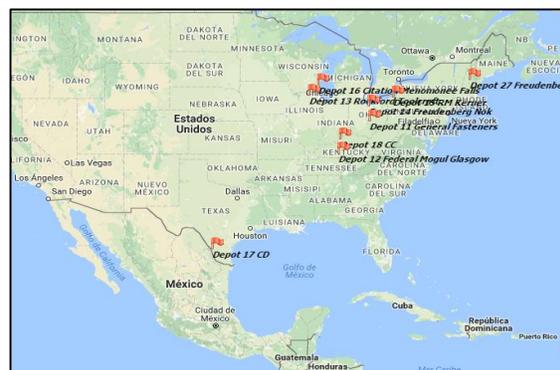


Ilustración 12. Ubicación de proveedores, CC y CD.



Ilustración 13. Ubicación de los 7 proveedores y CC.

Cuando los depósitos se ingresan, el siguiente paso es registrar las órdenes de servicio para las recolecciones. Para esto se toman en cuenta algunas consideraciones (Ilustración 14). Primeramente, se definen que los embarques parten de cada uno de los proveedores y se envían al CC. Segunda, se establece un tiempo promedio de duración de carga y descarga del embarque que depende de la cantidad total del peso del embarque. Tercera, cada uno de los embarques tiene una hora diferente para recolección. Estos horarios, son mostrados en el Anexo 2. Cuarta, los embarques tienen una fecha máxima de entrega de tres días, iniciando la cuenta un día después de la fecha de programación (para el ejemplo: 25 de agosto de 2016), comenzando desde las 8 a.m. y terminando a las 8 p.m. Como se aprecia en el Anexo 2, se tienen 7 órdenes programadas para ese día. Por último, la Ilustración 15 muestra la programación de estas órdenes.

Ilustración 14. Consideraciones de las órdenes de recolección.

Order-ID	From	To	Load	Type	Actions
ORD-18	Depot 27 Freudenberg Nok	Depot 18 CC	745	Parcel	[edit] [delete]
ORD-10	Depot 11 General Fasteners	Depot 18 CC	3888	Parcel	[edit] [delete]
ORD-12	Depot 12 Federal Mogul Gl...	Depot 18 CC	11170	Parcel	[edit] [delete]
ORD-14	Depot 13 Rockford Toolcraft	Depot 18 CC	2250	Parcel	[edit] [delete]
ORD-16	Depot 14 Freudenberg Nok	Depot 18 CC	66	Parcel	[edit] [delete]
ORD-18	Depot 15 RM Kerner	Depot 18 CC	725	Parcel	[edit] [delete]
ORD-20	Depot 16 Citation Menomo...	Depot 18 CC	1265	Parcel	[edit] [delete]

Ilustración 15. Órdenes de recolección y envío.

La siguiente parte es establecer el número de vehículos que se utilizarán para los traslados, con lo cual se define una posición inicial y final de viaje de cada vehículo. Como posición inicial, se cargan algunos de los depósitos definidos anteriormente y como destino se establece el CC. Al igual que en la programación de recolección, se tienen diferentes consideraciones (Ilustración 16). Se define como la capacidad máxima del vehículo menor o igual a 41,000 libras, una velocidad promedio del vehículo de 80 km/hora, un costo fijo de \$100, un costo por km dependiendo de qué estación parte el camión (estos costos se pueden observar en el Anexo 3), una fecha y hora de partida individual de los vehículos. Además de lo anterior, los costos de envío se manejan en dólares, la distancia en km y el peso en libras.

Otras de las limitantes del software es que al igual que en las estaciones, no es posible ingresar más de 5 vehículos en la versión gratis (Ilustración 17). Además, es obligatorio definir la posición de partida de cada vehículo.

Ilustración 16. Consideraciones de los vehículos.

powered by **logvrp** © 2012

Calculate Routes Operations ▾

Stations Orders **Fleet** Computation Results

DEMO MARIANA

Add Vehicle Remove Clear Load Save Import Export

Reset Time

Search

Vehicle Name	Capacity	Load/Skill/Service	Departure Date	Actions
V-1	41000	Parcel	08:00 22/08/2016	
V-2	41000	Parcel	08:00 22/08/2016	
V-3	41000	Parcel	08:00 22/08/2016	
V-4	41000	Parcel	08:00 22/08/2016	
V-5	41000	Parcel	08:00 22/08/2016	

Ilustración 17. Ingreso de vehículos de recolección.

3.1.2.1. Resultados del análisis

LogVRP® utiliza dos algoritmos de optimización, el algoritmo de Jan Dethloff modificado y una adaptación del algoritmo de ampliación de búsqueda local. Ambos algoritmos muestran los mismos resultados para todas las rutas creadas (Ilustración 18, Ilustración 19).

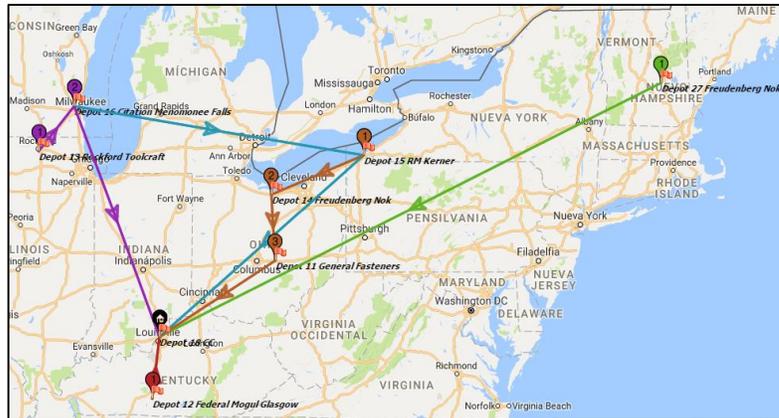


Ilustración 18. Distribución de rutas.

Calculate Routes					
Operations					
Stations	Orders	Fleet	Computation	Results	
Result Map View <input type="checkbox"/> Clear <input type="checkbox"/> Export <input type="checkbox"/> Load Route Set <input type="checkbox"/> Edit <input type="checkbox"/> Hide Detail View					
S	Algorithm	Distance	Cost	Travel T.	Vehicle Count
✓	J.D.A.M.	5,239 Km	\$ 2,316	9 d. 18 h.	5
✓	A.L.N.S.	4,575 Km	\$ 1,978	9 d. 14 h.	5
Routes	Distance	Expenses	Load		
Route 1: (V-5, 41000 Piece of Parcel)					
Total 1 Step(s)	171 Km	\$ 426	D:11170 P:11170		
Route 2: (V-4, 41000 Piece of Parcel)					
Total 1 Step(s)	1,594 Km	\$ 339	D:745 P:745		
Route 3: (V-2, 41000 Piece of Parcel)					
Total 2 Step(s)	1,833 Km	\$ 1,072	D:0 P:725		
Route 4: (V-3, 41000 Piece of Parcel)					
Total 2 Step(s)	827 Km	\$ 257	D:2250 P:3515		
Route 5: (V-1, 41000 Piece of Parcel)					
Total 3 Step(s)	814 Km	\$ 222	D:0 P:3954		

Ilustración 19. Resultados de rutas (distancia-costo).

Routes	Distance	Expenses	Load	Pick up	Delivery	Capacity Usage	Departure Time	Arrival Time	Travel Dura...
Route: 1: (V-5, 41000 Piece of Parcel)									
1. Depot 12 Federal Mogul Glasgow > Depot 18 CC	170 Km	\$ 326	11170 Piece	0 Piece	11170 Piece	27%	06:52 25/08/2016	09:00 25/08/2016	2 h. 8 m.
Total 1 Step(s)	171 Km	\$ 426	D:11170 P:11170			27%	06:52 25/08/2016	09:00 25/08/2016	2 h. 8 m.
Route: 2: (V-4, 41000 Piece of Parcel)									
1. Depot 27 Freudenberg Nok > Depot 18 CC	1,594 Km	\$ 239	745 Piece	0 Piece	745 Piece	2%	12:04 24/08/2016	08:00 25/08/2016	19 h. 56 m.
Total 1 Step(s)	1,594 Km	\$ 339	D:745 P:745			2%	12:04 24/08/2016	08:00 25/08/2016	19 h. 56 m.
Route: 3: (V-2, 41000 Piece of Parcel)									
1. Depot 16 Citation Menomonee Falls > Depot 15 RM Kerner	937 Km	\$ 497	0 Piece	725 Piece	0 Piece	0%	08:00 22/08/2016	19:42 22/08/2016	11 h. 43 m.
2. Depot 15 RM Kerner > Depot 18 CC	896 Km	\$ 475	725 Piece	0 Piece	725 Piece	2%	21:47 24/08/2016	09:00 25/08/2016	11 h. 12 m.
Total 2 Step(s)	1,833 Km	\$ 1,072	D:0 P:725			1%	08:00 22/08/2016	09:00 25/08/2016	3 d. 1 h.
Route: 4: (V-3, 41000 Piece of Parcel)									
1. Depot 13 Rockford Toolcraft > Depot 16 Citation Menomonee Falls	182 Km	\$ 34.50	2250 Piece	1265 Piece	0 Piece	5%	12:43 22/08/2016	15:00 22/08/2016	2 h. 16 m.
2. Depot 16 Citation Menomonee Falls > Depot 18 CC	645 Km	\$ 123	3515 Piece	0 Piece	3515 Piece	9%	00:56 25/08/2016	09:00 25/08/2016	8 h. 4 m.
Total 2 Step(s)	827 Km	\$ 257	D:2250 P:3515			8%	12:43 22/08/2016	09:00 25/08/2016	2 d. 20 h.
Route: 5: (V-1, 41000 Piece of Parcel)									
1. Depot 15 RM Kerner > Depot 14 Freudenberg Nok	257 Km	\$ 38.50	0 Piece	66 Piece	0 Piece	0%	10:47 22/08/2016	14:00 22/08/2016	3 h. 13 m.
2. Depot 14 Freudenberg Nok > Depot 11 General Fasteners	168 Km	\$ 25.10	66 Piece	3888 Piece	0 Piece	0%	14:30 22/08/2016	17:14 22/08/2016	2 h. 44 m.
3. Depot 11 General Fasteners > Depot 18 CC	390 Km	\$ 58.50	3954 Piece	0 Piece	3954 Piece	10%	04:07 25/08/2016	09:00 25/08/2016	4 h. 53 m.
Total 3 Step(s)	814 Km	\$ 222	D:0 P:3954			5%	10:47 22/08/2016	09:00 25/08/2016	2 d. 22 h.

Ilustración 20. Detalle resultados de rutas.

De acuerdo con los resultados del software, las Ilustración 19 Ilustración 21 muestran que los algoritmos utilizados resumen resultados diferentes. El algoritmo de Jan Dethloff modificado muestra un resultado en costo y distancia mayor que algoritmo de ampliación de búsqueda local, por lo tanto el software solo considera los resultados del segundo. Sin embargo se aprecia que 3 de los 5 vehículos realizan más de una parada, formando con eso más de un EMR, lo cual no coincide con el caso de estudio. Es por lo anterior que la distancia recorrida por el algoritmo es menor a la distancia real reportada en los datos históricos del caso de estudio.

Además, como lo muestra la Ilustración 18 la distribución de las rutas no es factible puesto que el software realiza una secuencia incorrecta de trayectos, debido a que en el recorrido que realizan las rutas 3 y 5, los vehículos parten de las estaciones sin carga alguna y hasta que llega a la siguiente estación es cargado con el embarque. A consecuencia de esta situación, otro vehículo debe llegar a la estación de donde parten los anteriores para recolectar los pedidos de esos lugares. Por lo tanto, con base en esos recorridos, los costos de envío de todos los embarques son superiores a comparación con los costos de envío QSL (Anexo 4).

3.1.2.2. Segundo análisis

Con base en los resultados anteriores se realiza un segundo análisis. El análisis consiste en definir una misma hora de recolección para cada embarque. Por lo tanto, se considera como hora de recolección las 8 a.m. (ya que en horario de trabajo normal, es una hora en a que los proveedores de servicio de transporte comienzan las recolecciones) de un día en específico para todos (Anexo 5).

3.1.2.3. Resultados segundo análisis

La distribución de las rutas y los resultados de las mismas dadas por el software son mostradas en las Ilustración 21 y Ilustración 22. Los detalles de las rutas creadas por los algoritmos son mostrados en la Ilustración 23 y la Ilustración 24.

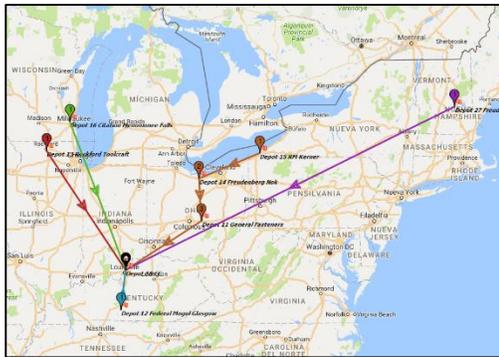


Ilustración 21. Distribución de rutas.

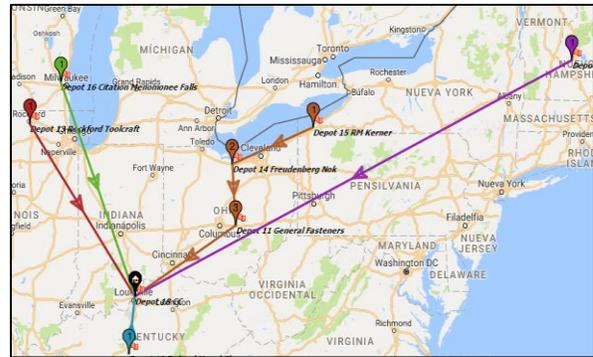


Ilustración 22. Distribución de rutas 2.

Calculate Routes				
Stations	Orders	Fleet	Computation	Results
Result Map View Clear Export Load Route Set Edit Show Detail View				
S	Algorithm	Distance	Cost	Travel T. Vehicle Count
✓	J.D.A.M.	4,115 Km	\$ 1,687	4 d. 18 h. 5
✓	A.L.N.S.	4,115 Km	\$ 1,687	4 d. 18 h. 5
Routes		Distance	Expenses	Load
Route 1: (V-4, 41000 Piece of Parcel)				
1.	Depot 27 Freudenberg Nok > Depot 18 CC	1,831 Km	\$ 275	745 Piece
Total 1 Step(s)		1,831 Km	\$ 375	D:745 P:745
Route 2: (V-2, 41000 Piece of Parcel)				
1.	Depot 16 Citation Menomonee Falls > De...	645 Km	\$ 342	1265 Piece
Total 1 Step(s)		645 Km	\$ 442	D:1265 P:1265
Route 3: (V-5, 41000 Piece of Parcel)				
Total 1 Step(s)		171 Km	\$ 426	D:11170 P:11170
Route 4: (V-3, 41000 Piece of Parcel)				
1.	Depot 13 Rockford Toolcraft > Depot 18 CC	608 Km	\$ 116	2250 Piece
Total 1 Step(s)		608 Km	\$ 216	D:2250 P:2250
Route 5: (V-1, 41000 Piece of Parcel)				
Total 3 Step(s)		860 Km	\$ 229	D:725 P:4679

Ilustración 23. Resultados de rutas (distancia-costo).

Routes	Distance	Expenses	Load	Pick up	Delivery	Capacity Usage	Departure Time	Arrival Time	Travel Duration
Route: 1: (V-4, 41000 Piece of Parcel) 1. Depot 27 Freudenberg Nok > Depot 18 CC Total 1 Step(s)	1,831 Km	\$ 275	745 Piece	0 Piece	745 Piece	2%	09:06 24/08/2016	08:00 25/08/2016	22 h. 53 m.
	1,831 Km	\$ 375	D:745 P:745			2%	09:06 24/08/2016	08:00 25/08/2016	22 h. 53 m.
Route: 2: (V-2, 41000 Piece of Parcel) 1. Depot 16 Citation Menomonee Falls > Depot 18 CC Total 1 Step(s)	645 Km	\$ 342	1265 Piece	0 Piece	1265 Piece	3%	00:56 25/08/2016	09:00 25/08/2016	8 h. 4 m.
	645 Km	\$ 442	D:1265 P:1265			3%	00:56 25/08/2016	09:00 25/08/2016	8 h. 4 m.
Route: 3: (V-5, 41000 Piece of Parcel) 1. Depot 12 Federal Mogul Glasgow > Depot 18 CC Total 1 Step(s)	170 Km	\$ 326	11170 Piece	0 Piece	11170 Piece	27%	06:52 25/08/2016	09:00 25/08/2016	2 h. 8 m.
	171 Km	\$ 426	D:11170 P:11170			27%	06:52 25/08/2016	09:00 25/08/2016	2 h. 8 m.
Route: 4: (V-3, 41000 Piece of Parcel) 1. Depot 13 Rockford Toolcraft > Depot 18 CC Total 1 Step(s)	608 Km	\$ 116	2250 Piece	0 Piece	2250 Piece	5%	01:24 25/08/2016	09:00 25/08/2016	7 h. 36 m.
	608 Km	\$ 216	D:2250 P:2250			5%	01:24 25/08/2016	09:00 25/08/2016	7 h. 36 m.
Route: 5: (V-1, 41000 Piece of Parcel) 1. Depot 15 RM Kerner > Depot 14 Freudenberg Nok 2. Depot 14 Freudenberg Nok > Depot 11 General Fasteners 3. Depot 11 General Fasteners > Depot 18 CC Total 3 Step(s)	257 Km	\$ 38.50	725 Piece	66 Piece	0 Piece	2%	08:00 22/08/2016	11:12 22/08/2016	3 h. 13 m.
	213 Km	\$ 32.00	791 Piece	3888 Piece	0 Piece	2%	11:42 22/08/2016	14:22 22/08/2016	2 h. 40 m.
	390 Km	\$ 58.50	4679 Piece	0 Piece	4679 Piece	11%	04:07 25/08/2016	09:00 25/08/2016	4 h. 53 m.
	860 Km	\$ 229	D:725 P:4679			6%	08:00 22/08/2016	09:00 25/08/2016	3 d. 1 h.

Ilustración 24. Detalle resultados de rutas

Los resultados del segundo análisis demuestran que aun con el supuesto de que todos los pedidos se encuentran listos para recolección a las 8 a.m., el vehículo 5 realiza 3 paradas, formando un EM de la misma manera que en el análisis anterior. Los costos totales de envío del caso de estudio continúan siendo menores en comparación con los resultados del algoritmo de LogVRP®, esto se debe a que los costos y las distancias definidas para cada envío dependen de cada origen (proveedor).

A diferencia del análisis anterior, solo se tiene un EMR realizado por el vehículo 5 que presenta 3 paradas. Por lo cual, la distancia recorrida también es menor a la distancia real puesto que en el ejemplo se maneja un solo envío al CC por cada uno de los embarques, es decir, no maneja EMR. La comparación de los resultados del caso de estudio vs el segundo análisis se muestran en el Anexo 6.

3.1.2.4. Discusión de resultados

En cuanto a la comparación de costos, el resultado obtenido por LogVRP® es mayor al del estudio presentado, a consecuencia de que el costo ingresado depende de los kilómetros que se recorren en cada viaje. A diferencia de la situación real, que incluye también una relación del costo por el peso del embarque transportado.

Aunado a lo anterior, el caso de estudio trabaja con diferentes transportistas para cada tipo de envío. Cada uno de ellos cuenta con diferentes tarifas de envío, dependiendo del lugar de origen/destino, de la carga transportada y de las consideraciones específicas de

cada uno. Es debido a lo anterior que en la estimación del costo total de transporte intervienen múltiples variables o factores que no son considerados por LogVRP® como lo son:

- Costo por carga transportada.
- Relación costo-distancia.
- Cargos por exceso de peso de los embarques.
- Costo de gasolina.
- Descuentos por determinada cantidad de envíos.
- Rangos de precios distancia/peso.
- CTW (costo por cada 100 libras).
- Entre otras.

Lo anterior se justifica en que el software analizado, solo considera en el análisis el costo por kilómetro recorrido, esto funciona únicamente como una herramienta de soporte para aquellas empresas que cuentan con una flota de vehículos propia, en la que se tiene un costo determinado del servicio y solo varía dependiendo de los kilómetros que recorran los vehículos. Considerando que el presente caso de estudio trabaja con una flota subcontratada, el software no es funcional a causa de todas las variables consideradas en el costo del transporte para cada uno de los transportistas.

Además de LogVRP®, existen diferentes softwares para análisis y creación de rutas de transporte. Mismos que al igual que el anterior, se enfocan en reducir los tiempos de viaje, en donde una de las principales aportaciones es eliminar los tiempos de retrasos o demoras en los CC. Esto indica que para utilizar estos softwares se debe de trabajar con CC propios y no contratados.

Como podemos ver, en el mercado actual existen diferentes herramientas para la selección de rutas de transporte. Sin embargo, es a causa de los problemas complejos como el servicio en LTL, que no es posible abordar estas herramientas dadas las características de cada problema en particular.

3.1.3. CREACIÓN DE MATRICES DE DISTANCIAS Y COSTOS

Para trabajar con las diferentes estrategias de envíos de los embarques, se requiere la elaboración de las matrices de distancias, puesto que de acuerdo con cada estrategia trabajada, será la matriz de distancias que se necesita. Las cuales son presentadas a continuación.

3.1.3.1. Matriz distancias de orígenes a CD

Esta matriz se utiliza en los ED, es decir que van desde el origen (los proveedores) y viajan directamente al destino (en este caso el CD). Dado que en el caso de estudio se tienen 54 proveedores, esta matriz es de tamaño 54×1 . La matriz de proveedor a CD es mostrada en la el Anexo 7.

3.1.3.2. Matriz de costos de orígenes a CD

De acuerdo con la forma de trabajo del transportista del caso bajo estudio, para los ED se crea la matriz de costos del proveedor al CD (Anexo 8). La explicación de estos costos se expondrá más adelante en la descripción del modelo matemático.

3.1.3.3. Matriz de distancias de orígenes a CC

Al igual que la matriz de proveedor a CD, esta matriz es de tamaño 54×1 (Anexo 9), utilizada para los EI. En dicha matriz se analizan las distancias de viaje desde cada uno de los proveedores hasta el CC.

3.1.3.4. Matriz de distancias de orígenes a orígenes

De la misma manera, se desarrolla la matriz de orígenes a orígenes (o de proveedor a proveedor de acuerdo con el caso de estudio), la cual tiene una dimensión de 54×54 . Esta matriz es utilizada para los EMR, en donde se analizan las distancias de viaje entre cada uno de los proveedores (Anexo 10).

3.1.4. MODELO CIENTÍFICO DE ESTRATEGIAS

De acuerdo con las estrategias descritas en el capítulo 2 y la revisión del estado del arte para los problemas de ruteo de vehículos en redes de transporte LTL, se propone un modelo científico que contempla conjuntamente las estrategias presentadas el cual es mostrado a continuación.

Función objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left(\sum_{i=1}^n CTW_{iCD} * X_{iCD} \right) + \left\{ \sum_{i=1}^n [CTW_{iCC} + (u_{iCC} + FCC)] * X_{iCC} \right\} \\ & + \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(CMI_{ij} * X_{ij}) + (CKY_{ij} * X_{ij}) + (CNC_{ij} * X_{ij})] + K \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Envíos directos:

$$X_{iCD} = \begin{cases} 1, & \text{es un envío directo} \\ 0, & \text{no es un envío directo} \end{cases} \quad (11)$$

$$CTW_{iCD} = \left[\frac{CTW_{ik}}{100} * u_i \right] + \left[\left(\frac{CTW_{ik}}{100} * u_i \right) * FSC \right] \quad (12)$$

$$CTW_{iCD} = \begin{cases} \text{si } CTW_{iCD} > PM_{iCD}, & = CTW_{iCD} \\ \text{si } CTW_{iCD} \leq PM_{iCD}, & = PM_{iCD} \end{cases} \quad (13)$$

Envíos indirectos:

$$X_{iCC} = \begin{cases} 1, & \text{es un envío indirecto} \\ 0, & \text{no es un envío indirecto} \end{cases} \quad (14)$$

$$CTW_{iCC} = \left[\frac{CTW_{ik}}{100} * u_i \right] + \left[\left(\frac{CTW_{ik}}{100} * u_i \right) * FSC \right] \quad (15)$$

$$CTW_{iCC} = \begin{cases} \text{si } CTW_{iCC} > PM_{iCC}, & = CTW_{iCC} \\ \text{si } CTW_{iCC} \leq PM_{iCC}, & = PM_{iCC} \end{cases} \quad (16)$$

Envíos Milk Run:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{es un envío Milk Run} \\ 0, & \text{no es un envío Milk Run} \end{cases} \quad (17)$$

$$CMI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(CMMI * d_{ij}) + PS + FSC] \quad (18)$$

$$CKY = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(CMKY * d_{ij}) + PS + FSC] \quad (19)$$

$$CNC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(CMNC * d_{ij}) + PS] \quad (20)$$

Sujeto a:

$$u_i \leq W_{LTL} \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij} \leq W \quad (22)$$

Variables:

CTW_{iCD} = costo dependiente de origen y rango de las libras.

u_i = total de libras del embarque movido del origen i .

$i = 1, 2, 3, \dots, 54$ (origenes donde se ubican los proveedores).

CD = unico destino final Centro de Distribución.

CC = destino Centro de Consolidación.

X_{iCD} = Variable de de desición para ruta directa.

k = Rangos de pesos.

$$k = \begin{cases} 1 = 0 - 499 \text{ libras} \\ 2 = 500 - 999 \text{ lbs} \\ 3 = 1000 - 1999 \text{ lbs} \\ 4 = 2000 - 4999 \text{ lbs} \\ 5 = 5000 - 9999 \text{ lbs} \\ 6 = 10000 - 19000 \text{ lbs} \end{cases}$$

PM_{iCD} = Costo por meso mínimo, depende del origen.

PM_{iCC} = Costo por meso mínimo, depende del origen.

FSC = Cargo por combustible, depende del dólar.

FCC = \$0.05248 (Factor de caja consolidación).

W_{LTL} = Peso máximo de envío directo (20,000 libras).

CM = costo por milla dependiendo de la zona.

CMMI = \$1.20 para la zona de Michigan.

CMKY = \$1.40 para la zona de Kentucky.

CMNC = \$1.30 para la zona de Carolina del Norte.

C = costo por zona.

d_{ij} = matriz de distancias en millas proveedor a proveedor.

PS = \$50.00 (costo por parada).

FSC = \$20.00 (costo del combustible por parada).

W = 41,000 libras (capacidad de carga de caja completa).

K = \$2,800.00 (costo de caja completa)

Nota: los costos descritos en este caso de estudio se consideran en moneda americana (dólar).

La ecuación (10) describe el modelo científico para el presente problema, el cual está compuesto de tres partes. La primera de ellas corresponde a los ED, la segunda a los EI y la tercera a los EMR. Como se mencionó dentro del planeamiento del problema, los EC (Envíos en Combo) también se consideran como EMR, la cual indica que para formar un envío de este tipo se deben presentar al menos dos paradas.

Las ecuaciones (11), hacen referencia a una variable de decisión X , la cual se activa o no se activa, definiendo cada una a un tipo de envío.

Para las partes del modelo de envíos directos y envíos indirectos, el CTW que corresponde al costo de envío, se define en las ecuaciones (12) y ((15/16). El cual se compone de un CTW_{ik} , donde i es un origen y k es un rango de pesos en el cual se ubica el embarque, esto es dividido entre 100 y multiplicado por el peso del mismo embarque. El valor de ese costo, es sumado al mismo costo pero este debe estar multiplicando al valor FSC, que es el cargo por combustible. Para los EI en la función objetivo, este CTW además debe estar sumando al costo de envío del CC al CD, por lo tanto se agrega la multiplicación del peso del embarque por el FCC (el cual es un Factor de Costo Consolidado y se obtiene de dividir el costo total del embarque entre las libras totales de la caja).

En cuanto al CTW, de los costos de EMR lo componen las ecuaciones (18)), ((19) y ((20). En este modelo, se toman en cuenta tres diferentes costos, dependiendo de la zona en la cual se encuentren los proveedores. Además, cada vez que el transportista realiza una parada, se agregara un costo de \$50.00 y de \$20.00 por el gasto de combustible.

Las restricciones para el modelo, únicamente corresponden al límite de peso de cada estrategia o al límite del peso del vehículo. Estas son definidas por las ecuaciones (21) y (22).

Cabe destacar que todos los costos definidos por el presente caso de estudio, se consideran en moneda americana (dólares). De lo anterior, se observa que las principales componentes del costo para cada una de las estrategias de envío son: la distancia que es fija (pero depende de cada una de las estrategias que se estén utilizando) y el peso el cual

es un componente variable. Sin embargo, existen otras componentes del costo, que dependen del transportista con el cual se trabaje.

3.1.4.1. FORMA DE AJUSTE DEL MODELO

Para validar que el modelo mostrado representa correctamente las estrategias presentadas, se realizaron diferentes pruebas. Cada prueba constituye diferentes días de envíos de QSL, por lo tanto la información utilizada para estas pruebas se obtuvo de la recolección de información histórica de años anteriores y se realizaron los cálculos necesarios (de acuerdo al modelo) en una hoja de cálculo de Excel ®.

A continuación, la Tabla 4 muestran un ejemplo de las pruebas que se hicieron con la información histórica.

Tabla 4. Ejemplo de pruebas de ajuste del modelo, para ED

Proveedor	Distancia al CD	Peso de envío (lbs)	Rango de pesos	Costo al CD	Costo envío	Costo combustible	Costo total de envío
ALLIED CHUCKER	1525	5084	5	\$ 10.06	\$ 511.45	\$ 61.37	\$ 572.82
FREUDENBERG NOK	1573	245	1	\$ 15.74	\$ 38.56	\$ 4.63	\$ 43.19
NTN BOWER CORP	1259	980	2	\$ 12.23	\$ 119.85	\$ 14.38	\$ 134.24
R M KERNER CO ERIE	1705	17300	6	\$ 8.07	\$ 1,396.11	\$ 167.53	\$ 1,563.64
						Suma =	\$ 2,313.89

Los costos obtenidos en cada prueba, coinciden con los costos generados en los datos históricos de QSL. Por lo tanto, de acuerdo con las pruebas realizadas, se supone que el modelo científico propuesto representa adecuadamente la generación de los costos de los envíos, para ED y EI, ya que los EMR son definidos a partir de la forma de trabajo del transportista.

3.1.5. CODIFICACIÓN DEL MODELO

Debido a la forma en que se aborda el problema en particular de redes de transporte para servicio LTL, se puede observar que encontrar la combinación de rutas óptimas para el traslado de los embarques no es una tarea sencilla. Esto se puede describir como un problema de optimización multiobjetivo, en donde se perciben dos objetivos: 1) maximizar la capacidad de carga de los vehículos y 2) minimizar los costos de envío. No obstante, con base en la complejidad del problema, el objetivo primordial que se persigue en esta investigación es minimizar los costos de envío, es por esto que la capacidad de los vehículos se considera únicamente como restricciones del modelo y solo se limita a especificar el rango de peso máximo de carga en los vehículos. Sin embargo, se espera que la capacidad utilizada en los vehículos sea mejorada de acuerdo con la reducción de costos y la selección de estrategias óptima.

Contemplando todas las formas de envío y de acuerdo con todas las variables (analizadas en el presente caso de estudio) el problema aumenta su complejidad, mostrando como máximo $1.2696403353658275925965100847567 * e^{73}$ posibles combinaciones entre las estrategias de envío (como ya se mencionó anteriormente, esta cifra se obtiene del factorial de 55, debido a que se tienen 54 orígenes o proveedores, incluido un destino, siendo este el CC o el CD), por lo tanto esta cifra representa las posibles rutas para el problema planteado, mismas que dependen principalmente de las órdenes de recolección. Es debido a la complejidad anterior que no es posible resolver este tipo de problemas con técnicas de optimización clásicas (Romero, Dafonte, Gómez, & Penousal, 2007).

Con base en la revisión del estado del arte, una de las técnicas para resolver problemas complejos de transporte (como el presentado en esta investigación) son los Algoritmos Genéticos, dado que es una de las herramientas que presenta mejores resultados en tiempos computacionales considerablemente menores a comparación de otras técnicas.

De acuerdo con el marco teórico presentado en el capítulo II, un Algoritmo Genético (AG) es una técnica de optimización que se basa en el procedimiento de selección

natural: la genética, con el objetivo de hacer evolucionar una población en un espacio de búsqueda. Se componen principalmente de una población de individuos, que evoluciona mediante acciones aleatorias que actúan en los procesos biológicos de cambio, como las mutaciones y recombinaciones entre los individuos. Además, selecciona los mejores o peores individuos adaptados, mediante diversas características definidas (Coello Coello, 1995).

Debido a las características específicas del caso de estudio, la representación genotípica para esta investigación es muy particular, por lo tanto se requiere desarrollar la codificación completa del algoritmo, mismo que no se puede trabajar concretamente como un AG simple o un AG de permutaciones (siendo este el más utilizado para problemas de transporte). A razón de lo expuesto, la presente técnica será considerada como un AG Heurístico, debido a las características particulares de codificación en cada etapa del algoritmo.

Además de lo anterior, se programaron dos tipos de algoritmos. El primero de ellos es un AG Generacional (AGG), en donde dentro del código principal, la selección se realiza de los hijos en cada una de las generaciones. El segundo es conocido como un AG No Generacional Elitista (AGNGE) (Torres Treviño, 2006). Para este tipo de algoritmo, en el código principal se conserva el individuo mejor evaluado y se establece en la primera posición de la población seleccionada que entra a la fase de variación. De la misma manera, el individuo mejor evaluado también se implanta en la primera posición de la nueva población generada para la siguiente generación. Con lo anterior se incrementa la presión selectiva del algoritmo, puesto que se conserva, la mejor solución encontrada de la población en cada generación, con esto evita que el algoritmo se pierda en el momento de aplicar los procedimientos de cruce y mutación. Dicha codificación, se presenta a continuación.

3.1.5.1. Pseudocódigos de AG

Antes de centrarse en la descripción del AG programado, se muestra principalmente el pseudocódigo del AGG. Posteriormente, se presenta el pseudocódigo del AG utilizado en esta investigación.

Pseudocódigo AGG

$P \leftarrow \text{Crear Población (NTI, NTPR)}$

Inicio de ciclo desde 1: NTGEN

$FE \leftarrow \text{Evaluar } P (P)$

$PS \leftarrow \text{Seleccionar } P (FE, P)$

$P \leftarrow \text{Variar } P (PS, PM, PC)$

Fin de ciclo

Pseudocódigo AGNGE

$P \leftarrow \text{Crear Población (NTI, NTPR)}$

Inicio de ciclo desde 1: NTGEN

$FE \leftarrow \text{Evaluar } P (P)$

$Min, Pos \leftarrow \text{Minimo (FE)}$

$Min(i, :) \leftarrow Min$

$Dato(i, :) \leftarrow P(Pos)$

$PS \leftarrow \text{Seleccionar } P (FE, P)$

$PS(1, :) \leftarrow Dato(i, :)$

$P \leftarrow \text{Variar } P (PS, PM, PC)$

$Min2, Pos2 \leftarrow \text{Minimo (Min)}$

$P(1, :) \leftarrow Dato(Pos2, :)$

Fin de ciclo

3.1.5.2. Crear población

El primer parámetro del algoritmo para crear la población es NTI (Número Total de Individuos), el cual consiste en el número total de individuos que formaran parte de la población. El segundo parámetro es el NTB (que representa el Número Total de Bits), específicamente este parámetro depende de los orígenes, para el presente caso representa la cantidad de órdenes de recolección, por lo tanto varía de acuerdo con la programación de órdenes diarias. El tamaño del individuo se calcula de la siguiente manera:

$$NTB = [(Número\ de\ órdenes + 1\ destino\ (CC\ o\ CD)) * Número\ de\ órdenes] + 1 \quad (23)$$

En la ecuación (23) NTB se compone del número total de órdenes que se pueden atender en una ruta, al cual se agrega un 1, que representa el destino, mismo que depende del envío ya sea CC para EI o CD para ED y EMR. Este valor es multiplicado por el total de las órdenes y a todo este resultado se agrega un 1, el cual representa el recorrido del CC al CD, en caso de que se realice un EI. Se visualiza la explicación anterior, con el ejemplo siguiente:

$$Ordenes = [2\ 14\ 38\ 46]$$

Cada orden de recolección representa un proveedor, de tal forma que, se tiene un total de 54 orígenes (proveedores para el caso de estudio). Siguiendo la secuencia de números comenzando en 1 con el proveedor 2 y terminando en 4 con el proveedor 46, se asigna el 55 para el destino al CC y el 56 para el destino final al CD, recordando que el total de orígenes para el caso de estudio son 54.

$$Destinos = [55\ 56]$$

$$NTB = [(4 + 1) * 4] + 1$$

$$NTB = 21$$

De acuerdo con lo anterior, la composición genotípica de la población está dada de la siguiente manera:

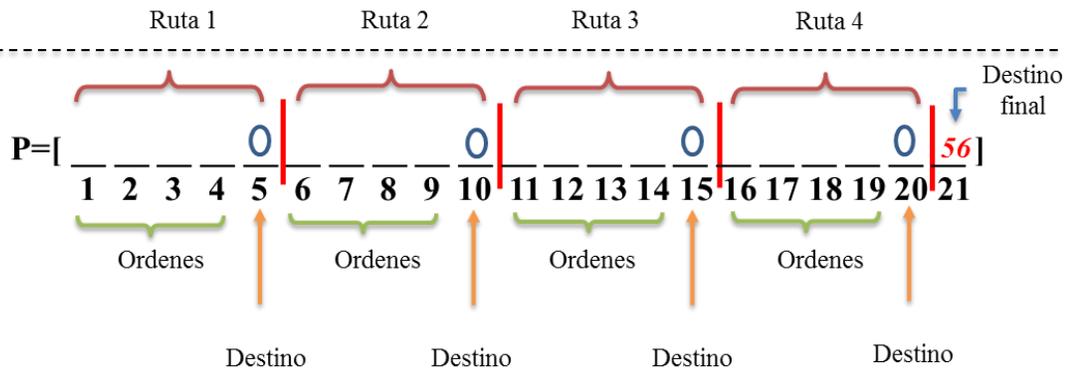


Ilustración 25. Composición genotípica de la población

Como lo muestra la Ilustración 25, esta composición principalmente se encuentra dividido en rutas. Las rutas dependen de la cantidad de órdenes de recolección que se programen. De acuerdo con el ejemplo anterior, cada ruta está compuesta de 5 bits, donde los primeros 4 representan las 4 órdenes a programar. El quinto bit corresponde al destino hacia donde se dirigirá el vehículo. Como se mencionó anteriormente, 55 corresponde al CD lo cual nos indica que es un EI, y 56 corresponde al CD, siendo este un ED o EMR. Esta asignación de bits se realiza para cada una de las posibles rutas de recolección. Hasta este punto se tienen 5 bits, por cuatro posibles rutas (de acuerdo con el número de órdenes), dando un total de 20 bits. Sin embargo, puesto que no se ha contemplado el recorrido del CC al CD en la asignación de destinos, al final del genotipo se agrega un último bit; este bit, definirá si dentro del individuo existe un EI o no. La manera en que esto será identificado depende del valor de ese último bit, si este es igual a 56, corresponde a uno o más EI, en caso contrario ese bit será igual a cero, dando por entendido que el individuo está compuesto por la combinación de ED y/o EMR.

Enseguida se presentan cuatro ejemplos de las combinaciones que pueden generarse en esta etapa del algoritmo.

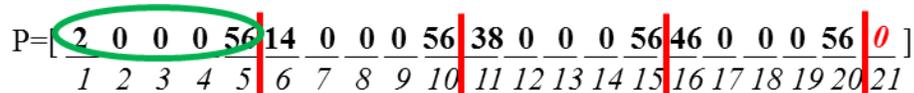


Ilustración 26. Codificación de ED (ejemplo 1)

$$P = \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc|c} 2 & 0 & 0 & 0 & 55 & 14 & 0 & 0 & 0 & 56 & 38 & 0 & 0 & 0 & 56 & 46 & 0 & 0 & 0 & 56 & 56 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 27. Codificación de ED y EI (ejemplo 2)

$$P = \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc|c} 2 & 14 & 0 & 0 & 56 & 38 & 46 & 0 & 0 & 56 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 28. Codificación de EMR (I) (ejemplo 3)

$$P = \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc|c} 2 & 14 & 38 & 46 & 56 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 29. Codificación de EMR (II) (ejemplo 4)

La Ilustración 26, muestra un ejemplo de una codificación de un individuo en el cual existen cuatro rutas, una para cada uno de los embarques en cuyo caso son ED. La Ilustración 27, muestra también una clasificación de un envío por cada una de las órdenes de recolección, sin embargo, en esta ilustración se observa que uno de los cuatro envíos se realiza en EI, los demás en ED. En cuanto a las Ilustración 28 y Ilustración 29, muestran ejemplos de algunas combinaciones de EMR, creando simultáneamente una y dos rutas respectivamente, las cuales satisfacen todos y cada uno de los envíos.

3.1.5.3. Función de Evaluación

De acuerdo con el modelo científico de las estrategias, la función de evaluación está compuesta por tres partes, cada una enfocada en un tipo de envío y además contienen las restricciones correspondientes a cada uno de estos respectivamente. Es debido a esto que la programación de la función objetivo en la presente investigación, es una de las partes más importantes en la codificación el algoritmo. El código completo de esta función se encuentra descrito en el Anexo 11.

3.1.5.4. Procedimiento de selección

Para el procedimiento de selección de los individuos, se programan los dos tipos de selección más utilizados en los AG: selección por torneo y selección por ruleta.

- ❑ **Selección por ruleta:** cada uno de los individuos de la población, tendrá una fracción proporcional de la ruleta, asignada según su valor de evaluación. Esta porción de ruleta será mayor o menor, de acuerdo con la puntuación obtenida en la función de evaluación. Debido a esto, el individuo con mayor puntuación tendrá mayor probabilidad de ser seleccionado. Sin embargo, una de las desventajas de este tipo de selección es cuando un individuo de la población tiene un 90% de probabilidad de ser seleccionado (Coello Coello, 1995), en cuyo caso el algoritmo se podría estancar en óptimos locales.

- ❑ **Selección por torneo:** se elige aleatoriamente un número determinado de individuos de la población, en donde el individuo con mejor o peor evaluación (dependiendo del objetivo del problema), será el que se reproducirá sustituyendo al descendiente con evaluación peor o mejor respectivamente (Rodríguez-Piñero, 2003).

3.1.5.5. Procedimiento de variación (reproducción)

En esta parte del AG se realiza una variación en la composición de los individuos, mediante los operadores de cruce y mutación. Los cuales se describen a continuación:

- ❑ **Operador de cruce:** inicialmente se define un parámetro probabilidad de cruce de individuos alta, de 0.8, a causa de la forma de codificación del genotipo y esperando esta probabilidad de cruce alta, le de mayo diversidad a la población. La codificación para este operador al igual que la función de evaluación, es de las partes relevantes en la programación de este algoritmo puesto que, como ya se había mencionado, el presente problema no es codificado como un algoritmo genético simple o un algoritmo genético de permutaciones, entonces no es

posible utilizar los tipos de cruce conocidos comúnmente (de un punto, dos puntos, CX, OX, etc.) por lo tanto, se requiere una programación diferente para este operador. En este caso se programa la creación de una máscara (Ilustración 31) (Torres Treviño, 2006), la cual representa una permutación únicamente de las órdenes de recolección asignadas. Esta máscara intercambiara los valores del genotipo en el orden de las rutas. Siguiendo el ejemplo anterior, el cruce es mostrado en las Ilustración 30 Ilustración 32.

$$I1 = \left[\begin{array}{cccccccccccccccccccc} 14 & 0 & 0 & 0 & 55 & 2 & 0 & 0 & 0 & 56 & 46 & 0 & 0 & 0 & 56 & 38 & 0 & 0 & 0 & 55 & 56 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 30. Individuo de la población seleccionada

$$Mk = \left[\begin{array}{cccc} 2 & 14 & 38 & 46 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \right]$$

Ilustración 31. Máscara generada.

$$H1 = \left[\begin{array}{cccccccccccccccccccc} 2 & 0 & 0 & 0 & 55 & 14 & 0 & 0 & 0 & 56 & 38 & 0 & 0 & 0 & 56 & 46 & 0 & 0 & 0 & 55 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 32. Hijo generado

- ❑ **Operador de mutación:** se define como el parámetro de probabilidad de mutación 0.3. Al igual que en el cruce, el tipo de mutación para el problema de investigación es muy específica, debido a las características de codificación del problema. Por lo tanto, no se puede utilizar un procedimiento de mutación común. Para esto, se programa una mutación de tipo dirigida. La cual selecciona dos posiciones aleatorias de las órdenes en cada individuo y las intercambia de lugar una con otra. Esta mutación se ejemplifica en las Ilustración 33 y Ilustración 34.

$$H1 = \left[\begin{array}{cccccccccccccccccccc} 2 & 0 & 0 & 0 & 55 & 14 & 0 & 0 & 0 & 56 & 38 & 0 & 0 & 0 & 56 & 46 & 0 & 0 & 0 & 55 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{array} \right]$$

Ilustración 33. Hijo generado mediante el cruce

Selección de posiciones aleatorias:

Posición 1 = 6 = 14

Posición 2 = 16 = 46

HM1=[$\frac{2}{1} \frac{0}{2} \frac{0}{3} \frac{0}{4} \frac{0}{5} \frac{55}{6} | \frac{46}{7} \frac{0}{8} \frac{0}{9} \frac{0}{10} \frac{56}{11} | \frac{38}{12} \frac{0}{13} \frac{0}{14} \frac{0}{15} \frac{56}{16} | \frac{14}{17} \frac{0}{18} \frac{0}{19} \frac{0}{20} \frac{55}{21} | 0]$

Ilustración 34. Hijo mutado

3.1.6. OPTIMIZACIÓN CON ALGORITMO GENÉTICO HEURÍSTICO

Se realizaron diferentes pruebas con variantes en el tamaño de las órdenes y en los parámetros utilizados. Para esto, se utilizó una computadora de uso personal con las siguientes especificaciones:

- Marca: acer ®
- Procesador: Intel (R) Celeron (R) CPU N2840 2.16GHZ
- Memoria RAM instalada: 4.00 GB
- Sistema operativo: 64 bits, procesador 64x

Se realizaron pruebas de pequeño tamaño. Dentro de cada prueba se generaron 5 experimentos con diferentes tamaños de órdenes en cada uno. Además, a cada uno de estos experimentos se le realizaron 8 específicos, modificando en cada uno el tipo de AG (AGG o AGNGE), el tipo de selección (torneo o ruleta), NTI, NTGEN (Número Total de Generaciones), PC y PM.

3.1.6.1. Pruebas con experimentos pequeños

Como se mencionó anteriormente, se generaron 5 órdenes de diferentes tamaños (de 4, 5, 7, 9 y 10 órdenes) con sus respectivos pesos. Estas órdenes representan los experimentos de tamaño pequeño, las cuales abarcan en general desde 4 hasta 10 órdenes (proveedores o zonas de recolección).

Las pruebas realizadas a cada uno de los experimentos y las modificaciones en cada uno de los parámetros antes descritos, son mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Pruebas realizadas a cada experimento.

<i>PRUEBAS</i>	<i>PARÁMETROS</i>	
	<i>AGI</i>	<i>AGII</i>
1	NTI=50 NTGEN=100 Selección=Torneo PC=0.8 PM=0.3	NTI=50 NTGEN=100 Selección=Torneo PC=0.8 PM=0.3

2	NTI=50 NTGEN=100 Selección=Ruleta PC=0.8 PM=0.3	NTI=50 NTGEN=100 Selección=Ruleta PC=0.8 PM=0.3
3	NTI=100 NTGEN=100 Selección=Torneo PC=0.8 PM=0.4	NTI=100 NTGEN=100 Selección=Torneo PC=0.8 PM=0.4
4	NTI=100 NTGEN=100 Selección=Ruleta PC=0.8 PM=0.4	NTI=100 NTGEN=100 Selección=Ruleta PC=0.8 PM=0.4
5	NTI=300 NTGEN=200 Selección=Torneo PC=0.7 PM=0.5	NTI=300 NTGEN=200 Selección=Torneo PC=0.7 PM=0.5
6	NTI=300 NTGEN=200 Selección=Ruleta PC=0.7 PM=0.5	NTI=300 NTGEN=200 Selección=Ruleta PC=0.7 PM=0.5
7	NTI=150 NTGEN=200 Selección=Torneo PC=0.7 PM=0.4	NTI=150 NTGEN=200 Selección=Torneo PC=0.7 PM=0.4
8	NTI=150 NTGEN=200 Selección=Ruleta PC=0.7 PM=0.4	NTI=150 NTGEN=200 Selección=Ruleta PC=0.7 PM=0.4

Enseguida se presentará un resumen de los resultados obtenidos en cada prueba. La codificación completa de los AG (AGI y AGII) se realizó en el software Matlab ® versión 2013, con licencia de tipo estudiantil.

3.1.6.1.1. Prueba 1 con 4 órdenes

Para los experimentos de la prueba 1 con 4 órdenes de recolección, se utilizó la siguiente información:

Órdenes = [48 8 35 16]

Pesos = [181 18280 2086 11005]

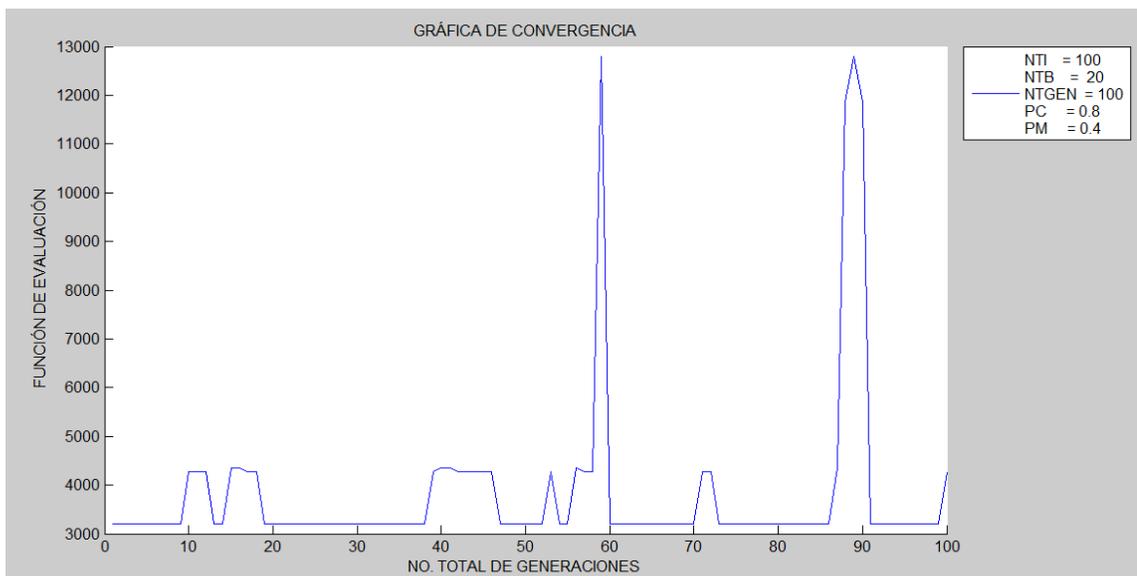


Ilustración 35. Gráfica de convergencia AGI. Orden 1.

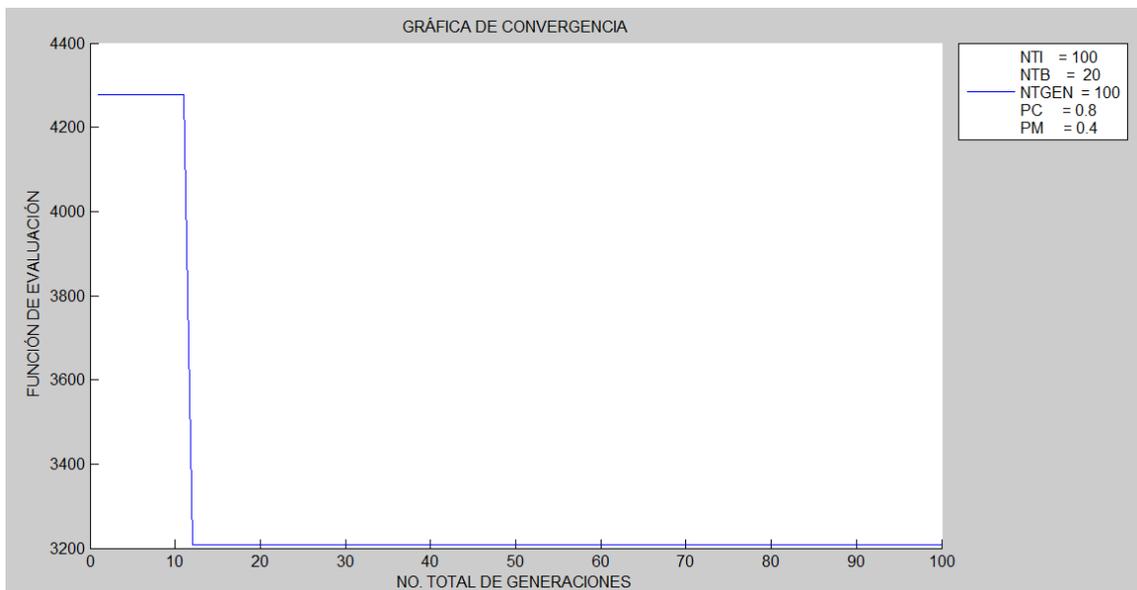


Ilustración 36. Gráfica de convergencia AGII. Orden 1.

Las gráficas mostradas en las Ilustración 35 Ilustración 36, muestran claramente la diferencia que existe en utilizar un AGG y un AGNGE, debido a que en el primero (como se aprecia en la Ilustración 35), el algoritmo presenta demasiada diversidad genética, por lo tanto los resultados no presentan un comportamiento orientado a un mínimo, porque se estanca en valores mínimos o máximos locales. A diferencia de este algoritmo, el AGII o AGNGE demuestra un comportamiento de búsqueda descendente, esto es debido al elitismo el cual garantiza que el peor individuo de una generación actual siempre será el mejor evaluado en la generación anterior, asegurando con ello, que el algoritmo no busque soluciones entre valores peores que los evaluados en generaciones anteriores. Sin embargo, como se aprecia en la imagen, para esta prueba se tiene una convergencia prematura, encontrando un óptimo desde la generación 12.

Los resultados obtenidos en casi todos los experimentos encontraron un valor mínimo global con un costo de \$3,207.2 dólares. Los mejores tiempos computacionales se registraron en con el AGNGE, con parámetros de NTI = 50 y 100, NTGEN = 100, Tipo de selección = Torneo, PC = 0.8 y PM = 0.3 y 0.4. Específicamente para esta prueba, las rutas o envíos generados fueron: 1 ED y 3 EI, de acuerdo con las características ya evaluadas.

Ruta 1 = [8 56] ED

Ruta 2 = [35 55 56] EI

Ruta 3 = [48 55 56] EI

Ruta 4 = [16 55 56] EI

3.1.6.1.2. Prueba 2 con 5 órdenes

Para la segunda prueba con 5 órdenes, se procedió de la misma manera que en la anterior, en donde se utilizó la siguiente información:

Órdenes = [52 9 52 43 23]

Pesos = [19302 19415 9784 2966 18326]

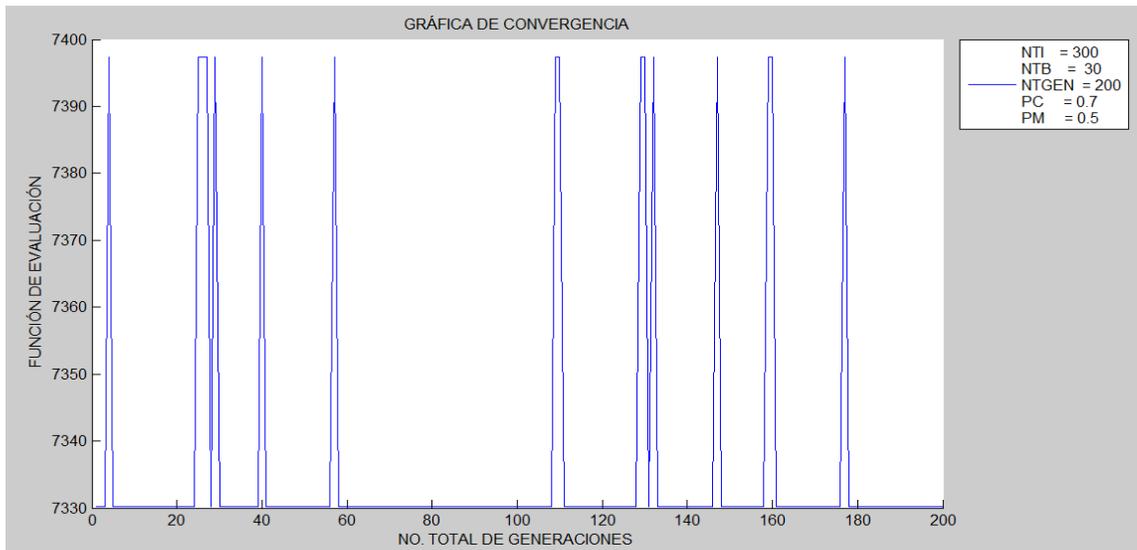


Ilustración 37. Gráfica de convergencia AGI. Orden 2.

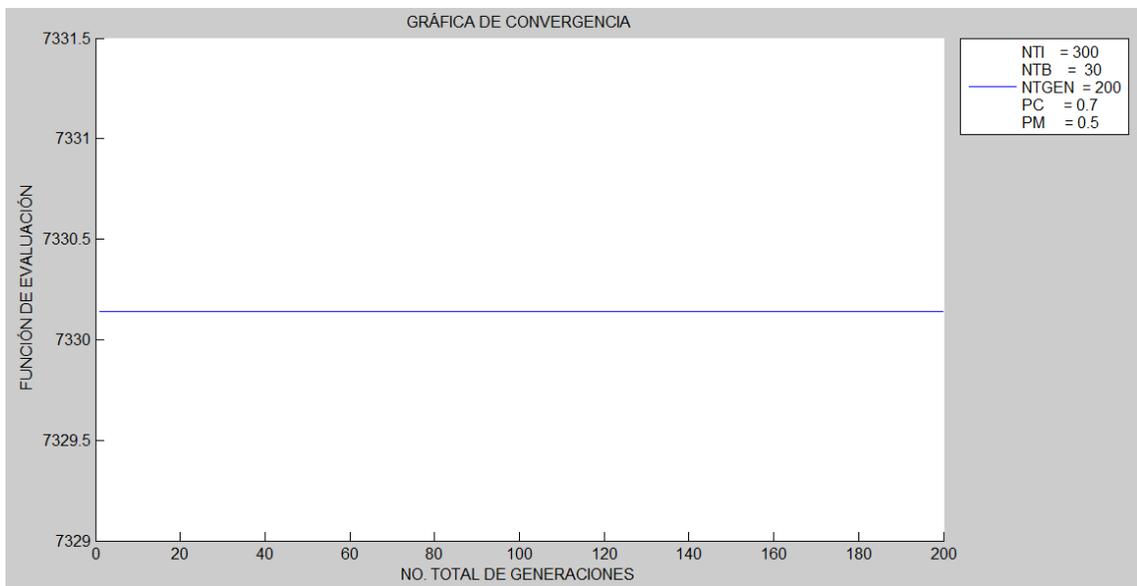


Ilustración 38. Gráfica de convergencia AGII. Orden 2.

De acuerdo con las gráficas de las pruebas de 5 órdenes con un NTI grande de 300 individuos y un NTGEN de 200, los resultados para el AGG expresan mayor variación en los resultados del algoritmo (Ilustración 37). A diferencia del AGNGE, ya que encuentra un valor sub-óptimo desde el inicio de las generaciones y se estanca en ese valor, demostrando con ello la escasa diversidad genética en el algoritmo. Una de las razones consideradas para esta situación, es que dentro de la primer generación de NTI, el algoritmo encontró ese valor sub-óptimo e inmediatamente determino que era el mejor (mínimo) para las ordenes definidas (Ilustración 38).

Para esta pruebas se encontró un valor mínimo global con un costo de \$7,330.1 dólares con el AGNGE y los menores tiempos computaciones se registraron con los parámetros NTI = 50 y 300, NTGEN = 100 y 200, Tipo de selección = Torneo, PC = 0.8 y PM = 0.3. Las rutas generadas para esta prueba fueron, 2 EI y 1 EMR.

Ruta 1 = [43 55 56] EI

Ruta 2 = [52 55 56] EI

Ruta 3 = [9 23 56] EMR

3.1.6.1.3. Prueba 3 con 7 órdenes

Para la tercera prueba con 7 órdenes se utilizó la siguiente información:

Órdenes = [16 6 38 51 24 42 11]

Pesos = [1066 16495 6444 834 7724 15934 9871]

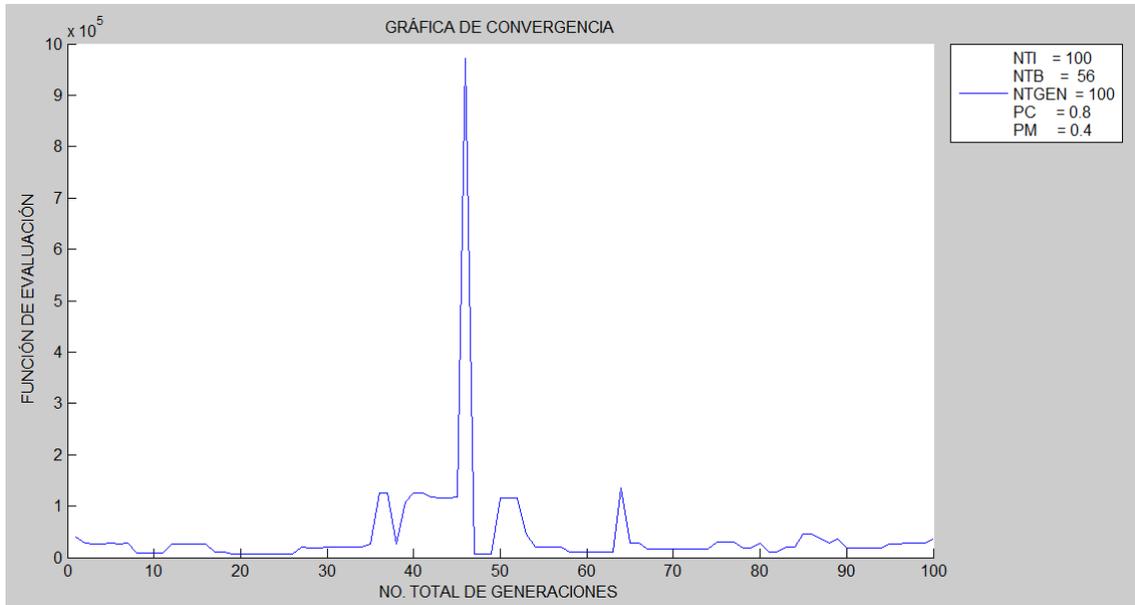


Ilustración 39. Gráfica de convergencia AGI. Orden 3.

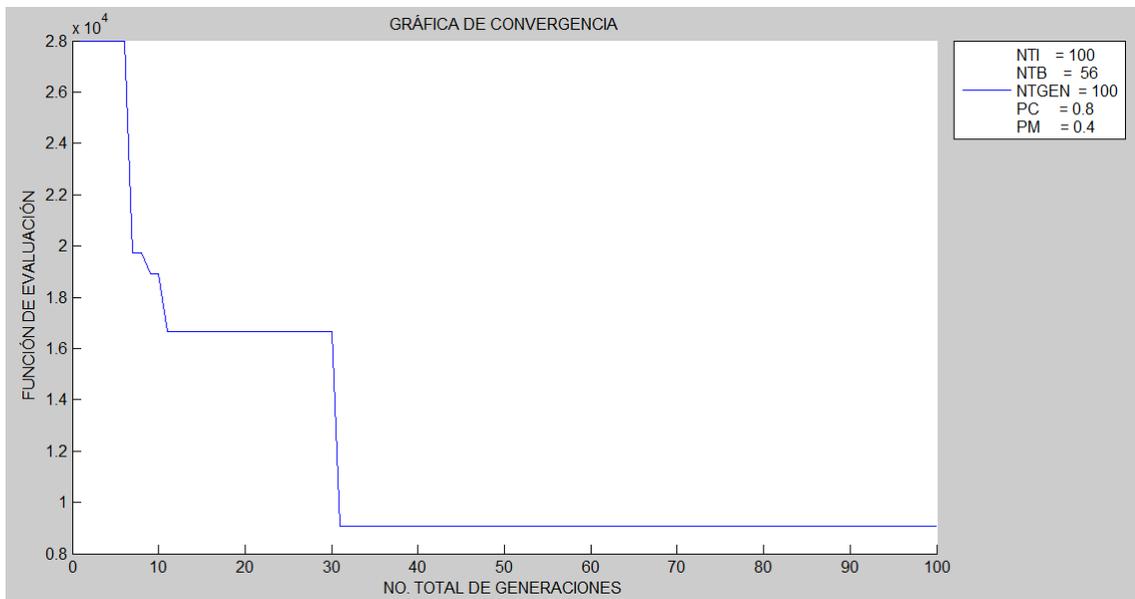


Ilustración 40. Gráfica de convergencia AGII. Orden 3.

Los resultados para el AGI (según la Ilustración 39) presentan un comportamiento más estable que las pruebas anteriores. No obstante, se visualiza un cambio repentino de aumento en el valor de evaluación a mitad de las generaciones, lo que indica que la inestabilidad continúa en cada evaluación con el paso del tiempo. A diferencia de esto, los resultados del AGII, reflejan menor variación genética dentro del algoritmo de acuerdo con la convergencia del mismo (Ilustración 40).

El valor mínimo global para estas pruebas obtuvo un costo de \$7,330.6 dólares, también con el AGNGE y con los parámetros $NTI = 100$, $NTGEN = 100$, Tipo de selección = Ruleta, $PC = 0.7$ y $PM = 0.4$. Las rutas generadas para esta prueba fueron, 4 EI y 1 EMR.

Ruta 1 = [38 55 56] EI

Ruta 2 = [51 55 56] EI

Ruta 3 = [11 55 56] EI

Ruta 4 = [16 55 56] EI

Ruta 5 = [42 24 6 56] EMR

3.1.6.1.4. Prueba 4 con 9 órdenes

La información utilizada para estas pruebas, fue la siguiente:

Órdenes = [26 39 16 36 7 52 32 41 28]

Pesos = [12979 15130 13641 3378 10042 6906 4592 5213 14026]

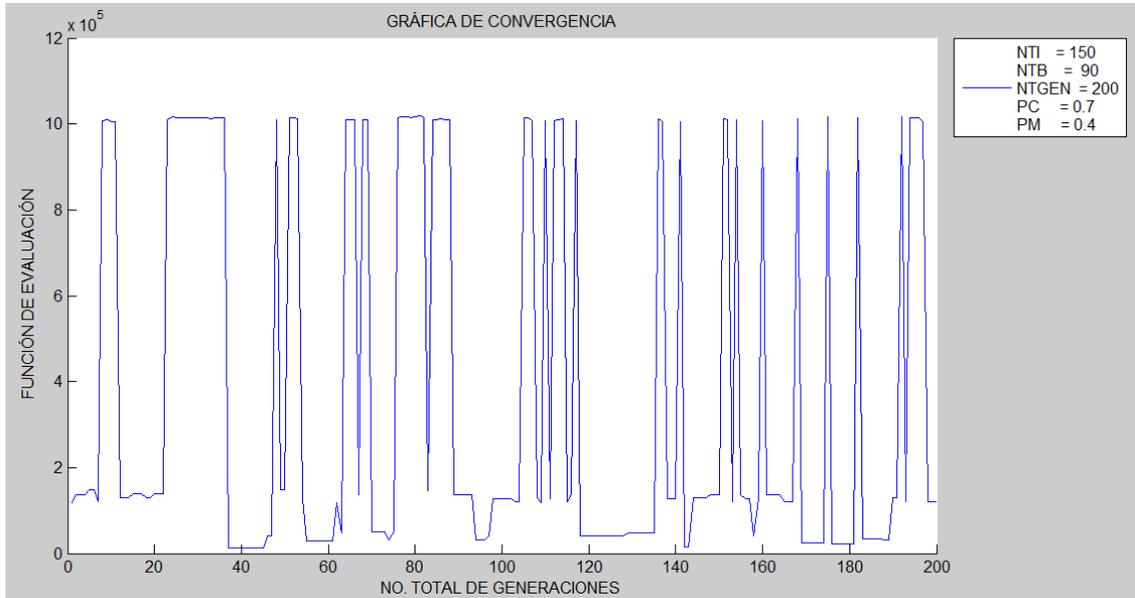


Ilustración 41. Gráfica de convergencia AGI. Orden 4

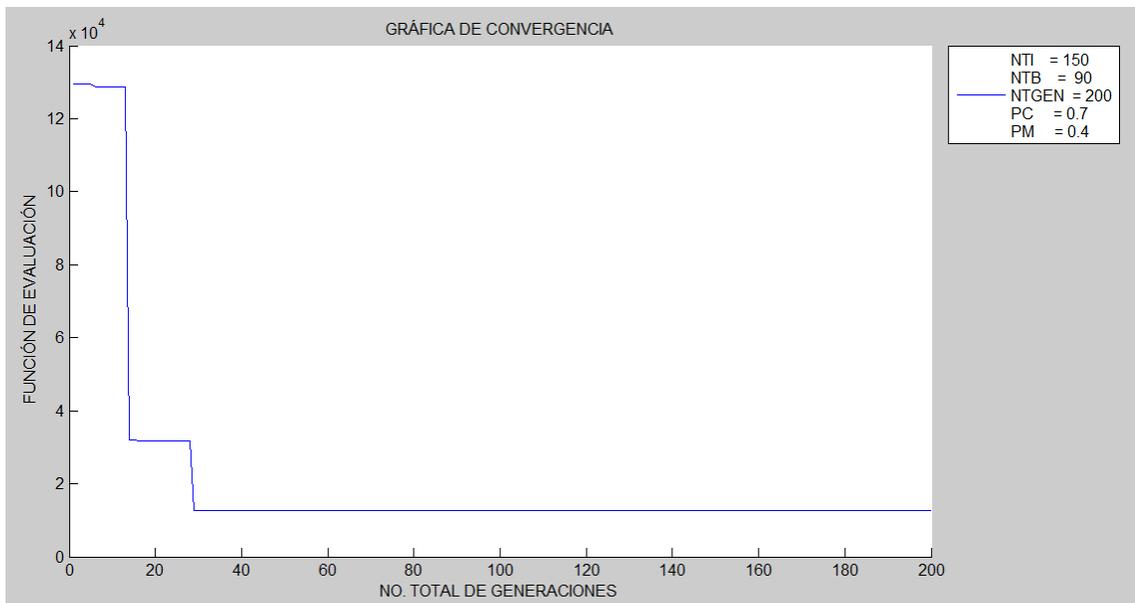


Ilustración 42. Gráfica de convergencia AGII. Orden 4

Como en las anteriores, en los resultados para el AGI la diversidad genética continua en aumento, encontrando repetidamente los mismos valores de evaluación en cada generación, debido a esto el comportamiento es ascendente y descendente simultáneamente, impidiendo la convergencia del mismo con diferentes valores mínimos locales (Ilustración 41). Por otra parte en el AGII (Ilustración 42), el algoritmo también converge prematuramente dentro de las primeras generaciones.

El costo mínimo obtenido en estas pruebas fue de \$12,277 dólares. Al igual que en las pruebas anteriores, este resultado se obtuvo con el AGNGE y los parámetros NTI = 150, NTGEN = 200, Tipo de selección = Ruleta, PC = 0.7 y PM = 0.5. Las rutas generadas para esta prueba fueron, 5 EI y 2 EMR.

Ruta 1 = [52 55 56] EI

Ruta 2 = [32 55 56] EI

Ruta 3 = [36 55 56] EI

Ruta 4 = [52 55 56] EI

Ruta 5 = [41 55 56] EI

Ruta 6 = [7 39 56] EMR

Ruta 7 = [25 28 16 56] EMR

3.1.6.1.5. Prueba 5 con 10 órdenes

La información utilizada para estas pruebas, fue la siguiente:

Órdenes = [50 41 21 5 29 51 31 2 10 17]

Pesos = [5824 1511 11421 221 15616 2729 946 6842 15916 106411]

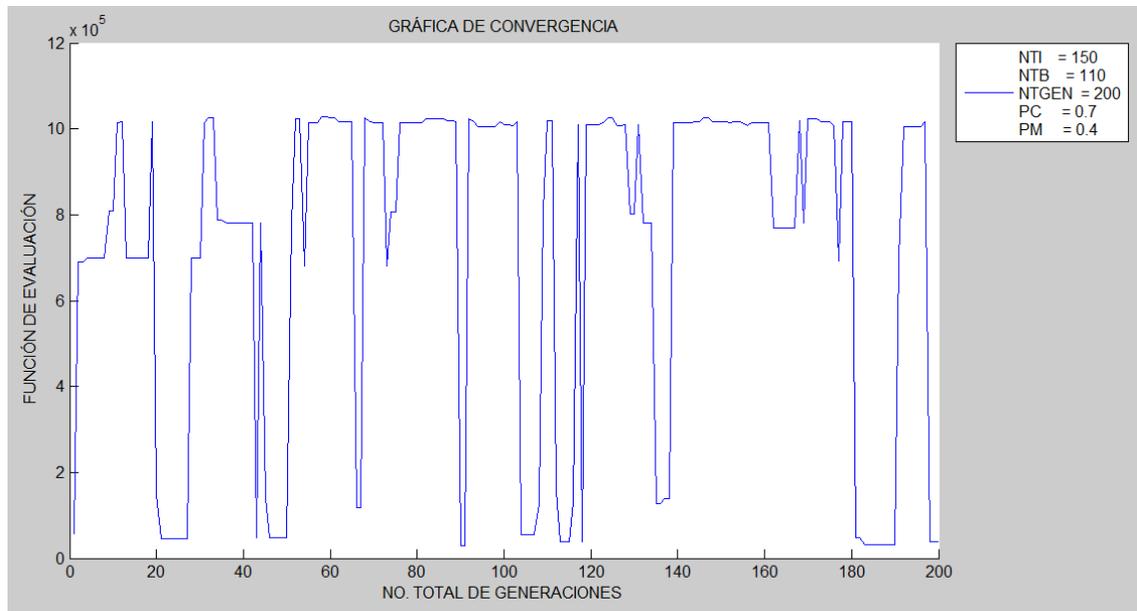


Ilustración 43. Gráfica de convergencia AGI. Prueba 5.

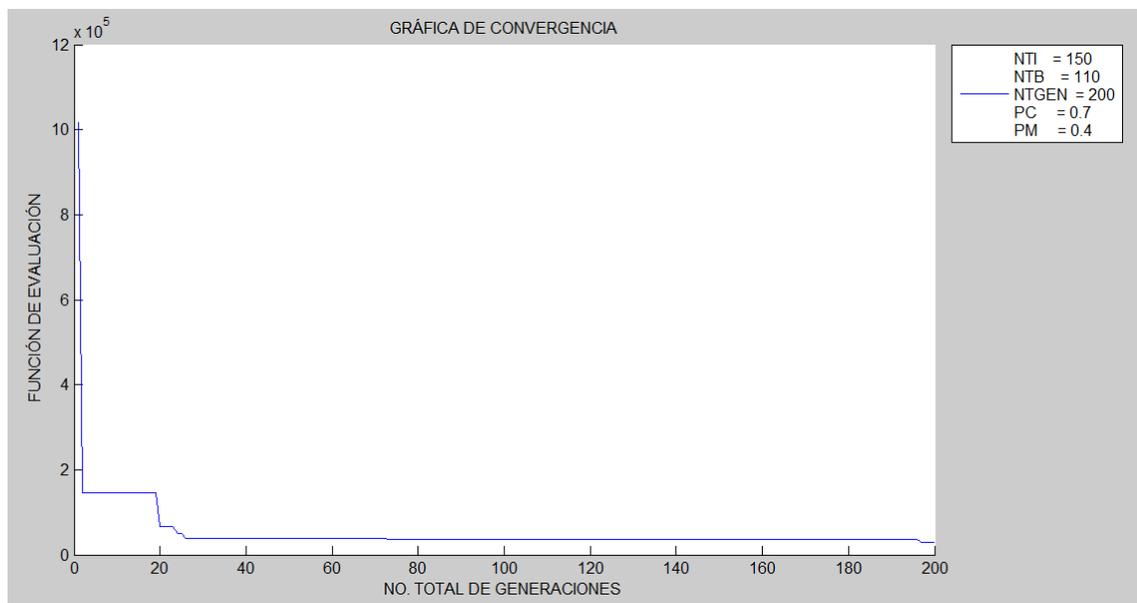


Ilustración 44. Gráfica de convergencia AGII. Prueba 5.

Los comportamientos de los AGG y AGNGE son similares a los resultados de las pruebas anteriores (9 ordenes). Puesto que el primero no converge presentando demasiada variación genética en contra parte con el segundo que presenta un comportamiento descendente, converge en las primeras generaciones y encuentra un valor mínimo local.

El costo mínimo obtenido en estas pruebas fue de \$19,995 dólares, resultado obtenido con el AGNGE y los parámetros $NTI = 150$, $NTGEN = 200$, Tipo de selección = Ruleta, $PC = 0.7$ y $PM = 0.4$. Las rutas generadas para esta prueba fueron, 2 ED, 4EI y 2 EMR.

Ruta 1 = [41 56] ED

Ruta 2 = [50 56] ED

Ruta 3 = [51 55 56] EI

Ruta 4 = [2 55 56] EI

Ruta 5 = [5 55 56] EI

Ruta 6 = [31 55 56] EI

Ruta 7 = [17 29 56] EMR

Ruta 8 = [21 10 56] EMR

Las gráficas de convergencia mostradas en párrafos anteriores para cada tamaño de experimento, solo son una muestra de las pruebas que se realizaron. El resumen general de resultados de todos los experimentos realizados es mostrado del Anexo 12Anexo 16.

CAPÍTULO IV

4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con el objetivo principal de esta investigación que es determinar rutas de recolección en embarques LTL para reducir los costos de transporte, se programan dos algoritmos genéticos. El primero de ellos es un AGG (Algoritmo Genético Generacional), el cual no conserva información de las generaciones anteriores y el AGNGE (Algoritmo Genético No Generacional Elitista) que a diferencia del anterior, conserva las mejores evaluaciones en cada generación.

Se realiza la programación completa de los algoritmos, puesto que la composición genotípica del problema es muy específica, para lo cual también se codificó de forma diferente los operadores de cruce y mutación, dado que la presente problemática no pudo ser considerada para la programación de un algoritmo genético simple o un algoritmo genético de permutaciones de acuerdo con la composición de los costos en cada estrategia, mismos que fueron abordados en el capítulo III.

En el capítulo anterior, se expresaron los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas, siendo esta una de las partes sobre salientes del presente trabajo, debido a que los resultados generados representan la programación de las rutas de recolección para las ordenes con el costo más bajo localizado por el algoritmo, el cual

depende estrictamente del número total de órdenes y del peso de las mismas. Considerando lo anterior, la generación de rutas es diferente para cada problema. Por ejemplo, si existen 5 órdenes de recolección con pesos pequeños menos de 5000 libras, el algoritmo tiende a seleccionar ya sea ED o EI, en caso contrario si esas 5 órdenes son de pesos considerables (entre 10000 y 18000 libras), el algoritmo tiende a incluir en las rutas EMR.

Con base en los resultados mostrados en el capítulo anterior para órdenes pequeñas (mismas que se componen desde 4 hasta 10 órdenes de recolección), todos los experimentos mostraron resultados favorables para el AGII, puesto que, esta programación de AG conserva las mejores evaluaciones de cada generación, permitiendo la convergencia del algoritmo hacia un óptimo global. Además, esta condición elitista asegura que el algoritmo encuentre nuevos valores dentro de una población que incluye el mejor resultado de la generación anterior, lo cual indica que una mala evaluación para el algoritmo siempre será la actual. Es por lo anterior que con este algoritmo se obtuvieron los menores costos.

De acuerdo con las gráficas de convergencia mostradas, el AGI no encuentra una solución factible para el problema, presentando demasiada diversidad en los resultados con el paso de las generaciones. Esto se observa en el movimiento ascendente y descendente de un óptimo local a otro, lo cual no refleja un comportamiento con una tendencia específica hacia un mínimo, induciendo a que el algoritmo se estanque en esos óptimos locales y no encuentre un resultado mejor que los ya evaluados.

Por otra parte, el AGII si presenta convergencia en los resultados con un comportamiento descendente. No obstante, una característica de este AG es que a causa de la codificación del genotipo, se tiene poca diversidad genética en el algoritmo con el paso de las generaciones, por lo tanto las pruebas que incrementan esta diversidad con PC y PM altos, arrojan resultados con convergencias prematuras. Con base en esto y de acuerdo con la cantidad de combinaciones de órdenes que se pueden presentar, es posible que el algoritmo encuentre un óptimo global desde la primera generación. Por lo tanto no se recomienda un NTI mayor a 200 individuos.

Con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas para los experimentos pequeños (de 4 a 10 órdenes de recolección) y debido a la forma de programación de los operadores de cruce y mutación, se recomienda utilizar un NTI de 150 y un NTGEN de 200. Lo anterior le permite al algoritmo tener mayor diversidad genética en cada generación desde el inicio del ciclo evolutivo. Esto asegura la variación en los resultados y evita una convergencia prematura del algoritmo.

De igual manera, define para estos experimentos un PC y PM con valores altos de 0.7 y 0.4 respectivamente, precisamente con el objetivo de incrementar la diversidad genética de los individuos y conseguir que el algoritmo no presente esta convergencia prematura o se estanque en óptimos locales, esperando como respuesta un comportamiento que garantice la diversidad de la población en cada generación.

Además de los parámetros establecidos, con base en los resultados de los experimentos mostrados en el capítulo anterior, se propone el uso de la selección por ruleta, puesto que el uso de esta permitió encontrar mejores resultados en tiempos menores, a comparación de la selección por torneo. Esta selección también mostro buenos resultados, pero es debido a la partición de la sección por ruleta, que esta permite mejorar el tiempo en esta etapa del algoritmo, porque cada porción de la ruleta contempla una parte de la población y un valor de evaluación para cada uno, a diferencia del torneo en donde compiten todos y cada uno de los individuos aunque estos tengan la misma evaluación y/o composición.

Para las rutas resultantes de cada prueba, cabe destacar que el establecimiento de los envíos, no depende de un tipo de estrategia en específico, sino de la cantidad de órdenes de recolección definidas. Ya que varía según la necesidad que se presenta.

Además de lo anterior, cabe destacar que en las rutas que se generaron como EMR, la mayoría de los embarques consistían en pesos de gran proporción con base en la capacidad de carga máxima del vehículo. Estos embarques se encuentran en un rango de 15,000 a 30,000 libras. En contra parte, para embarques demasiado pequeños (por ejemplo: menores a 1,000 libras), el algoritmo se inclina por la programación de EI, debido a que por costos y distancias, no es factible enviar embarques tan pequeños y contemplar todo el costo del vehículos completo.

A manera de resumen, se propone el uso de los siguientes parámetros:

- NTI = 150
- NTGEN = 200
- PC = 0.7
- PM = 0.4
- Tipo de selección = Ruleta

CAPÍTULO V

5.1. APORTACIÓN

Como aportación científica, se presenta la adaptación de un modelo científico que contempla las tres estrategias de envío consideradas en esta investigación (ED, EI, EMR), así como de sus restricciones correspondientes.

En cuanto a la aportación tecnológica, se realiza la adaptación de un Algoritmo Genético, en el cual se realiza la programación general del mismo, la codificación para este tipo de problema que tenga características de envíos similares y la codificación específica en el tipo de cruce y mutación del AG, de acuerdo con las especificaciones de problema. Esta modificación se presenta como un Algoritmo Genético Heurístico.

5.2. ALCANCES

La presente investigación tiene como alcance, la evaluación y el análisis de las redes de transporte LTL, en el cual se analiza y se pone en práctica un caso de estudio en particular. Además, se realiza la creación de la metodología para la optimización rutas de transporte en servicio LTL, como una herramienta para selección de la estrategia o estrategias óptimas para reducir los costos de transporte.

5.3. LIMITACIONES

Como limitación de destaca que para la presente investigación se excluye la consideración de ventanas de tiempo, debido a que el transporte de los embarques es una actividad subcontratada, así como el uso u operación del CC o la realización de cualquier actividad relacionada con el servicio de transporte para embarques FTL. Cabe resaltar que el presente trabajo se enfoca a problemas donde se trabaja con sistemas de transportistas, es decir que el servicio de transporte sea subcontratado.

CONCLUSIONES

Para el servicio de transporte en la industria automotriz, es indispensable contar día a día con sistemas de trabajo eficientes capaces de reducir costos. En una industria donde compiten una gran cantidad de proveedores, industrias y transportistas como lo es el sector automotriz, es primordial asegurar que cada parte del proceso productivo sea llevado a cabo en el menor tiempo posible, ya que dependen unos de otros.

El presente proyecto describe un importante problema actual al que se enfrentan muchas empresas ya sean proveedoras, productoras o transportistas, las cuales deban mover cargas (o embarques) en servicio consolidado, mismo que es presentado aquí como un servicio en transporte LTL (Less-Than-tuckload). Este servicio ofrece una gran ventaja para aquellas empresas que mueven embarques pequeños y más aún en aquellas que no cuentan con su propia flota de vehículos, es por esto que recurren a un costo menor que el pago de un camión completo en donde se debe consolidar con cargas de otros proveedores para compensar el uso del vehículo completo.

El problema presentado en esta investigación comprende la composición de diferentes tipos de costos que dependen de variables como: el peso transportado, la ubicación del proveedor (distancia de viaje), combustible utilizado, entre otros para cada estrategia en particular. Debido a esto, los problemas complejos de ruteo de vehículos con costos variables, no son temas sencillos de abordar puesto que existen variables del costo que no se pueden medir. A comparación de los problemas de ruteo con costos fijos como lo son en aquellas situaciones que involucran una flota de vehículos propia.

Los resultados obtenidos en este trabajo reflejan la importancia de concentrar el desarrollo de trabajos de investigación en la optimización de redes de transporte, particularmente para el servicio LTL, debido a la composición compleja de los costos que manejan los servicios subcontractados (transportistas), ya que este aspecto constituye gran parte de los costos logísticos en general para cualquier empresa.

La principal diferencia en comparación con trabajos encontrados en la literatura, es la forma de abordar precisamente los costos de este problema, ya que inicialmente se secciona el costo total en tres partes, el cual corresponde a un tipo de estrategia. Subsecuentemente, el costo en cada estrategia se desglosa de forma diferente, considerando la mayor cantidad de variables de acuerdo con las formas de trabajo de los transportistas. Es por lo anterior, que la presente investigación contribuye al cuerpo de conocimientos acerca del servicio de transporte en LTL y de como un AG puede ser adaptado a un problema particular, generando con esto nuevas formas de codificación de variables específicas de costos.

Esta investigación demuestra la importancia de los análisis en las redes de transporte, ya que este es un tema crítico para todas las empresas y específicamente en el desarrollo de sistemas de transporte eficientes que minimicen los costos de envío. Además, este trabajo realiza una aportación actual a los análisis de redes de transporte, definiendo la importancia de centrarse en puntos característicos de los costos puesto que, cada empresa cuenta con su forma de trabajo propia y en la mayoría de los casos no es considerado al momento de establecer tanto proveedores, como la programación de los movimientos de las cargas.

En cuanto a las pruebas realizadas, los resultados de las rutas demuestran una distribución de rutas diferente, comparado con la forma de trabajo actual. Considerando las características principales en donde el caso de estudio trabaja únicamente con rutas indirectas (o EI) y comparado con el desempeño del algoritmo, el cual incluye en las rutas los EMR. Lo anterior demuestra la efectividad del desempeño del algoritmo puesto que, el generar un EMR primordialmente en embarques con pesos entre 12,000 y 18,000 libras permite mejorar tanto la capacidad del vehículo completo, como reducir el costo del envío.

Con base en lo anterior, la funcionalidad del AGNGE para pruebas pequeñas (con tamaños desde 3 a 10 órdenes de recolección), en las rutas resultantes de este algoritmo, presenta la incorporación de EMR en la programación y/o distribución de las ordenes de recolección de los pedidos. Por lo tanto, se reduce el costo de envío en comparación con la forma de trabajo actual (solo EI).

Inicialmente se realiza un análisis de costos presentado en el capítulo 3, analizando las cargas que se mueven y los transportistas para determinar específicamente la composición del costo de envío. El problema abordado abarca tres estrategias de envío, por lo tanto se definieron tres composiciones de costos, basados en dos componentes principales: peso y distancia. Con esta información se alcanzó el objetivo específico 1: *“analizar el estado actual de la red de envíos para embarques que se realizan en servicio LTL”*

Cada empresa establece diversas estrategias de envío. Sin embargo, es importante destacar los trabajos que han realizados los diversos investigadores, con el fin de visualizar las diversas maneras en que se ha abordado el problema en cuestión. Debido a esto, y partiendo de las estrategias utilizadas, se propone el uso de EMR que según la literatura son favorables en envíos LTL. Por lo tanto, se presentan tres estrategias en el caso de estudio: Envíos Directos, Envíos Indirectos (en el caso de estudio se trabaja con estas dos estrategias) y Envíos en Milk Run, mediante las cuales se adapta un modelo científico que representa estas tres formas de trabajo. El modelo se compone de tres partes, una por cada tipo de envío y determina estrictamente la composición del costo de cada envío, ya que intervienen diferentes variables en cada uno. Además de lo anterior, las únicas restricciones consideradas para este modelo fueron las limitantes de peso máximo de los vehículos.

Lo anterior, completa el objetivo específico 2: *“construir un modelo científico que considere las diferentes estrategias de envío para embarques LTL”*.

De acuerdo con la revisión de estado del arte, se seleccionó un Algoritmo Genético como técnica de optimización. No obstante, para utilizar esta técnica se realizó la codificación completa del algoritmo y la codificación específica del genotipo, misma que no permite que el algoritmo sea usado de forma común, es decir, no se hace referencia a un algoritmo genético simple o de permutaciones. Para esto, igualmente se codificó de forma específica los operadores de cruce y mutación. Con lo anterior, se alcanza el objetivo específico 3: *“Adaptar un algoritmo genético, que contenga el modelo científico el cual considere las tres estrategias de envío”*.

Como se mencionó en el párrafo anterior, no fue posible utilizar un AG simple o un AG de permutaciones dadas las características de codificación de las estrategias de envío, por lo tanto se define esta programación como un AG Heurístico.

Se realizaron 5 pruebas con tamaños de 4 a 10 órdenes de recolección. En cada prueba, se realizaron 16 diferentes experimentos que dieron como resultado combinaciones de rutas de envío con los menores costos, de acuerdo con los datos históricos. Incluyendo en los resultados la generación de EMR que reducen los costos de envío. Con esto, se completa el objetivo específico 4: *“Diseñar rutas de transporte para embarques LTL que minimicen los costos de envío, de acuerdo con el modelo científico planteado”*.

Además de alcanzar los objetivos propuestos en la investigación, se responden también las preguntas de investigación planteadas en el capítulo 2. Las respuestas a las preguntas de investigación son las siguientes:

Pregunta de investigación 1: “¿Qué técnicas para análisis de redes de distribución en servicio LTL son utilizadas actualmente?” En el capítulo 3, se presentó un software capaz de analizar y diseñar diversas redes de distribución. Sin embargo, dicha herramienta se limita a ciertas características, a diferencia de los problemas actuales que engloban una gran cantidad de variables como se aprecia principalmente en la definición de costos.

Pregunta de investigación 2: ¿Cómo se podrán modelar las tres estrategias de envío en un solo modelo de científico? Se analiza específicamente la estructura de costos de cada una de las estrategias presentadas (ED, EI, y EMR). Por lo tanto, se modela en base a la forma de trabajo de cada una por separado y no como un solo modelo en conjunto para todas ellas.

Pregunta de investigación 3: ¿Con base en que criterios serán construidas las rutas de transporte que minimicen los costos de envío y como se determinara que son adecuadas? Con base en las ordenes de recolección definidas en cada programación, de acuerdo con el la cantidad de órdenes y el peso transportado.

Pregunta de investigación 4: ¿De qué forma será adaptado el algoritmo genético a este problema? El algoritmo es adaptado de acuerdo a la codificación específica del genotipo y de los operadores de cruce y mutación, que depende de la cantidad de órdenes.

TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se propone ampliar la experimentación, en el cual se espera llevar a cabo pruebas medianas y grandes que contemplen más de 10 órdenes, modificando los parámetros, ampliando el NTI, NTGEN y probando con ambos tipos de selecciones. De esta forma se podrá verificar la eficiencia del algoritmo en situaciones que contemplen una gran cantidad de proveedores/orígenes, ya que por el momento, la eficiencia del algoritmo AGII se limita únicamente a trabajar cuando son órdenes pequeñas.

Considerando lo anterior, también se propone la adaptación de los procedimientos de cruce comunes a la codificación particular del problema (revisión de cruces para permutaciones con repetición).

De igual forma, se sugiere la utilización de otras técnicas de SC para comparar los resultados del AGII. Revisando las técnicas más utilizadas por los autores según del estado del arte (ver Capítulo II), como la optimización por colonia de hormigas ya que son las más recomendadas para temas de transporte en servicio LTL. Sin embargo, al igual que en el AGII la codificación con alguna otra técnica, también será muy específica de acuerdo a las características del problema planteado en LTL.

Por último, se plantea la programación de una interfaz gráfica, la cual sea fácil de usar, en donde solo se ingrese la información necesaria para la ejecución del algoritmo (número de órdenes, pesos y transportistas), para finalmente llevar los resultados a campo e implementar el AGII a datos reales en tiempo real.

ANEXOS

Proveedor	Ciudad	Estado	C.P.	Cantidad total de envíos	Peso total	Volumen total	Transportista	Costo total
FREUDENBERG NOK MILAN	MILAN	OH	44846	1	100	26.67	HMES	\$ 57.75
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	770	22.5	HMES	\$ 62.97
HURON CASTINGS INCORPORATED PIGEON	PIGEON	MI	48755	7	15302	448	HMES	\$ 352.31
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	6	9000	160	CNWFY	\$ 161.16
RBC OKLAHOMA	OKLAHOMA CITY	OK	73128	3	4530	90	CNWFY	\$ 436.73
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	4	4228	162.96	HMES	\$ 184.71
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	3	4500	80	CNWFY	\$ 110.40
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	3	5700	67.5	HMES	\$ 210.57
WINSTAR INDUSTRY, INC	TROY	MI	48083	5	8640	175	HMES	\$ 319.18
MCMASTERS KOSS COMPANY ROYAL OAK	ROYAL OAK	MI	48073	1	1100	48.89	HMES	\$ 66.97
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	6	9000	160	CNWFY	\$ 161.16
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	2	3000	81.48	HMES	\$ 154.49
FEDERAL MOGUL GLASGOW	GLASGOW	KY	42141	1	1866	33.33	CNWFY	\$ 73.39
RBC OKLAHOMA	OKLAHOMA CITY	OK	73128	3	4449	90	CNWFY	\$ 436.72
GENERAL FASTENERS COMPANY CHARLOTTE	CHARLOTTE	NC	28273	6	7296	190.53	CNWFY	\$ 554.93
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	680	44.44	HMES	\$ 59.50
GENERAL FASTENERS COMPANY HEBRON	HEBRON	OH	43025	10	10340	225	HMES	\$ 286.05
PENTAFLEX INC SPRINGFIELD	SPRINGFIELD	OH	45501	12	15468	416.5	HMES	\$ 266.00
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	4	6000	106.67	CNWFY	\$ 132.48
FREUDENBERG NOK BRISTOL	BRISTOL	NH	3222	4	6920	120.33	CNWFY	\$ 752.59
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	1	1432	40.74	HMES	\$ 90.18
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	2	3680	45	CNWFY	\$ 435.30
PENTAFLEX INC SPRINGFIELD	SPRINGFIELD	OH	45501	6	7920	208.25	HMES	\$ 234.51
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	3	4500	80	CNWFY	\$ 110.40
FREUDENBERG NOK BRISTOL	BRISTOL	NH	3222	6	2662.98	180.5	CNWFY	\$ 364.83
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	3	4725	67.5	HMES	\$ 184.71
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	1	1432	40.74	HMES	\$ 90.18
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	2	2780	45	HMES	\$ 143.16
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	2	2000	81.48	HMES	\$ 102.99
NORCA ENGINEERING	BENSENVILLE	IL	60106	6	13116	384	HMES	\$ 298.83
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	1840	22.5	HMES	\$ 102.99
GENERAL FASTENERS COMPANY CHARLOTTE	CHARLOTTE	NC	28273	2	2632	63.51	CNWFY	\$ 258.61
GENERAL FASTENERS COMPANY HEBRON	HEBRON	OH	43025	1	448	19.5	HMES	\$ 57.75
MERITOR FRANKFORT	FRANKFORT	KY	40601	1	350	28	CNWFY	\$ 60.00
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	4	7320	90	HMES	\$ 270.42
ALLIED CHUCKER JACKSON	JACKSON	MI	49202	1	1734	41.11	HMES	\$ 96.02
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	2	1500	81.48	HMES	\$ 94.46
FREUDENBERG NOK BRISTOL	BRISTOL	NH	3222	4	1925	157.1	CNWFY	\$ 274.10
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	6	9000	160	CNWFY	\$ 161.16
HURON CASTINGS INCORPORATED PIGEON	PIGEON	MI	48755	2	3932	128	HMES	\$ 196.33
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	1840	22.5	HMES	\$ 102.99
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	4	6000	106.67	CNWFY	\$ 132.48
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	2	4410	45	HMES	\$ 184.71
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	2950	22.5	HMES	\$ 151.91
WINSTAR INDUSTRY, INC	TROY	MI	48083	5	7298	175	HMES	\$ 269.57
R M KERNER CO ERIE	ERIE	PA	16510	1	725	17.78	HMES	\$ 62.60
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	2	3000	81.48	HMES	\$ 154.49
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	3	7320	67.5	HMES	\$ 270.42
GENERAL FASTENERS COMPANY HEBRON	HEBRON	OH	43025	5	4950	97.5	HMES	\$ 159.45
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	1	1500	26.67	HMES	\$ 63.83
GENERAL FASTENERS COMPANY CHARLOTTE	CHARLOTTE	NC	28273	3	3817.8	67.5	CNWFY	\$ 375.04
NORCA ENGINEERING	BENSENVILLE	IL	60106	8	17968	512	HMES	\$ 298.83
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	2	2780	45	HMES	\$ 143.16
FREUDENBERG NOK BRISTOL	BRISTOL	NH	3222	3	1329	68.52	CNWFY	\$ 205.25
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	2	3000	53.33	CNWFY	\$ 94.42
ALLIED CHUCKER JACKSON	JACKSON	MI	49202	2	2434	82.22	HMES	\$ 116.86
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	2	3000	81.48	HMES	\$ 154.49
R M KERNER CO ERIE	ERIE	PA	16510	1	1545	17.78	HMES	\$ 98.75
HURON CASTINGS INCORPORATED PIGEON	PIGEON	MI	48755	1	1037	64	HMES	\$ 69.50
RBC OKLAHOMA	OKLAHOMA CITY	OK	73128	1	1084	15	CNWFY	\$ 141.74
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	3	8490	67.5	CNWFY	\$ 747.10
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	2740	22.5	HMES	\$ 141.10
ALLIED CHUCKER JACKSON	JACKSON	MI	49202	2	2434	82.22	HMES	\$ 116.86
RANSHEL INCORPORATED STERLING HEIGHTS	STERLING HEIGHTS	MI	48310	1	1432	40.74	HMES	\$ 90.18
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	1	1752	26.67	HMES	\$ 63.83
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	2	3680	45	HMES	\$ 184.71
R M KERNER CO ERIE	ERIE	PA	16510	1	729	17.78	HMES	\$ 62.95
MCMASTERS KOSS COMPANY ROYAL OAK	ROYAL OAK	MI	48073	1	345	49.3	HMES	\$ 59.50
PARIS MACHINING, LLC	PARIS	KY	40361	9	13500	240	CNWFY	\$ 168.17
WINSTAR INDUSTRY, INC	TROY	MI	48083	10	16140	350	HMES	\$ 331.90
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	1850	22.5	HMES	\$ 102.99
GENERAL FASTENERS COMPANY HEBRON	HEBRON	OH	43025	7	7308	157.5	HMES	\$ 233.05
FEDERAL MOGUL GLASGOW	GLASGOW	KY	42141	1	1283	26.67	HMES	\$ 64.13
GENERAL FASTENERS COMPANY CHARLOTTE	CHARLOTTE	NC	28273	2	2666	50.14	CNWFY	\$ 261.95
GKN SINTERED METALS	EMPORIUM	PA	15834	2	2200	55.56	CNWFY	\$ 171.47
NORCA ENGINEERING	BENSENVILLE	IL	60106	7	15736	448	HMES	\$ 298.83
WARREN INDUSTRIES INC CLINTON TOWNSHIP	CLINTON TOWNSHIP	MI	48035	1	2600	22.5	HMES	\$ 133.89
NEW BOSTON FORGE	NEW BOSTON	MI	48164	4	11000	117	HMES	\$ 320.59
MERITOR MANNING BRAKE ERS MANNING	MANNING	SC	29102	6	6600	213.34	CNWFY	\$ 501.99
FREUDENBERG NOK BRISTOL	BRISTOL	NH	3222	4	1257	93.54	CNWFY	\$ 194.13
FREUDENBERG NOK MILAN	MILAN	OH	44846	1	75	22.22	HMES	\$ 57.75

Anexo 1. Reporte de envíos enero 2016. Fuente: QSL

Anexo 2. Tabla de órdenes de embarques 7 de Abril 2016

Nombre del proveedor	Ubicación	Peso total (lb)	Volumen total	Costo total	Distancia al CC (Km)	Costo/km	Costo promedio /km
General Fasteners Company	Hebrón, OH	3,888	90	165.74	392.68	0.42	0.78
Federal Mogul	Glasgow, KY	11,170	166.66	207.17	168.98	1.23	1.91
Rockford Toolcraft Inc	Rockford, IL	2,250	53.78	114.76	656.61	0.17	0.19
Freudenberg Nok	Milán, OH	66	14.44	57.75	519.82	0.11	0.23
RM Kerner Co	Erie, PA	725	17.78	65.08	732.25	0.09	0.15
Citationmenomonee Falls	Meno.Falls, WI	1,265	16.92	75.39	767.66	0.10	0.53
Freudenberg Nok	Bristol, NH	745	46	132.63	1,710.73	0.08	0.49
Centro de Consolidación	Jeffersonville, IN						
Centro de Distribución	Laredo, TX						

Anexo 3. Tabla de horas de recolección de embarques por proveedor

Nombre del proveedor	Ubicación	Hora de recolección
General Fasteners Company	Hebron, OH	22/08/2016 10:13
Federal Mogul	Glasgow, KY	22/08/2016 10:30
Rockford Toolcraft Inc	Rockford, IL	22/08/2016 12:00
Freudenberg Nok	Milan, OH	22/08/2016 14:00
RM Kerner Co	Erie, PA	22/08/2016 14:30
Citationmenomonee Falls	Meno.Falls, WI	22/08/2016 15:00
Freudenberg Nok	Bristol, NH	22/08/2016 16:05

Anexo 4. Tabla de comparación de resultados

<i>Análisis</i>	<i>Costo total (dl)</i>	<i>Distancia (km)</i>
QUIMMCO	\$818.52	4,948.70
Log VRP	\$1,978.00	4,575

Anexo 5. Tabla de horas de recolección de embarques por proveedor

<i>Nombre del proveedor</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Hora de recolección</i>
<i>General Fasteners Company</i>	Hebron, OH	22/08/2016 08:00
<i>Federal Mogul</i>	Glasgow, KY	22/08/2016 08:00
<i>Rockford Toolcraft Inc</i>	Rockford, IL	22/08/2016 08:00
<i>Freudenberg Nok</i>	Milan, OH	22/08/2016 08:00
<i>RM Kerner Co</i>	Erie, PA	22/08/2016 08:00
<i>Citationmenomonee Falls</i>	Meno.Falls, WI	22/08/2016 08:00
<i>Freudenberg Nok</i>	Bristol, NH	22/08/2016 08:00

Anexo 6. Comparación de resultados

<i>Análisis</i>	<i>Costo total (dl)</i>	<i>Distancia (km)</i>
QUIMMCO	\$818.52	4,948.70
Log VRP	\$1687.00	4,115

	<i>Proveedores</i>	<i>A Laredo Distancia (millas)</i>
1	ALLIANCE INDUSTRIES	1565
2	ALLIED CHUCKER	1525
3	AZ CHARLESTON (SERTEC)	1426
4	BACHMAN TOOL DIEINDEPENDENCE	1310
5	C THORREZ INDUSTRIES INC JACKSON	1560
6	CAXTON MARK	2943
7	CITATION (GREDE)	1435
8	COMMERCIAL FORGED PRODUCTS	1343
9	DOTSON	1377
10	EXCEL	2997
11	FEDERAL MOGUL (EL PASO)	587
12	FEDERAL MOGUL (GLASGOW)	1780
13	FREUDENBURG (BRISTOL)	2242
14	FREUDENBURG (MILAN)	1573
15	GANTON	1614
16	GENERAL FASTENERS (CHARLOTTE)	1384
17	GENERAL FASTENERS (HEBRON)	1494
18	GKN SINTER (EMPORIUM)	1779
19	GKN SINTER (KERSEY)	1755
20	GUNITE	1374
21	HALDEX (GRAIN VALLEY)	931
22	HALDEX (LAREDO)	1.5
23	HURON CASTING	1670
24	INFORM SYSTEMS DATA	1333
25	INNOVATIVE TOOL DESIGN	1621
26	KRT PRECISION TOOL MANUFACTURING	1576
27	MASTER AUTOMATIC	1585
28	MCMASTER	1627
29	MERITOR FLORENCE	1348
30	MERITOR FRANKFORT	1297
31	MERITOR MAXTON	1483
32	MERITOR MORRISTOWN	1319
33	MERITOR WABCO	1629
34	NEENAH FOUNDRY	1532
35	NEW BOSTON FORGE	1626
36	NORCA (BENSENVILLE)	1384
37	NORCA (BOLINGBROOK)	1387
38	NTN	1259
39	PACIFIC STEEL	1777
40	PARIS MACHINE	1316
41	PENTAFLEX	1460
42	PHOENIX COATERS (NENNAH)	1479
43	POLLAK	2197
44	RANSHIEL	1695
45	RBC	620
46	RM KERNER (URICK)	1705
47	ROCKFORD TOOLCRAFT	1371
48	SURE SOLUTIONS	1600
49	TRAYER	1907
50	TRW	1537
51	TSE BRAKES	2154
52	WARREN	391
53	WINEGAR	1303
54	WINSTAR INDUSTRY, INC (HYOLIM)	1654

Anexo 7. Matriz proveedor-CD. Fuente: elaboración propia.

Proveedor	Minimum Ch	0-499	500-999	1000-1999	2000-4999	5000-9999	10000-19999
1	\$ 75.00	\$ 18.56	\$ 15.72	\$ 13.97	\$ 13.24	\$ 10.06	\$ 8.98
2	\$ 75.00	\$ 15.74	\$ 13.93	\$ 12.75	\$ 11.42	\$ 8.63	\$ 7.22
3	\$ 75.00	\$ 15.29	\$ 14.06	\$ 11.31	\$ 9.63	\$ 7.48	\$ 6.35
3	\$ 75.00	\$ 15.29	\$ 14.06	\$ 11.31	\$ 9.63	\$ 7.48	\$ 6.35
4	\$ 75.00	\$ 19.15	\$ 16.27	\$ 14.41	\$ 13.79	\$ 10.42	\$ 9.31
5	\$ 75.00	\$ 15.74	\$ 13.93	\$ 12.75	\$ 11.42	\$ 8.63	\$ 7.22
7	\$ 75.00	\$ 18.76	\$ 15.95	\$ 14.18	\$ 13.50	\$ 10.25	\$ 9.15
8	\$ 75.00	\$ 14.81	\$ 13.10	\$ 11.98	\$ 10.69	\$ 8.12	\$ 6.78
9	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
10	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
11	\$ 65.00	\$ 11.54	\$ 10.21	\$ 8.11	\$ 7.42	\$ 5.51	\$ 4.37
12	\$ 75.00	\$ 13.33	\$ 12.26	\$ 9.87	\$ 8.40	\$ 6.53	\$ 5.54
13	\$ 85.00	\$ 23.83	\$ 20.25	\$ 16.91	\$ 15.01	\$ 11.91	\$ 10.67
14	\$ 75.00	\$ 15.74	\$ 13.93	\$ 12.75	\$ 11.42	\$ 8.63	\$ 7.22
15	\$ 75.00	\$ 15.29	\$ 14.06	\$ 11.31	\$ 9.63	\$ 7.48	\$ 6.35
16	\$ 75.00	\$ 15.29	\$ 14.06	\$ 11.31	\$ 9.63	\$ 7.48	\$ 6.35
17	\$ 75.00	\$ 15.74	\$ 13.93	\$ 12.75	\$ 11.42	\$ 8.63	\$ 7.22
18	\$ 85.00	\$ 19.14	\$ 16.27	\$ 13.59	\$ 12.06	\$ 9.57	\$ 8.57
19	\$ 85.00	\$ 19.14	\$ 16.27	\$ 13.59	\$ 12.06	\$ 9.57	\$ 8.57
20	\$ 75.00	\$ 14.81	\$ 13.10	\$ 11.98	\$ 10.69	\$ 8.12	\$ 6.78
21	\$ 75.00	\$ 12.45	\$ 11.03	\$ 10.08	\$ 8.86	\$ 6.75	\$ 5.64
22	\$ 65.00	\$ 10.93	\$ 5.41	\$ 2.82	\$ 2.59	\$ 1.94	\$ 1.54
23	\$ 75.00	\$ 16.70	\$ 14.78	\$ 13.51	\$ 12.11	\$ 9.19	\$ 7.66
24	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
25	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
26	\$ 75.00	\$ 15.74	\$ 13.93	\$ 12.75	\$ 11.42	\$ 8.63	\$ 7.22
27	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
28	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
29	\$ 75.00	\$ 16.44	\$ 14.54	\$ 13.30	\$ 11.88	\$ 9.03	\$ 7.53
30	\$ 75.00	\$ 14.73	\$ 13.55	\$ 10.90	\$ 9.28	\$ 7.21	\$ 6.12
31	\$ 75.00	\$ 15.97	\$ 14.69	\$ 11.82	\$ 10.06	\$ 7.82	\$ 6.63
32	\$ 75.00	\$ 14.73	\$ 13.55	\$ 10.90	\$ 9.28	\$ 7.21	\$ 6.12
33	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
34	\$ 75.00	\$ 18.56	\$ 15.72	\$ 13.97	\$ 13.24	\$ 10.06	\$ 8.98
35	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
36	\$ 75.00	\$ 14.81	\$ 13.10	\$ 11.98	\$ 10.69	\$ 8.12	\$ 6.78
37	\$ 75.00	\$ 14.81	\$ 13.10	\$ 11.98	\$ 10.69	\$ 8.12	\$ 6.78
38	\$ 75.00	\$ 13.82	\$ 12.23	\$ 11.17	\$ 9.92	\$ 7.55	\$ 6.29
39	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
40	\$ 75.00	\$ 15.08	\$ 13.87	\$ 11.16	\$ 9.50	\$ 7.38	\$ 6.26
41	\$ 75.00	\$ 15.06	\$ 13.35	\$ 12.17	\$ 10.89	\$ 8.27	\$ 6.87
42	\$ 75.00	\$ 17.87	\$ 15.17	\$ 13.41	\$ 12.78	\$ 9.65	\$ 8.62
43	\$ 85.00	\$ 23.83	\$ 20.25	\$ 16.91	\$ 15.01	\$ 11.91	\$ 10.67
44	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
45	\$ 85.00	\$ 11.43	\$ 10.15	\$ 8.12	\$ 7.40	\$ 5.48	\$ 4.37
46	\$ 85.00	\$ 17.53	\$ 15.54	\$ 14.18	\$ 12.78	\$ 9.69	\$ 8.07
47	\$ 75.00	\$ 14.81	\$ 13.10	\$ 11.98	\$ 10.69	\$ 8.12	\$ 6.78
48	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
49	\$ 85.00	\$ 20.48	\$ 17.41	\$ 14.54	\$ 12.91	\$ 10.24	\$ 9.18
50	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
51	\$ 85.00	\$ 19.51	\$ 15.38	\$ 13.10	\$ 11.02	\$ 9.58	\$ 7.85
52	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40
53	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
54	\$ 75.00	\$ 16.12	\$ 14.26	\$ 13.05	\$ 11.67	\$ 8.86	\$ 7.40

Anexo 8. Matriz de costos proveedor Centro de Distribución

	<i>Proveedores</i>	<i>Al CC Distancia (millas)</i>
1	ALLIANCE INDUSTRIES	584
2	ALLIED CHUCKER	348
3	AZ CHARLESTON (SERTEC)	612
4	BACHMAN TOOL DIEINDEPENDENCE	537
5	C THORREZ INDUSTRIES INC JACKSON	335
6	CAXTON MARK	947
7	CITATION (GREDE)	477
8	COMMERCIAL FORGED PRODUCTS	344
9	DOTSON	750
10	EXCEL	949
11	FEDERAL MOGUL (EL PASO)	1468
12	FEDERAL MOGUL (GLASGOW)	105
13	FREUDENBURG (BRISTOL)	1063
14	FREUDENBURG (MILAN)	323
15	GANTON	394
16	GENERAL FASTENERS (CHARLOTTE)	484
17	GENERAL FASTENERS (HEBRON)	244
18	GKN SINTER (EMPORIUM)	530
19	GKN SINTER (KERSEY)	506
20	GUNITE	412
21	HALDEX (GRAIN VALLEY)	491
22	HALDEX (LAREDO)	1271
23	HURON CASTING	492
24	INFORM SYSTEMS DATA	374
25	INNOVATIVE TOOL DESIGN	378
26	KRT PRECISION TOOL MANUFACTURING	338
27	MASTER AUTOMATIC	371
28	MCMASTER	386
29	MERITOR FLORENCE	97.4
30	MERITOR FRANKFORT	66.3
31	MERITOR MAXTON	654
32	MERITOR MORRISTOWN	262
33	MERITOR WABCO	388
34	NEENAH FOUNDRY	569
35	NEW BOSTON FORGE	373
36	NORCA (BENSENVILLE)	337
37	NORCA (BOLINGBROOK)	337
38	NTN	370
39	PACIFIC STEEL	2370
40	PARIS MACHINE	97.7
41	PENTAFLEX	193
42	PHOENIX COATERS (NENNAH)	516
43	POLLAK	1009
44	RANSHEL	414
45	RBC	823
46	RM KERNER (URICK)	455
47	ROCKFORD TOOLCRAFT	408
48	SURE SOLUTIONS	404
49	TRAYER	657
50	TRW	374
51	TSE BRAKES	3089
52	WARREN	1632
53	WINEGAR	714
54	WINSTAR INDUSTRY, INC (HYOLIM)	387

Anexo 9. Matriz proveedor-CC. Fuente: elaboración propia.

Anexo 11. Código para la Función de evaluación

```

function [ FE ] = EvaluationQUIMMCO2( P, NTI, Ordenes, Destinos,
DestinoFinal, Pesos, NTO, NTD, NTB Veh, NTB, Ind, NTBI, RPinicial,
RPinicial, RP, EDirectos, lineaD, columnaD, CTW, FSC, EIndirectos,
lineaIn, columnaIn, FCC, EMilkRun, K, IN, KY, NC, CIN, CKY, CNC, PSt,
FSCMR, lineaMMR, columnaMMR)

%% Este ciclo particiona el individuo, y define donde comienza cada
orden
for i=1:NTO
    if i==1
        InicioR(:,i)=1;
    else
        InicioR(:,i)=((i-1)*(NTBVeh))+1;
    end
end
Fin2=(InicioR+NTBVeh)-1;

%% ESTE CICLO EVALUA CADA RUTA DEPENDIENDO DE LA PARTICION DEL
INDIVIDUO
for h=1:NTI
    CostoR=0;
    for j=1:NTO
        CostoRuta=0;
        cont=0;
        temp=0;
        for k=InicioR(:,j):Fin2(:,j)
            if P(h,k)>0
                cont=cont+1;
                temp(:,cont)=P(h,k); %%comabiar el uno por h
            end
        end
        if cont==0
            CostoRuta=0;
        else
            if cont==2
%% ESTA PARTE EVALUA LOS EVÍOS DIRECTOS
                if P(h,Fin2(:,j))==Destinos(:,2) %%(cambiar 1 por h)
                    for t=1:NTO
                        x=temp(:,1);
                        if x==Ordenes(:,t)
                            PDir=Pesos(:,t);
                            if PDir>15000
                                if PDir>0 && PDir<500

                                    Costo=EDirectos(x,2);
                                    CostoD=((Costo/CTW)*PDir)+(((Costo/
                                    CTW)*PDir)*FSC);
                                    if CostoD<=EDirectos(x,1)

                                        CostoRuta=(EDirectos(x,1))+ (EDirect
                                        os(x,1)*FSC);
                                    else
                                        CostoRuta=CostoD;
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end
if PDir>=500 && PDir<1000
    Costo=EDirectos(x,3);

    CostoD=((Costo/CTW)*PDir)+(((Costo/
    CTW)*PDir)*FSC);
    if CostoD<=EDirectos(x,1)

    CostoRuta=(EDirectos(x,1))+(EDirect
    os(x,1)*FSC);
    else
        CostoRuta=CostoD;
    end
end
end
if PDir>=1000 && PDir<1999
    Costo=EDirectos(x,4);

    CostoD=((Costo/CTW)*PDir)+(((Costo/
    CTW)*PDir)*FSC);
    if CostoD<=EDirectos(x,1)

        CostoRuta=(EDirectos(x,1))+(E
        Directos(x,1)*FSC);
    else
        CostoRuta=CostoD;
    end
end
end
if PDir>=2000 && PDir<4999
    Costo=EDirectos(x,5);

    CostoD=((Costo/CTW)*PDir)+(((
    Costo/CTW)*PDir)*FSC);
    if CostoD<=EDirectos(x,1)

        CostoRuta=(EDirectos(x,1))+(E
        Directos(x,1)*FSC);
    else
        CostoRuta=CostoD;
    end
end
end
if PDir>=5000 && PDir<9999
    Costo=EDirectos(x,6);

    CostoD=((Costo/CTW)*PDir)+(((Costo/
    CTW)*PDir)*FSC);
    if CostoD<=EDirectos(x,1)

        CostoRuta=(EDirectos(x,1))+(E
        Directos(x,1)*FSC);
    else
        CostoRuta=CostoD;
    end
end
end
if PDir>10000 && PDir<19999
    Costo=EDirectos(x,7);

```

```

CostoD= ((Costo/CTW)*PDir)+(((Costo/
CTW)*PDir)*FSC);
if CostoD<=EDirectos(x,1)

    CostoRuta=(EDirectos(x,1))+(E
Directos(x,1)*FSC);
else
    CostoRuta=CostoD;
end
end
else
    CostoRuta=10000;
end
end
end
else
%% ESTA PARTE EVALUA LOS EVÍOS INDIRECTOS
for t=1:NTO
    x=temp(:,1);
    if x==Ordenes(:,t)
        PIndir=Pesos(:,t);
        if PIndir>0 && PIndir<500
            Costo=EIndirectos(x,2);

            CostoI= ((Costo/CTW)*PIndir)+(((Cost
o/CTW)*PIndir)*FSC);
            if CostoI<=EIndirectos(x,1)

                CostoRuta= ((EIndirectos(x,1))+(EInd
irectos(x,1)*FSC))+(PIndir*FCC);
            else
                CostoRuta=(CostoI+(PIndir*FCC));
            end
        end
        if PIndir>=500 && PIndir<999
            Costo=EIndirectos(x,3);

            CostoI= ((Costo/CTW)*PIndir)+(((Cost
o/CTW)*PIndir)*FSC);
            if CostoI<=EIndirectos(x,1)

                CostoRuta= ((EIndirectos(x,1))
+(EIndirectos(x,1)*FSC))+(PIn
dir*FCC);
            else
                CostoRuta=(CostoI+(PIndir*FCC));
            end
        end
        if PIndir>=1000 && PIndir<1999
            Costo=EIndirectos(x,4);

            CostoI= ((Costo/CTW)*PIndir)+(((Cost
o/CTW)*PIndir)*FSC);
            if CostoI<=EIndirectos(x,1)

```



```

contCosto=1;
contPeso=1;
CostoMR=0;
while g<columnaMR
    O=Distancias(:,g);
    g=g+1;
    D=Distancias(:,g);
    Dist=EMilkRun(O,D);
    Costo=0;
    if EMilkRun(O,55)==0
        Costo=100000;
    end
    if EMilkRun(O,55)==IN
        Costo=(CIN*Dist)+PSt+FSCMR;
    end
    if EMilkRun(O,55)==KY
        Costo=(CKY*Dist)+PSt+FSCMR;
    end
    if EMilkRun(O,55)==NC
        Costo=(CNC*Dist)+PSt+FSCMR;
    end
    CostoMR(:,contCosto)=Costo;
    contCosto=contCosto+1;
end
contP=1;
for t=1:columnaMR
    salida=1;
    contPP=1;
    while salida==1
        if Distancias(:,t)==Ordenes(:,contPP)
            Peso(:,contP)=Pesos(:,contPP);
            if Peso(:,contP)>7000
                Peso(:,contP)=Peso(:,contP);
            else
                Peso(:,contP)=100000;
            end
            contP=contP+1;
            salida=0;
        else
            contPP=contPP+1;
        end
    end
    end
    Peso=sum(Peso);
    if Peso<=41000
        CostoRuta=sum(CostoMR)+K;
    else
        CostoRuta=1000000;
    end
end
else
end
end
CostoR(:,j)=CostoRuta;
FE(h,:)=sum(CostoR);
end
end

```

Anexo 12. Resultados experimento 1 pruebas pequeñas

EXP.	NO. ORDENE	PRUEBAS	PARÁMETROS		Resultados			Parametros seleccionados
			AGI	AGII				
1	4	1	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	AG=AG II Selección= Torneo NTI=50 NTGEN=100 PC=0.8 PM=0.3
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 12,797.00	\$ 3,207.20	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	6.536	7.748	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	8 I, 16 D, 35 I,		
		PM=0.3	PM=0.3		48 I	35 I, 8 D, 48 I, 16 I		
		2	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 4,143.50	\$ 4,276.40	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	6.145	6.87	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.3	PM=0.3		16 I, 35 I, 48 I, 8 I	8-16 MR, 35 I, 48 I		
		3	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 4,276.40	\$ 3,207.20	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	10.935	11.425	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4		8 I, 16-48 MR, 35 I	35 I, 16 I, 48 I, 8 D		
		4	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 4,276.40	\$ 3,207.20	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	11.32	11.269	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4		35 I, 8-16 MR, 48 I	35 I, 8 D, 16 I, 48 I		
		5	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 3,207.20	\$ 3,207.20	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	30.5	70.1	
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta			
		PM=0.5	PM=0.5		35 I, 48 I, 8 D, 16 I	35 I, 16 I, 8 D, 48 I		
		6	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 4,143.50	\$ 3,207.20	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	28.3	85	
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta			
		PM=0.5	PM=0.5		35 I, 16 I, 8 I, 48 I	35 I, 16 I, 48 I, 8 D		
		7	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 3,207.20	\$ 3,207.20	
Selección= Torneo	Selección= Torneo		Tiempo	70.007	30.38			
PC=0.7	PC=0.7		Ruta					
PM=0.4	PM=0.4		16 I, 48 D, 35 I, 8 I	48 I, 8 D, 35 I, 16 I				
8	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 3,207.20	\$ 3,207.20			
	Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	29.53	70.71			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta					
PM=0.4	PM=0.4		16 I, 48 I, 35 I, 8 D	16 I, 35 I, 48 I, 8 D				

Anexo 13. Resultados experimento 2 pruebas pequeñas

EXP.	Nc. ORDENES	PRUEBAS	PARÁMETROS		Resultados				Parametros seleccionados
			AGI	AGII					
2	5	1	NTI=50	NTI=50		AGI		AGII	AG=AG II Selección=Torneo NTI=50 NTGEN=100 PC=0.8 PM=0.3
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 7,330.10	\$ 7,330.10		
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	10.43	8.017		
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	43 I, 52 MR, 9-23 MR	43 I, 52 MR, 9-23 MR		
		PM=0.3	PM=0.3						
		2	NTI=50	NTI=50		AGI		AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 7,404.20	\$ 7,330.10		
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	8.743	8.044		
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	43 I, 52 I, 9-23 MR, 52 I	43 I, 9-23 MR, 52 MR		
		PM=0.3	PM=0.3						
		3	NTI=100	NTI=100		AGI		AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 7,397.30	\$ 7,330.10		
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	15.679	14.687		
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	52 I, 23-52 MR, 9-43 MR	52 MR, 43 I, 9-23 MR		
		PM=0.4	PM=0.4						
		4	NTI=100	NTI=100		AGI		AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 7,397.30	\$ 7,330.10		
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	14.815	14.963		
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	52-23 MR, 9-52 MR, 43 I	52 MR, 23-9 MR, 43 I		
		PM=0.4	PM=0.4						
		5	NTI=300	NTI=300		AGI		AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 7,397.30	\$ 7,330.10		
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	80.983	80.289		
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta	52-9 MR, 52 I, 42-23 MR	9-23 MR, 43 I, 52 MR		
		PM=0.5	PM=0.5						
		6	NTI=300	NTI=300		AGI		AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 7,330.10	\$ 7,330.10		
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	78.962	78.465		
PC=0.7	PC=0.7		Ruta	52 MR, 9 I, 43-23 MR	52 MR, 9-23 MR, 43 I				
PM=0.5	PM=0.5								
7	NTI=150	NTI=150		AGI		AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 7,397.30	\$ 7,330.10				
	Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	39.255	39.008				
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta	52-3 MR, 52-9 MR, 43 I	52 MR, 9-23 MR, 43 I				
PM=0.4	PM=0.4								
8	NTI=150	NTI=150		AGI		AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 7,330.10	\$ 7,330.10				
	Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	39.114	44.365				
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta	52 MR, 23 I, 43-9 MR	23-9 MR, 52 MR, 43 I				
PM=0.4	PM=0.4								

Anexo 14. Resultados experimento 3 pruebas pequeñas

EXP.	No. ORDENES	PRUEBAS	PARÁMETROS		Resultados			Parametros seleccionados
			AGI	AGII		AGI	AGII	
3	7	1	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	AG=AG II Selección=Ruleta NTI=50/100 NTGEN=100 PC=0.8/0.7 PM=0.4/0.3
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 17,600.00	\$ 7,330.60	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	10.69	10.983	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	16 I, 38 D, 6 I, 24-42 MR, 11I, 51I	11I, 51I, 42-24-6 MR, 38I, 16I	
		PM=0.3	PM=0.3					
		2	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 125,200.00	\$ 7,630.40	
			Selección= Ruleta	Selección= Ruleta	Tiempo	10.715	10.439	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	51I, 38I, 24 D, 11-42 MR, 6 D	6 D, 24-42 MR, 16 I, 38I, 51I, 11I	
		PM=0.3	PM=0.3					
		3	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 35,369.00	\$ 9,055.00	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	20.587	20.704	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	24 D, 42 D, 26-1 MR, 51D, 38I, 11D	6 D, 42 D, 38I, 24-11 MR, 51I, 16I	
		PM=0.4	PM=0.4					
		4	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 7,548.80	\$ 7,548.80	
			Selección= Ruleta	Selección= Ruleta	Tiempo	20.048	20.733	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta	51I, 38I, 16I, 11I, 6 D, 42-24 MR	16I, 51I, 38I, 6 D, 42-24 MR, 11I	
		PM=0.4	PM=0.4					
		5	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 16,705.00	\$ 75,488.00	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	1.58 min	1.4975 min	
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta	16 I, 11D, 42 D, 24-6 MR, 38I, 51I	42-24 MR, 6 D, 51I, 38I, 11I, 16I	
		PM=0.5	PM=0.5					
		6	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 27,742.00	\$ 7,604.00	
			Selección= Ruleta	Selección= Ruleta	Tiempo	151344	151644	
PC=0.7	PC=0.7		Ruta	24-6 MR, 51D, 38 D, 42-11 MR, 16I	51I, 38I, 24-42 MR, 11I, 6 D, 16I			
PM=0.5	PM=0.5							
7	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 17,221.00	\$ 7,548.80			
	Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	56.3	1.2444 min			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta	51I, 6 D, 38I, 24 D, 16I, 42-11 MR	38I, 51I, 42-24 MR, 6 D, 11I, 16I			
PM=0.4	PM=0.4							
8	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 36,459.00	\$ 7,330.60			
	Selección= Ruleta	Selección= Ruleta	Tiempo	55.818	56.871			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta	16 D, 38 D, 51I, 42-6 MR, 11D, 24I	38I, 42-24-6 MR, 51I, 11I, 16I			
PM=0.4	PM=0.4							

Anexo 15. Resultados experimento 4 pruebas pequeñas

EXP.	No. ORDENES	PRUEBAS	PARÁMETROS		Resultados			Parametros seleccionados
			AGI	AGII		AGI	AGII	
4	9	1	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	AG=AG II Selección=Ruleta NTI=150/300 NTGEN=200 PC=0.7 PM=0.4/0.5
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 1,006,800.00	\$ 14,013.00	
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	13.227	14.071	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.3	PM=0.3					
		2	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 49,740.00	\$ 22,340.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	13.671	15.234	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.3	PM=0.3					
		3	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 128,500.00	\$ 21,564.00	
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	26.652	26.87	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4					
		4	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 137,760.00	\$ 21,618.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	25.941	29.328	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4					
		5	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 39,632.00	\$ 12,536.00	
			Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	1.24129 min	1.22429 min	
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta			
		PM=0.5	PM=0.5					
		6	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 137,800.00	\$ 12,277.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	1.23079	1.28024 min	
PC=0.7	PC=0.7		Ruta					
PM=0.5	PM=0.5							
7	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 40,634.00	\$ 22,554.00			
	Selección=Torneo	Selección=Torneo	Tiempo	1.19476 min	1.18784			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta					
PM=0.4	PM=0.4							
8	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 119,090.00	\$ 12,657.00			
	Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	1.17631 min	1.25347 min			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta					
PM=0.4	PM=0.4							

Anexo 16. Resultados experimento 5 pruebas pequeñas

EXP.	No. ORDENES	PRUEBAS	PARÁMETROS		Resultados			Parametros seleccionados
			AGI	AGII		AGI	AGII	
5	10	1	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	AG=AG II Selección Ruleta NTI= 100/150 NTGEN=100/200 PC=0.8/0.7 PM=0.4/0.3
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 1,036,000.00	\$ 48,685.00	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	17.215	17.021	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.3	PM=0.3					
		2	NTI=50	NTI=50		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 1,108,000.00	\$ 20,852.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	16.842	16.71	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.3	PM=0.3					
		3	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 1,014,700.00	\$ 29,397.00	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	32.348	32.729	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4					
		4	NTI=100	NTI=100		AGI	AGII	
			NTGEN=100	NTGEN=100	Costo	\$ 145,580.00	\$ 39,301.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	32.918	31.166	
			PC=0.8	PC=0.8	Ruta			
		PM=0.4	PM=0.4					
		5	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 771,000.00	\$ 29,678.00	
			Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	2.53687 min	3.9857 min	
			PC=0.7	PC=0.7	Ruta			
		PM=0.5	PM=0.5					
		6	NTI=300	NTI=300		AGI	AGII	
			NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 1,007,000.00	\$ 28,904.00	
			Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	3.43168 min	3.46288 min	
PC=0.7	PC=0.7		Ruta					
PM=0.5	PM=0.5							
7	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 39,034.00	\$ 29,964.00			
	Selección= Torneo	Selección= Torneo	Tiempo	1.333 min	1.3303 min			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta					
PM=0.4	PM=0.4							
8	NTI=150	NTI=150		AGI	AGII			
	NTGEN=200	NTGEN=200	Costo	\$ 1,026,300.00	\$ 19,995.00			
	Selección=Ruleta	Selección=Ruleta	Tiempo	1.29179 min	1.33786 min			
	PC=0.7	PC=0.7	Ruta					
PM=0.4	PM=0.4							



Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Saltillo, Mexico, December 31st, 2015

Mariana Sánchez Barrientos

COMIMSA

I am pleased to inform you that your contribution " REDUCCIÓN DE ESCURRIMIENTOS DE ACEITE EN LOCOMOTORAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DMADV DE SEIS-SIGMA" by *Mariana Sánchez Barrientos* presented in the INDUSTRIAL ENGINEERING symposium at the 5th International Welding, Industrial Engineering and Manufacturing Congress 2015 in Saltillo, Coahuila Mexico in November 4-6, 2015, has been accepted to be published in the Proceedings of WIEM Congress

Organizer Committee of the WIEM 2015

CIENCIA Y TECNOLOGÍA No. 790 FRACC. SALTILLO 400 SALTILLO, COAH. C.P. 25290 TEL (844)411-32-00 FAX (844)416-77-12
www.comimsa.edu.mx, mail: posgrado@comimsa.com

Anexo 17. Carta de aceptación de memorias del congreso WIEM

Evaluación de flujo de materiales para el control de la producción

Ing. Mariana Sánchez Barrientos
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
de C.V.
COMIMSA
Saltillo, Coahuila
marianasb@alumnos-comimsa.mx

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos
Instituto Mexicano del Transporte
IMT
Pedro Escobedo, Querétaro
gaston.cedillo@imt.mx

Dr. Elias Gabriel Carrum Siller
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
de C.V.
COMIMSA
Saltillo, Coahuila
eliascarrum@comimsa.com

Dr. Pedro Pérez Villanueva
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
de C.V.
COMIMSA
Saltillo, Coahuila
pperez@comimsa.com

Resumen— El control de la producción es un tema crítico de cualquier empresa ya que, para evitar congestión de materiales o cuellos de botella, es necesario establecer o programar un flujo estable y exacto de los materiales en todo el proceso, es por esta razón que el control de la producción es indispensable. Este trabajo, muestra la representación del flujo de materiales en un proceso de producción de una empresa metalmeccánica, en donde se realiza un estudio mediante el software FactoryFLOW, que es utilizado para analizar tiempos, distancias y costos. El objetivo de este análisis, es evaluar el flujo del material que se presenta en todo el proceso de producción, para identificar tanto los costos en cada movimiento, así como la posible saturación de los mismos en cada etapa. Esto ayudara en la adecuada planeación para el control de los movimientos de materiales, de tal forma que se evite realizar traslados innecesarios.

Palabras Clave— *FactoryFLOW*, control de la producción, flujo de materiales.

I. INTRODUCCION

Hoy en día, para incrementar la competitividad de las empresas es indispensable controlar los procesos de producción, para asegurar que los productos sean entregados de acuerdo con los requerimientos del cliente (el cual puede ser una operación posterior en un proceso) [1]. Sin embargo, esta tarea representa uno de los mayores retos para cualquier compañía, debido a que involucra la coordinación adecuada de todas las actividades de producción para que los objetivos de la empresa sean alcanzados [2].

Lo anterior puede lograrse mediante el establecimiento de un flujo estable y exacto de todas las operaciones en los procesos, para impulsar la correcta operación de toda la empresa [3].

A razón de lo expuesto, es necesario identificar y analizar el flujo actual de los movimientos de materiales dentro de los procesos para considerarse en el control de la producción y determinar el funcionamiento real del proceso. Esto servirá de base para mejorar la circulación interna de los materiales [3].

Una forma de medir o evaluar el flujo que tienen los materiales a lo largo de todo el proceso de producción, es mediante la aplicación de un software, en este caso FactoryFLOW (FF) [3], mismo que es un complemento de la plataforma de Technomatix [5], [6]. Este software permite el análisis de todos los costos asociados con cada movimiento del material, el tiempo empleado para realizar estas tareas, además de otros aspectos importantes como los equipos de manipulación o los espacios que se utilizan, permitiendo con esta información tener una visión amplia y completa del flujo de materiales, así como el conocimiento de los costos, los tiempos de proceso, entre otros aspectos [7].

Debido a lo anterior, se considera el uso de FF para el análisis del flujo de los materiales en el presente artículo, debido a que se trata de un proceso de abastecimiento de piezas entre estaciones de trabajo, y por lo tanto esta herramienta es simple, fácil de usar, y proporciona una representación rápida del estado de todo el proceso. Además, permite la visualización del flujo adecuado de los materiales en consideración, dependiendo de ciertas características.

El presente artículo, está enfocado en el análisis del flujo de los materiales del área de acabado de una empresa metalmeccánica [9] a través del software FF, en donde se analizan 5 procesos internos, con el fin de ser una herramienta de apoyo en la tarea de planeación y control de la producción de esta área en específico.

El resto del artículo, está estructurado de la siguiente manera. La sección II presenta la importancia del flujo de los

Revisión del estado del arte de los problemas de ruteo de vehículos en redes de transporte LTL

Mariana Sánchez Barrientos
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
de C.V.
COMMSA
Saltillo, Coahuila
marianasb@comimsa.com

Eliás G. Carrum Siller
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
de C.V.
COMMSA
Saltillo, Coahuila
eliascarrum@comimsa.com

Miguel Gastón Cedillo Campos
Instituto Mexicano del Transporte
IMT
Pedro Escobedo, Querétaro
gaston.cedillo@imt.mx

Leonardo Peña Reyna
GRUPO QUIMMCO
S.A. DE C.V.
San Pedro Garza García, Nuevo León
leonardo.pena@quimmco.com

Resumen— El traslado de mercancías es clave para la competitividad de las empresas, ya que de estos depende que los pedidos de los clientes lleguen en tiempo y forma a los destinos establecidos. Para lo cual, hoy en día se presentan cada vez más estrategias para reducir costos y mejorar la efectividad de las cadenas de suministro y de transporte; una de estas estrategias son las denominadas redes de transporte LTL por sus siglas en inglés (*Less-Than-Truckload*), ya que dichos envíos van de las 100 hasta las 15 000 libras. El presente trabajo muestra una extensa revisión de los problemas que abordan las redes de transporte LTL y de las diferentes técnicas de solución basado en el análisis desde el punto de vista de diferentes autores, con el fin de establecer una amplia comprensión de las situaciones presentes en este tipo de servicio de transporte. Contribuyendo al cuerpo de conocimientos acerca del servicio de transporte en LTL y a las prácticas actuales que buscan aumentar la competitividad del transporte y reducir costos. Este trabajo parte de la revisión de los problemas generales del transporte de mercancías, continuando con el análisis de las complicaciones actuales y las diferentes formas de solución de cada problema en particular. Debido al amplio campo de investigación que comprende el tema, este trabajo se limita a mostrar los problemas principales en transporte LTL. Por último, se presenta una discusión acerca de los resultados y se establecen las posibles líneas de investigación futuras.

Palabras Clave— *Redes de transporte; LTL (Less-Than-Truckload); consolidación de carga.*

I. INTRODUCCION

El transporte de mercancías es una de las principales fuentes de ingresos para cualquier país. En 2010 Estados Unidos reportó para el transporte de mercancías un crecimiento del 9.1% con respecto a años anteriores, lo cual significa un aumento de \$1.316 billones de dólares. De la cifra mencionada anteriormente el 2.8% (\$402.5 billones de dólares) pertenece al

producto interno bruto. Del total de ese porcentaje, el 28% corresponde al transporte por carretera, 15.7% a transporte aéreo y 8% a traslados ferroviarios [1]. Según James F. Campbell [2], el transporte de carga terrestre es el modo de traslado de mercancías más importante del mundo. Para Estados Unidos, el autotransporte de carga logra el 81% del total de fletes trasladados y el 60% del volumen total de carga movida en el país [3].

Por otra parte en México durante el 2014, el transporte por carretera constituyó el 55% del total de movimientos realizados para el traslado de mercancías, el 12.5% realizado por transporte ferroviario, 31.9% por transporte marítimo y 0.1% por transporte aéreo [4]. Además, este tipo de envío participa con el 5.9 del producto interno bruto [5]. En ese mismo año, el autotransporte de mercancías registro la generación de 1.8 millones de empleos directos [6].

Lo anterior representa los requerimientos diarios del mercado competitivo, el cual exige a las empresas calidad, bajos costos y altos niveles de servicio [7]. Para lograr esto, la logística busca la sinergia de sus diferentes actores para cumplir con los requisitos del mercado [1]. Una forma de alcanzar esto es a través de un eficiente servicio de transporte de bienes (materia prima, producto en proceso o producto terminado), mismo que es una parte clave para el cumplimiento de los objetivos en cada empresa, ya que es precisamente el transporte, uno de los costos logísticos más elevados. Por lo anterior, se necesita que el traslado de bienes sea lo más fluido posible (sin interrupciones en el proceso) [9][10] de acuerdo a las características de las redes de transporte que se utilicen.

Existen diferentes tipos de estrategias o modos de transporte de bienes [11]. Por ejemplo, en la industria automotriz es importante coordinar los envíos que van de empresa a empresa puesto que en su mayoría se trata de material en proceso. Esta es la razón por la cual en esta industria el flujo de materiales debe ser lo más exacto posible y

BIBLIOGRAFÍA

Abdolalipour & Alibabae (2012). Harmony Search algorithm. *International Journal of Academic Research in Applied Science*, 13-16.

Antún, J. (2013). *Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos*. Banco Interamericano de Desarrollo. Banco Interamericano de Desarrollo.

Argueta, Christopher Mejía, María del Pilar Ester Arroyo López, and Juan Gaytán Iniestra (2014). Un enfoque multi-criterio para el diseño de una red para el transporte de embarques internacionales. *Contaduría y administración* 59.4 (2014): 193-221.

Arunapuram, Sundararajan, Kamlesh Mathur, and Daniel Solow (2003). Vehicle routing and scheduling with full truckloads. *Transportation Science* 37.2 170-182.

Arunapuram (2003). Vehicle routing and scheduling with full truckloads, 37(2), 170-182. *Transportation Science*.

Ávila Pompa, J. (2013). *ProMéxico: La industria de autopartes*. México, D.F.: Secretaría de Economía.

Ballou, R. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. México D.F.: Pearson Educación.

Banco de México (2016). *Compilación de Informes Trimestrales Correspondientes al Año 2015*. Banco de México.

Barcos, L., Rodríguez, V., Álvarez, M. J., & Robusté, F. (2010). Routing design for less-than-truckload motor carriers using ant colony optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 367-383.

Barnhart & Kim (1995). Routing models and solution procedures for regional less-than-truckload operations. *Annals of operations research*, 67-90.

Barnhart & Laporte. (2007). Chapter 8: Intermodal Transportation. Handbook in Operation Research & Management Science.

Berbeglia, G., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European journal of operational research*, 202(1), 8-15.

Blum & Li. (2008). *Swarm intelligence in optimization*. Springer.

Braekers, K., Caris, A., & Janssens, G. K. (2011). A deterministic annealing algorithm for a bi-objective full truckload vehicle routing problem in drayage operations. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20, 344-353.

Brar & Saini. (2011). Milk run logistics: literature review and directions. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 6-8.

Brar, G. S., & Saini, G. (2011, July). Milk run logistics: literature review and directions. In *Proceedings of the world congress on engineering* (Vol. 1, pp. 6-8).

Brown, A. M. (2003). *Improving the efficiency of hub operations in a less-than-truckload distribution center*. Blacksburg, Virginia.

Campbell, J. (2005). "Strategic Network Design for Motor Carriers". *Logistics Systems: Design and Optimization*.

Cedillo, G. (2015). *Inteligencia colectiva en la cadena de suministro. Complejidad e hipercompetencia global*. Saltillo, Coahuila.

Cedillo-Campos, M. G., Lizarraga-Lizarraga, G., & Martner-Peyrelongue, C. D. (2017). MiF3 method: Modeling intermodal fluidity freight flows. *Research in Transportation Economics*.

Chopra & Meindl. (2008). *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación*. Pearson.

Clarke & Ramser. (1964). Scheduling of vehicles form a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 568-581.

Clarke & Wright. (1964). *Operation Research*, 568-581.

- Coello Coello, C. (1995). *Algoritmos Genéticos y sus Aplicaciones*.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W., & Vigo, D. (2007). Vehicle routing. *Handbooks in operations research and management science*, 14, 367-428.
- Cranic, T. (2002). A survey of Optimization Models for Long-Haul Freight Transportation.
- Dai & Chen. (2009). Mathematical model and solution approach for collaborative logistics in less-than-truckload (LTL) transportation. In *Computing & Industrial Engineering*, 767-772.
- Dantzig & Ramser. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 80-91.
- Davis, L. (1987). Genetic algorithms and simulated annealing.
- Dorigo & Stützle. (2005). *Ant Colony Optimization*. Pearson.
- Fisher, M. (1995). Vehicle Routing. En *Handbook in OR & MS*. Vol. 8. Pennsylvania, Philadelphia: Elsevier Science.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley. Massachusetts .
- Hall, R. (1993). Design for local area freight networks. *Transportation Research: Part B*, 79-95.
- Hernández, S., Peeta, S., & Kalafatas, G. (2011). A less-than-truckload carrier collaboration planning problem under dynamic capacities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 933-946.
- Hillier & Lieberman. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*.
- Hosseini, S. D., Shirazi, M. A., & Karimi, B. (2014). Cross-docking and milk run logistics in a consolidation network: A hybrid of harmony search and simulated annealing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 567-577.
- INEGI. (2012).

- Kim, B. &. (1995). Routing models and solution procedures for regional less-than-truckload operations. *Annals of operations research*, 67-90.
- Kofer, W. &. (2014). Collaborative transportation planning of less-than-truckload freight. *Operation Research spectrum*, 357-380.
- Kotzab, H., Grant, D. B., Teller, C., & Halldorsson, A. (2009). Supply chain management and hypercompetition. *Logistics Research*, 1(1), 5-13.
- Li & Lu. (2014). Full truckload vehicle routing problem with profits. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 146-152.
- Li, J., Cai, X., & Zeng, Y. (2016). Cost allocation for less-than-truckload collaboration among perishable product retailers. *OR spectrum*, 38(1), 81-117.
- Liao & Shih. (2010). Vehicle routing with cross-docking in the supply chain. *Expert Systems with Applications*, 6868-6873.
- Ma, H., Miao, Z., Lim, A., & Rodrigues, B. (2011). Crossdocking distribution networks with setup cost and time window constraint. *Omega*, 39(1), 64-72.
- Machado, P., Tavares, J., Pereira, F. B., & Costa, E. (2002, July). Vehicle routing problem: Doing it the evolutionary way. In *Proceedings of the 4th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (pp. 690-690). Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Maldonado & Gómez. (2010). Moldeamiento y simulación de sistemas complejos. *Borradores de investigación: Serie documentos Administración*.
- Medina, L. B. R., La Rota, E. C. G., & Castro, J. A. O. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35-55.
- Mesa & Ukkusuri. (2013). Benefits of in-vehicle consolidation in less than truckload freight transportation operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 113-125.

- Miranda, A. V. (2007). La industria automotriz en México: Antecedentes, situación actual y perspectivas. *Contaduría y administración*, 209-246.
- Mortimore, M. (2005). Informe sobre la industria automotriz mexicana (Vol. 162). United Nations Publications.
- Musa, R., Arnaout, J. P., & Jung, H. (2010). Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross-docking network. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 85-92.
- Nemoto, T., Hayashi, K., & Hashimoto, M. (2010). Milk-run logistics by Japanese automobile manufacturers in Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5980-5989.
- Pérez, E. (2010). Guía para recién llegados a ALGORITMOS GENETICOS. En Departamento de organización de empresas. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad de Valladolid.
- Powell & Sheffi (1983). The load planning problem of motor carriers: Problem description and a proposed solution approach. *Transportation Research Part A: General*, 471-480.
- Powell, W. (1986). A local improvement heuristic for the design of less-than-truckload motor carrier networks. *Transportation Science*, 246-257.
- Reeves, C. (2003). Genetic algorithms. En C. Reeves, handbook of met heuristics. School of Mathematical and Information Sciences.
- Rodríguez-Piñero, P. (2003). Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones. Universidad Rey Juan Carlos, Servicio de Publicaciones.
- Romero, J., Dafonte, C., Gómez, Á., & Penousal, F. (2007). Inteligencia artificial y computación avanzada. en inteligencia artificial y computación avanzada. Santiago de Compostela: Colección Informática: Alfredo Brañas.

Sadjadi, S. J., Jafari, M., & Amini, T. (2009). A new mathematical modeling and a genetic algorithm search for milk run problem (an auto industry supply chain case study). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(1-2), 194.

SCT. (2014). Principales estadísticas del sector de comunicaciones y transportes.

SE. (2015). Reporte de la dirección de estudios económicos. México.

Torres Treviño, L. (2006). Algoritmos para aplicar computación evolutiva. en algoritmos para aplicar computación evolutiva. General Escobedo, Nuevo León.

Toth & Vigo (2002). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problems. *Discrete Applied Mathematics*, 487-512.

Toth & Vigo. (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*.

Villagra, S., Villagra, A., Lasso, M. G., Pandolfi, D., San Pedro, M. E. D., Rasjido, J. & Miño, R. (2011). Meta heurísticas aplicadas al Problema de Ruteo de Vehículos. In XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.

Wang & Kopfer (2014). Collaborative transportation planning of less-than-truckload freight. *Operation Research* , 357-380.

Wang & Lu (2009). A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. *Expert Systems with Applications*, 2921-2936.