

ANÁLISIS DE LA LOGÍSTICA DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE CARGA EN
COLOMBIA Y REVISIÓN AL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL ENRUTAMIENTO
DE VEHÍCULOS

INVESTIGADOR PRINCIPAL
CÉSAR AUGUSTO PEÑUELA MENESES

AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN
JUAN DAVID GÓMEZ ISAZA

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA COMERCIAL
PEREIRA 2016

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO.....	5
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
3.1 ANTECEDENTES.....	15
3.1.1 LAS VÍAS COLOMBIANAS.....	15
3.1.2 COSTOS DEL TRANSPORTE DE CARGA POR CARRETERA EN COLOMBIA.....	16
3.1.3 INFLUENCIA DEL GOBIERNO Y LA POLÍTICA EN LA LOGÍSTICA DEL TRANSPORTE DE CARGA.....	17
3.1.4 CENTROS DE ACOPIO.....	18
3.1.5 INFLUENCIA EN EL ASPECTO SOCIAL.....	19
4. ENFOQUE DESDE LA INGENIERÍA COMERCIAL.....	20
4.1 ANÁLISIS POR REGIONES.....	23
4.1.1 REGIÓN ANDINA.....	23
4.1.2 REGIÓN DE LA AMAZONÍA.....	24
4.1.3 REGIÓN DE LA ORINOQUÍA.....	24
4.1.4 REGIÓN PACÍFICA.....	25

4.1.5 REGIÓN CARIBE.....	25
5. MARCO TEÓRICO.....	26
5.1 ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE ARTÍCULOS RELACIONADOS.....	26
CONCLUSIONES.....	75
TRABAJOS FUTUROS.....	76
RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de artículos.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo logístico.....	22

GLOSARIO

LOGÍSTICA: Según el diccionario de la lengua española, publicado por la Real Academia Española (RAE), logística se define como el conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución.

CORREDOR LOGÍSTICO: Un corredor logístico es aquel que articula de manera integral orígenes y destinos en aspectos físicos y funcionales como la infraestructura de transporte, los flujos de información y comunicaciones, las prácticas comerciales y de facilitación del comercio¹.

SISTEMA LOGÍSTICO NACIONAL: El sistema logístico nacional puede ser definido como la sinergia de todos y cada uno de los involucrados en la adquisición, el movimiento, el almacenamiento de mercancías y el control de las mismas, así como todo el flujo de información asociado a través de los cuales se logra encauzar rentabilidad presente y futura en términos de costos y efectividad en el uso, prestación y facilitación de servicios logísticos y de transporte.²

PLATAFORMA LOGÍSTICA: Conjunto de instalaciones inmobiliarias, y el transporte físico de mercancías entre los diversos agentes, en donde se involucra totalmente a la infraestructura de transporte como medio de conexión entre ellos.³

NODO DE ABASTECIMIENTO/MAYORISTA: Su ámbito acostumbra a ser metropolitano o municipal, adoptando generalmente una funcionalidad básica de servicio a la distribución urbana de mercancías, que permite eliminar la circulación de vehículos pesados por el centro de las ciudades y las empresas de transporte, reorganizando el tráfico interno de mercancías en la ciudad.⁴

¹ BANCO MUNDIAL. Infraestructura logística y de calidad para la competitividad de Colombia. Departamento de Finanzas, Sector Privado e Infraestructura. Región de América Latina y el Caribe. 2006.

² FERREL O.C., Introducción a los Negocios en un Mundo Cambiante. McGraw-Hill Global Education Holdings, LLC. 2004.

³ Consejo nacional de política económica y social. Documento conpes 3574, Política nacional logística. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://wsp.presidencia.gov.co/sneci/politica/Documents/Conpes-3547-27oct2008.pdf>

⁴ Ibidem.

CENTROS DE TRANSPORTE TERRESTRE: Son plataformas de servicios al transporte de carácter local o metropolitano, o bien de soporte al tránsito interurbano de media y larga distancia por carretera. Cuentan con servicios a la carga, al vehículo y al transportador.⁵

ÁREA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN: Son plataformas logísticas de carácter regional, con todos los servicios y equipamientos necesarios para llevar a cabo actividades de almacenamiento y distribución.⁶

CENTROS DE CARGA AÉREA: Centros logísticos intermodales aéreo-carreteros vinculados a grandes terminales de carga aérea, con sus correspondientes instalaciones para la conexión terrestre y habitualmente dotadas de infraestructura aduanera y controles de comercio exterior.⁷

ZONAS DE ACTIVIDADES LOGÍSTICAS PORTUARIAS (ZAL): Plataformas logísticas vinculadas a puertos, que acogen actividades de segunda y tercera línea portuaria, generalmente dedicadas a actividades logísticas de mercancías marítimas. Su implantación responde a los requerimientos de manipulación y distribución de mercancía marítima hacia y desde el hinterland portuario.⁸

PUERTOS SECOS: Plataformas logísticas especializadas en el intercambio modal férreo y carretero (también puede ser ferroviario-marítimo) y en el tratamiento de mercancía ferroviaria. Se trata de un puerto seco cuando la terminal intermodal de mercancías está situada en el interior y conecta a través de la red férrea o carretera con el puerto de origen o destino.⁹

ZONAS LOGÍSTICAS MULTIMODALES: Las terminales ferroviarias intermodales pueden combinarse con los centros de transporte conformando grandes plataformas logísticas intermodales (especialmente ferrocarril-carretera) con una mayor complejidad funcional.¹⁰

⁵ Ibidem

⁶ Ibidem

⁷ Ibidem

⁸ Ibidem

⁹ Ibidem

¹⁰ Ibidem

Los servicios que ofrecen típicamente las plataformas logísticas dependen de aspectos como los modos de transporte que queden articulados en la misma, la orientación de mercado, el nivel de desarrollo de los operadores logísticos instalados, etc. Dichos servicios, comprenden, de manera esquemática:

- Las actividades de primera línea portuaria son aquellas directamente relacionadas con los procesos específicos de intercambio tierra-mar, tales como desembarque, carga, descarga.
- Las actividades de segunda línea portuaria comprenden todas aquellas actividades no estrictamente necesarias para que se produzca el intercambio modal, pero que complementan a aquellas y contribuyen a mejorar el servicio, tales como almacenaje y depósito, desembalaje y empaquetado, servicios de reparación, suministro y mantenimiento de barcos.
- Las actividades de tercera línea portuaria se refieren a aquellas funciones relacionadas con los servicios del puerto y la industria, centros de logística y de distribución.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión al estado del arte de algunos de los distintos modelos del problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) y algunas de sus variantes con sus respectivos métodos de solución. El VRP es un problema de optimización combinatoria que viene determinado por un conjunto de rutas y depósitos donde cada ruta es realizada por un solo vehículo a través de la cual se minimizan los costos globales de transporte y se satisface tanto la demanda como las restricciones operativas particulares a la variante estudiada y al objetivo de cada investigación de forma específica. Esto se realiza mediante los algoritmos de optimización combinatoria que resuelven las instancias del problema planteado acorde a los parámetros indicados por el investigador. De igual manera, se aborda el problema logístico de distribución de mercancías que se presenta en Colombia y se realiza un análisis discriminado en los diferentes factores de mayor impacto en el problema, tales como el estado de las vías, la estructura del sector de transporte de carga. En su conjunto los sobrecostos logísticos generados que finalmente afectarán el precio final de los productos. Se presenta también una clasificación de las diferentes variantes del problema de ruteo de vehículos, un pequeño compendio de trabajos e investigaciones realizados sobre el tema, donde se abordan distintos métodos de solución según la complejidad y la naturaleza del problema planteado.

Palabras clave: Problema de Ruteo de Vehículos, Transporte de carga, Mercancía, Logística colombiana.

ABSTRACT

In this paper is presented a review of the state of the art of some of the different models of the vehicle routing problem (VRP) and some of its variants with its respective solution methods. The VRP is a combinatorial optimization problem that is determined by a set of routes and depots where each route is performed by a single vehicle through which global transport costs are minimized and satisfies both demand and operational constraints particular for each variant studied and the purpose of each investigation in a specific way, it is done by combinatorial optimization algorithms that solve the instances of the problem posed by the parameters indicated by the researcher. In the same way, is approached the logistical problem of merchandise distribution that is presented in Colombia and a discriminated analysis is carried out on the different main factors of the problem, such as the state of the tracks, the structure of the cargo transport sector and The logistic overheads generated that finally affect the final price of the products.

Is also presented a classification of the various variants of the vehicle routing problem, a small compendium of works and researches on the subject, which addresses different methods of solution depending on the complexity and nature of the problem.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Cargo transport, Merchandise, Backhaul, Colombian logistics.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, no se han desarrollado las capacidades logísticas suficientes para lograr que el país posea una competitividad apropiada dentro del mundo, el cual se encuentra en un acelerado proceso de globalización. Esta falta de desarrollo, desemboca en el amplio rezago logístico en el que el país se encuentra, de manera que no se pueden aprovechar de manera óptima, las oportunidades comerciales presentadas en las distintas firmas de tratados de libre comercio.

Según el consejo privado de competitividad, las capacidades logísticas a desarrollar son todas aquellas que permitan optimizar los tiempos y costos de transporte, almacenamiento y distribución de materias primas, partes y productos terminados, desde la empresa hasta el consumidor final, de acuerdo con las estrategias de negocio y los modelos operativos de las empresas. El desarrollo de estas capacidades requiere de la coordinación de actividades que involucran tanto agentes públicos como privados. En este sentido, tener unas capacidades logísticas competitivas va mucho más allá de tener una infraestructura adecuada. A nivel internacional, una medición importante en materia logística es el Índice de Desempeño Logístico (IDL) elaborado por el Banco Mundial, en el cual Colombia ocupó en 2010 el puesto 72 entre 155 países.

Lo anterior es el reflejo de falencias en la infraestructura, pero también de la falta de un sector de transporte de carga de talla mundial, y de corredores logísticos apropiados que integren diferentes modos de transporte. En Europa, por ejemplo, más de 60% del transporte es multimodal, mientras que en Colombia es apenas 1,5%. Todo esto conlleva a que en Colombia los costos logísticos representen aproximadamente 23% del PIB, por encima del promedio de países de referencia¹¹.

¹¹ Consejo privado de competitividad. 6 de octubre del 2012. Informe nacional de competitividad 2012-2013. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.compitem.com.co/site/wp-content/uploads/2012/10/6-Infraestructura-Transporte-y-Logistica.pdf>

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo afecta el rezago logístico en transporte de carga vía terrestre en Colombia a la competitividad del país?

Las capacidades logísticas que se deben desarrollar en el país, son todas aquellas que permitan optimizar los tiempos y costos de transporte, almacenamiento y distribución de materias primas, partes y productos terminados, desde la empresa hasta el consumidor final, de acuerdo con las estrategias de negocios y los modelos operativos de las empresas¹². Para la mejora de estas capacidades es necesaria la coordinación de actividades que involucran tanto agentes públicos como privados. En este orden de ideas, optimizar la capacidad logística nacional va más allá de mejorar la infraestructura vial, la cual se encuentra en un estado crítico debido al mal estado de las vías, tema que se tratará a mayor profundidad más adelante.

Son claras las falencias del transporte de carga en Colombia a pesar del enorme esfuerzo emprendido por el país, porque los flujos de carga entre los centros urbanos y los puertos marítimos, y los centros urbanos entre sí, no cuentan con una estructura de puertos secos que la ordene y articule, en consecuencia, las operaciones de transporte de carga en el país, se soportan en el transporte carretero que sólo es un modo complementario, no cuentan con un modo ferroviario ideal, y se evidencia una amplia carencia en cuanto a la presencia de transportes multimodales.

Acorde con un estudio realizado por la Universidad del Rosario, enviar una tonelada de carga desde Buenaventura (Colombia) hasta Los Ángeles (Estados Unidos) tiene un costo promedio de US\$30, mientras que el transporte de esta carga desde el mismo puerto sobre el Pacífico hasta Bogotá alcanza un valor de US\$34. Según Andrés Felipe Santos, director del programa de Logística y Producción de la Universidad del Rosario, estas cifras demuestran el rezago que tiene el sistema logístico nacional y el impacto que esto tiene en los costos de las compañías exportadoras.¹³

Según el estudio realizado por la Universidad del Rosario, el valor del transporte de carga en el territorio nacional supera el promedio de los países de Latinoamérica. Nuestras empresas desgastan su inversión en operaciones logísticas cada vez más onerosas. El costo logístico, se incrementa de acuerdo con variables como la estructura del negocio, los canales, el sistema, las políticas de distribución y el acceso a las principales ciudades de comercialización.

¹² Consejo privado de competitividad. 6 de octubre del 2012. Informe nacional de competitividad 2012-2013. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.compitem.com.co/site/wp-content/uploads/2012/10/6-Infraestructura-Transporte-y-Logistica.pdf>

¹³Diario el país. 13 de septiembre de 2012. Transporte de carga dentro de Colombia es más costoso que exportar. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.elpais.com.co/elpais/valle/noticias/mover-carga-dentro-colombia-carro-exportarla>

En la distribución de una botella de vino desde Europa a Latinoamérica, el costo logístico en países como México, Estados Unidos y Argentina se incrementa en promedio US\$1,80. En Venezuela sube US\$9,8. Sin embargo, en Colombia, el costo alcanza US\$26, lo cual es un hecho bastante preocupante en cuanto al estado de la logística nacional.¹⁴

Adicional a esto, actualmente en el país se viene dando un fenómeno cada vez más grave en el sector de transporte de carga. Este fenómeno tiene como punto clave la aglomeración de vehículos de transporte de carga, repartidos en propietarios privados individuales, es decir, muchos camiones equivale a muchos propietarios.

Todo esto se debe a que el transporte en Colombia ha tenido un aumento en precios de los fletes, desde el año 2009 al 2012 de más de un 35%, razón por la cual fue muy atractiva la compra de vehículos de carga en estos años. A su vez, esto llevó a que hubiera muchos propietarios de 1 a 2 tracto camiones y se llegara a una sobre oferta de vehículos de transporte. Como resultado de esto, los precios de los fletes hoy en día en el país han disminuido considerablemente, llevando a que las empresas de transporte no puedan adquirir vehículos propios, pues los márgenes de utilidad se volvieron tan pequeños que llevan a las empresas a la quiebra.

Debido a la aglomeración de vehículos de carga en el país, los propietarios de los vehículos se han visto en un problema muy serio, pues la rentabilidad de los mismos ha bajado considerablemente y no es suficiente para pagar las cuotas de los leasings y demás créditos. Por esta razón la variable más importante para los transportadores se convirtió en la certeza de carga de ida y regreso, es decir el “round trip” con carga.

Esto quiere decir que la única forma de poder llegar a hacer rentable el vehículo, es teniendo carga asegurada tanto de ida al destino de descargue, como de vuelta, permanentemente¹⁵.

Se entiende por Backhauling a la recogida de mercancías en el trayecto de regreso en un modelo VRP. En teoría, Mediante la implementación del backhauling, se evidenciaría una baja en los costos logísticos presentes en el país, ya que, al tener una carga de compensación asegurada para el transportador, sus costos logísticos de viaje se reducirían y por tanto los costos logísticos generales de las empresas presentarían un comportamiento similar, lo cual reduciría la brecha en el rezago logístico presente en el país, cabe resaltar que esta hipótesis aún debe ser

¹⁴ Diario el país. 13 de septiembre de 2012. Transporte de carga dentro de Colombia es más costoso que exportar. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.elpais.com.co/elpais/valle/noticias/mover-carga-dentro-colombia-caro-exportarla>

¹⁵ QUINTERO. Jaime. Monografía como disminuir la guerra de precios entre los pequeños transportadores y dueños de vehículos de carga terrestre, adoptando un modelo, sin flota propia, con flota fidelizada y carga permanente garantizada. Designación de trabajo de grado (administrador de empresas). Colegio de estudios superiores de administración – CESA. Programa de administración de empresas.

modelada y probada para ratificar la importancia de la recogida de carga en el trayecto de regreso.

Según Gonzalo Duque escobar, profesor de Economía del Transporte en la Universidad Nacional de Colombia, el transporte de carga en Colombia tiene un medio carretero tan ineficiente, que el sector privado destina la mitad de los costos de logística a pagar costos de transporte. Además de una infraestructura asimétricamente ruinosa, nuestro parque automotor está envejecido, es excedentario en oferta e informal en su organización.¹⁶

Más de la mitad del parque automotor tiene una edad promedio que supera ampliamente los 20 años. Por el medio carretero se moviliza más de 100 millones de toneladas al año, de las cuales el 59% son productos del sector manufacturero, el 22% del agrícola, y el resto, por partes iguales, del sector minero y pecuario. Las regiones que más reciben carga se relacionan con los principales centros urbanos: Bogotá, Valle y Medellín; continúan las que están entorno a Barranquilla, Cartagena y Bucaramanga.

Por agrupación de productos, de cada diez toneladas, seis corresponden al sector manufacturero, dos al sector agrícola, y el resto al minero y pecuario. El 70% de la oferta de empresas del sector transporte se encuentra distribuida en Cundinamarca (40%), Antioquia (14%), Valle (10%) y Atlántico (6%).

La recogida de carga en el trayecto de regreso, se ve profundamente determinada por los generadores de carga en el país. En Colombia la producción nacional por generación de carga se distribuye de la siguiente manera: en el occidente colombiano con el Valle del Cauca al frente genera el 31%, el eje Santander-Cundinamarca-Tolima el 30% con Bogotá a la cabeza, y la Costa Atlántica el 17% con Barranquilla en primer lugar.

¹⁶ DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. Septiembre de 2008. Problemática y posibilidades del sistema de transporte de carga en Colombia. Consultado el 09 de agosto del 2015 Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1673/1/gonzaloduqueescobar.20083.pdf>

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Revisar los factores que impactan en el transporte de mercancías en Colombia y los modelos de solución que se proponen en la literatura para la optimización del ruteo de vehículos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la logística colombiana del transporte de carga y los factores de mayor impacto en la generación de sobrecostos en el transporte de mercancías.
- Realizar una revisión bibliográfica de modelos propuestos en la literatura para la optimización del ruteo de vehículos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Con este proyecto se pretende realizar un diagnóstico de la logística en Colombia a la vez que se realiza una revisión del estado del arte en cuanto al problema de ruteo de vehículos y la importancia de la recogida en el trayecto de regreso.

El interés de este proyecto tanto para la academia como para el sector productivo y para la logística nacional en general es de gran relevancia; visto desde la academia se pretende apoyar al departamento de investigación de la Universidad Libre Seccional Pereira en un tema logístico de optimización desde un enfoque fundamentado en la problemática nacional.

En un punto histórico donde la globalización se ha extendido de una forma sin precedentes, se evidencia la importancia que la logística desempeña en el crecimiento de la economía nacional mediante el transporte de mercancías; Colombia es uno de los países con costos logísticos más elevados en Latinoamérica, y dichos sobrecostos constituyen un porcentaje considerable en los precios de los productos finales.

Finalmente, en el sector productivo se busca generar apoyo a la solución de este tipo de problemas en las empresas que operan en el territorio nacional, las cuales tienen interés en mejorar la distribución de sus productos disminuyendo los costos logísticos de manera que se aumente su competitividad en el mercado.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de diferentes fuentes bibliográficas para contextualizar el estado en el cuál se encuentra la logística nacional y fundamentar un análisis situacional, tomando en cuenta los factores que tienen un mayor impacto en el transporte de mercancías y la raíz de sus sobrecostos, en este punto, se alcanza el primer objetivo específico postulado en el proyecto.

Posteriormente, se realizó un estudio de distintas fuentes bibliográficas, como bases de datos y publicaciones, y se efectuó una recopilación de distintas investigaciones cuyo tema central se fundamentaba en el VRP o alguna de sus variantes; acto seguido, se consolidaron los artículos recopilados y se numeraron sus características relevantes tomando en cuenta el modelo específico utilizado y su algoritmo de solución respectivo, al finalizar la ejecución de ésta etapa metodológica, se consigue completar el segundo objetivo específico de la investigación, y en consecuencia, se alcanza a entera satisfacción el objetivo general.

3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 LAS VÍAS COLOMBIANAS

Datos del Plan Estratégico Institucional (PEI) 2011 - 2014 del Departamento Nacional de Planeación (DNP) revelan que en total Colombia tiene 187.432,89 kilómetros de red vial, de los cuales 19.714,89 km están a cargo de la Nación, 35.040 km de la red departamental, 12.556 km es red privada no clasificada y 135.679,45 km hacen parte de la red terciaria entre los que también figuran como entidades a cargo Invías, las autoridades locales y departamentales. Lo más alarmante es que del total de los 187.432,89 km de red vial, solo un poco más de 16.000 km están pavimentados en su mayoría por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) que tiene más de 10.000 km, otros cerca de 2.000 km pavimentados por concesionarios contratados por el Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y los 4.000 km restantes por los gobernadores y alcaldes.¹⁷

Sumado a esto, tomando como referencia las vías pavimentadas por INVÍAS, la brecha presentada en los kilometrajes pavimentados entre departamentos es alarmante, pues mientras que en Antioquia hay 1.088,95 km pavimentados en Chocó las carreteras con asfalto o concreto no superan los 80 km.

¹⁷ Diario El universal. 9 de octubre del 2011. Solo el 8,5% de la red vial en Colombia está pavimentada. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/nacional/solo-el-85-de-la-red-vial-en-colombia-esta-pavimentada-47681>

Aunque el gobierno nacional ha avanzado en materia de pavimentación de vías, el rezago continuo, y deben tomarse medidas urgentes y hacer un enfoque en la pavimentación de vías principales, tomando como orden de prioridad su tránsito normal y su trascendencia logística.

A nivel internacional, una medición importante en materia logística es el Índice de Desempeño Logístico (IDL) elaborado por el Banco Mundial. Colombia ocupó en 2010 el puesto 72 entre 155 países¹⁸, y según los datos del banco mundial para el año 2015, el IDL en Colombia ha disminuido lo cual refleja una situación en decadencia presente en el país en cuanto a la logística.

De igual forma, podemos encontrar dentro de la problemática algunas dificultades estructurales, por ejemplo, en el canal de acceso a Buenaventura en las vías de acceso al puerto: se trata de una carretera angosta con demasiadas curvas peligrosas que dificultan el tránsito de los camiones, por lo que hay mucha probabilidad de ocurrencia de volcamientos o deslizamientos de tierra. Como no hay una vía alterna, el sólo taponamiento genera el colapso de la movilización de carga nacional desde y hacia Buenaventura.

En el puerto de Barranquilla, que es una de las terminales marítimas más importantes de la Costa Atlántica colombiana y privilegiada por su ubicación para el desarrollo comercial de la región y el país en general, las vías de acceso al puerto no cuentan con una vía específica para la movilización de la carga y provoca que los camiones entren por las carreteras que están destinadas sólo para tráfico liviano (además que la altura de 16 m entre el puente Pumarejo y el río impide el paso de buques de gran calado).

Problemas de movilidad se presentan también en el Puerto de Cartagena en el corredor de carga. Aunque no tiene los mismos problemas de Barranquilla por contar con una vía especializada para el transporte de carga, se está quedando muy corta para atender los incrementos en el flujo de entrada y salida de mercancías a través de camiones, por lo que también tiene las mismas limitaciones con otros puertos nacionales.

3.1.2 COSTOS DEL TRANSPORTE DE CARGA POR CARRETERA EN COLOMBIA

El Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera –ICTC– es una operación estadística resultado de una investigación del sector realizada por el DANE en el marco del CONPES 3489 de 2007, que permite medir la variación porcentual promedio de precios de un conjunto representativo de bienes y servicios necesarios,

¹⁸ Diario El Universal. 09 de octubre de 2011. Solo el 8,5% de la red vial en Colombia está pavimentada. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/nacional/solo-el-85-de-la-red-vial-en-colombia-esta-pavimentada-47681>

para garantizar la movilización de un vehículo prestador del servicio del transporte de carga por carretera en el país, a lo largo del tiempo, tomando como año base el 2008.

Es un indicador especializado que permite la toma de decisiones por parte de entidades del gobierno y empresas privadas del sector.

Los propósitos de uso de la información del ICTC, permiten:

1. Actualizar la estructura de costos operativos del transporte de carga por carretera en Colombia.
2. Servir de guía en el establecimiento de las condiciones económicas de los contratos celebrados en el sector.
3. Medir la incidencia de la variación de precios de los combustibles, insumos, factores (impuestos, seguros, mano de obra, costo de capital y peajes) y partes, piezas, servicios de mantenimiento y reparación, dentro de la estructura de costos operativos del transporte de carga por carretera.
4. Deflactar e indexar valores monetarios relacionados con el transporte de carga por carretera en Colombia.

Acorde a lo presentado por el DANE, en 2015, la variación anual del ICTC fue 2,89%. Esta tasa fue superior en 0,38 puntos porcentuales a la presentada en el mismo período del año anterior (2,51%). El grupo de costos que registró la mayor variación positiva fue partes, piezas, servicios de mantenimiento y reparación (11,18%); por otra parte, la única variación negativa se observó en el grupo combustibles (-8,54%). Los subgrupos de costos que presentaron las mayores variaciones positivas fueron partes y piezas ubicadas en el motor, caja de velocidades, embrague y dirección (16,81%) y costo de capital (16,17%); por otra parte, el subgrupo que presentó la única variación negativa fue combustibles (-8,54%). En diciembre de 2015, la variación trimestral del ICTC fue 0,39%. Esta tasa fue inferior en 0,62 puntos porcentuales a la presentada en el mismo período del año anterior (1,01%). El grupo de costos que registró la mayor variación positiva fue insumos (1,93%), en tanto que la única variación negativa se registró en el grupo combustibles (-2,40%). Los subgrupos de costos que presentaron las mayores variaciones positivas fueron: costo de capital (3,66%) y las partes y piezas ubicadas en la suspensión y tráiler (3,17%), mientras que las únicas variaciones negativas se observaron en los subgrupos: combustibles (-2,40%) e impuestos, seguros y mano de obra directa (-0,28%).¹⁹

¹⁹ DANE. 22 de enero de 2016. En 2015 aumentaron 2,89 % los costos de transporte de carga por carretera. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ictc/cp_ictc_IV_2015.pdf

3.1.3 INFLUENCIA DEL GOBIERNO Y LA POLÍTICA EN LA LOGÍSTICA DEL TRANSPORTE DE CARGA

En el proceso de consulta, las responsabilidades de los gobernantes en las falencias de la infraestructura vial colombiana son muy evidentes, por ejemplo, recientemente se reveló una red de corrupción en contratación de obras públicas en Latinoamérica por parte de la empresa Odebrecht. En Colombia, entre los años 2009 y 2014 Odebrecht admitió haber pagado en el país más de US\$11 millones, unos \$31.000 millones a precios de hoy, para conseguir contratos de obras públicas, pero la organización logró beneficios que superan los US\$50 millones. En Colombia, el exministro adjunto de Transporte Gabriel García y el exsenador Otto Bula fueron detenidos. Hubo además allanamientos a locales del grupo en varios países²⁰, por lo cual se llega a la conclusión de la corrupción presente en el país, genera el problema raíz, que se refiere a que la mayoría de los recursos destinados a la construcción de vías o el mejoramiento de las mismas, o a los planes de desarrollo logísticos pertinentes que permitan avanzar al país en materia de reducción de sus altos costos logísticos, no llegan a su utilización final, lo que desencadena una lista de problemas que son, entre otros:

- La carente seguridad que por muchos años afectó a Colombia, ha sido clave para el poco desarrollo de la logística en el país. La inexistencia de la misma en las vías colombianas ha cedido a los grupos al margen de la ley el control total o parcial de las mismas, generando por mucho tiempo una amenaza evidente en el sector transportador y un rezago enorme en materia de pavimentación de vías.
- Proyectos sin terminar, solo el 8,5% de las vías colombianas están pavimentadas. Esto también se debe a que se han implementado muchos planes de desarrollo pero quedan inconclusos.

3.1.4 CENTROS DE ACOPIO

Los centros de acopio son los lugares clave y punto de partida para una buena logística nacional, se entiende como centros de acopio puertos secos ubicados en lugares estratégicos, basados en nodos de circulación, que permitan garantizar la carga de compensación a los transportadores.

Aunque la presencia de estos puertos mejoraría ampliamente la logística nacional, aún se encuentran algunos problemas presentes en los puertos marítimos

²⁰ Diario El País. 3 de febrero del 2017. Obras en América Latina, 'paralizadas' por el caso de Odebrecht. Consultado el 25 de enero del 2017. Disponible en <http://www.elpais.com.co/elpais/internacional/noticias/odebrecht-escandalo-corrupcion-sacude-america-latina>

nacionales y en las respectivas carreteras que permiten el transporte de mercancías desde estos hasta su destino final.

La ubicación de algunos puertos se encuentra muy cerca de las ciudades y le resta capacidad de crecimiento para realizar obras complementarias de infraestructura que debe tener todo puerto moderno y competir con los de la región, tales como nuevas zonas de bodegaje, patios para contenedores, puntos de atraque, zonas francas industriales, entre otras.

Lo mismo sucede con la saturación de la conexión entre la Troncal de Caribe y las vías que comunican con el interior del país que generan represamientos para la entrada y salida de camiones; Aunque se han hecho grandes inversiones en este aspecto, no existe una política constante. Además, no existe una vía alterna para descongestionar el tráfico cerca del puerto y hasta se recurre a invadir otras vías que no son aptas para el transporte de carga, que también están afectadas por los cuellos de botella que se presentan.

3.1.5 INFLUENCIA EN EL ASPECTO SOCIAL

La protesta pacífica es el método por el que han optado los transportadores directamente afectados en el país debido a la falta de garantías por parte del gobierno. De acuerdo a lo publicado por el periódico El Tiempo²¹, en el paro camionero del 2016, las reclamaciones que sustentaban el sector camionero están ligadas a la falta de atención del Gobierno Nacional a hechos como la escasez de combustible en zonas de frontera y un precio subsidiado para el gremio, la situación de más de 40 conductores presos en Venezuela procesados por contrabando, y el restablecimiento de la tabla de fletes (que es una guía de precios para la contratación del transporte), y una mejora en las vías.

Pero más allá de eso, los camioneros denuncian una “guerra de precios”, una sobreoferta del parque automotor y “la falta de dientes” del Gobierno para hacer cumplir las normas.

El panorama es el mismo, tan sólo que ahora el estado ya tiene una política de transporte con el fin de modernizar el sector y hacerlo eficiente. Dicha política está en marcha e incluye que el mercado se rija por la ley de la oferta y la demanda.

Los agentes del sector concuerdan en algunas cosas con el gobierno, por un lado, son conscientes de que hay que modernizarse, pero por otro creen que lo primero que debe hacerse es superar las ineficiencias que existen en la cadena.

²¹ El Tiempo. 2016. Paro camionero. Consultado el 09 de agosto del 2016. Disponible en <http://www.eltiempo.com/noticias/paro-camionero>

4. ENFOQUE DESDE LA INGENIERÍA COMERCIAL

El eje temático al que tributa esta investigación es la logística, más específicamente, el backhauling, el cual es la regresada del camión en lleno después de realizar un trayecto, es decir, carga de compensación.

La logística es definida como el conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución. En el ámbito empresarial existen múltiples definiciones del término logística, que ha evolucionado desde la logística militar hasta el concepto contemporáneo del arte y la técnica que se ocupa de la organización de los flujos de mercancías, energía e información.

La logística es fundamental para el comercio. Las actividades logísticas conforman un sistema que es el enlace entre la producción y los mercados que están separados por el tiempo y la distancia.

La logística empresarial, por medio de la administración logística y de la cadena de suministro, cubre la gestión y la planificación de las actividades de los departamentos de compras, producción, transporte, almacenaje, manutención y distribución.

El modelo resultante como enfoque a la logística colombiana, acorde a los artículos consultados en este proyecto, se basa en una comprensión adecuada de los departamentos o regiones productoras en Colombia, clasificadas según los productos que producen de manera general, y los departamentos que mayoritariamente consumen ésta producción. De ésta manera, se plantea generar un mapa en el cual se puedan determinar rutas óptimas, y a su vez, posibles locaciones para puertos secos, de manera que la cultura del backhauling se pueda implementar satisfactoriamente como se muestra en la figura 1.

En este modelo, al determinar que departamentos poseen la mayor producción, y cuales tienen el mayor índice de consumo de ésta producción específica, se busca plantear una serie de rutas óptimas que mejoren ampliamente el tema logístico nacional, de manera que al conocer el desplazamiento de la carga desde su origen hasta su punto de destino, se puedan implementar estrategias cuyo objetivo sea que estos vehículos de carga, al llegar a su destino, se les garantice una carga de compensación que disminuya los costos logísticos, y a su vez, los del consumidor final y los de las empresas, mejorando así la competitividad nacional.

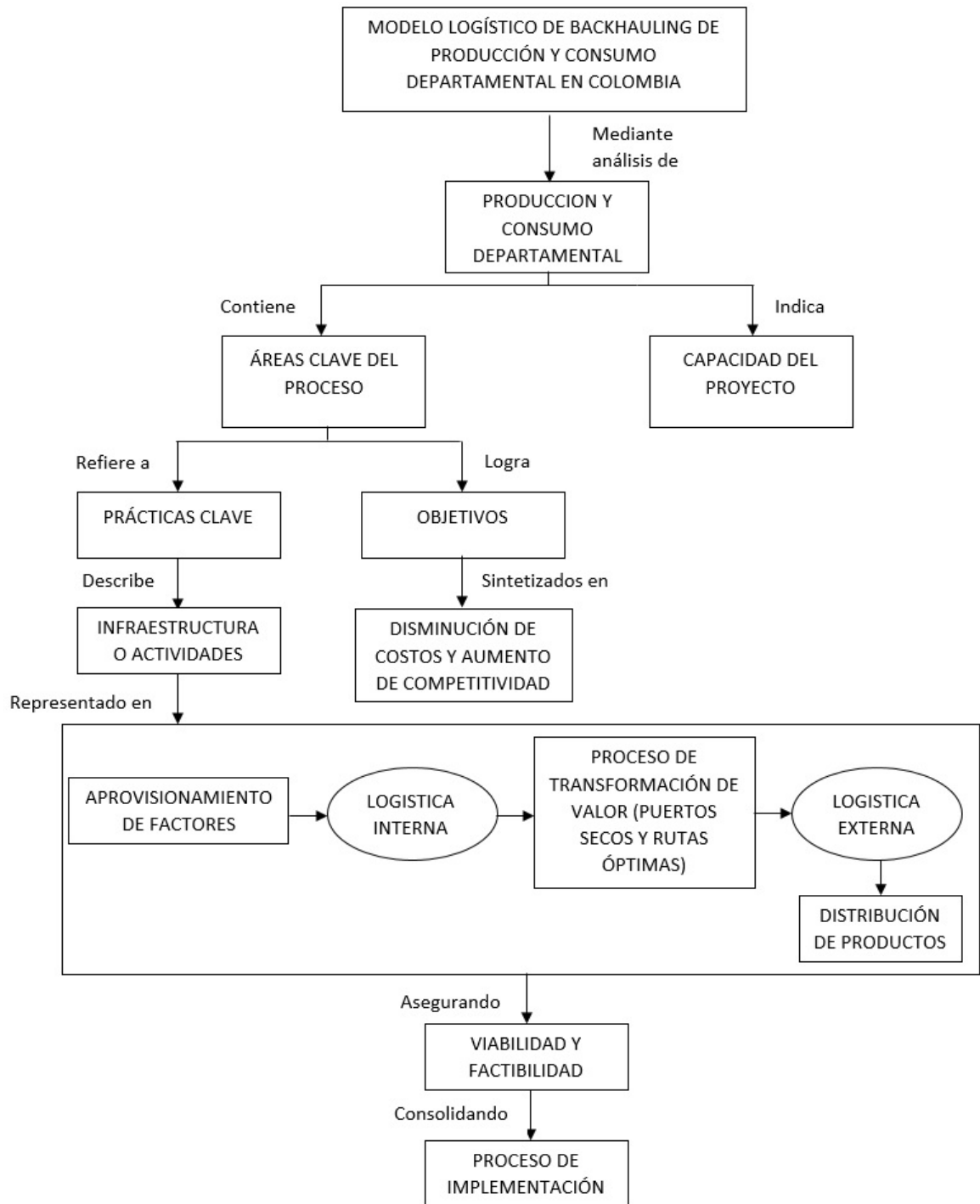
Con base en éste modelo, la competitividad de Colombia, en el marco mundial, podrá mejorar extensamente, lo cual podrá desembocar en una serie de beneficios y oportunidades, principalmente en los tratados comerciales vigentes que posee el país.

Dentro del modelo, se contempla la identificación de puntos estratégicos, por donde la mayoría del transporte de carga se movilice, en los cuales se puedan implementar puertos secos, y a su vez, determinar cómo los departamentos con mayor consumo,

en aprovechamiento de sus ventajas comparativas, puedan a su vez, ser generadores de carga, de manera que puedan garantizar la carga de compensación del sector transportador, a la vez que satisfacen la demanda presente en su respectiva población.

A su vez, se puede presentar al sector transportador, los mejores lugares en los que se puedan ubicar en el territorio nacional, de manera que se puedan diseñar rutas óptimas que contemplen centros de acopio, generadores de carga, y destinos de la misma, de manera que los costos logísticos del sector, puedan disminuir, mejorando la competitividad, y a su vez, mejorando la calidad del servicio, de manera que la carga se entregue a tiempo.

Figura 1. Modelo logístico.



Fuente: Elaboración propia.

4.1 ANÁLISIS POR REGIONES

Las variables a utilizar dentro del modelo planteado, a través de las cuales se calcularán los indicadores, son principalmente: los departamentos con mayor producción y los departamentos con mayor población.

La economía de Colombia se basa mayormente en la producción de bienes primarios (ganadería, la agricultura y la minería) sin valor agregado, presentando de esta manera bajos niveles de desarrollo científico y tecnológico. A pesar de esto Colombia es un país que necesita con fuerza mayor vías con mas fluviabilidad para poder sacar más ganancia de los productos que brinda un país como Colombia y el tema de las vías radica porque se ha caracterizado por la falta de inversión gubernamental. Se destaca en el ámbito internacional por el importante crecimiento que ha experimentado en la última década sin embargo se puede observar que podría haber más desarrollo si hicieran más inversión en las vías Colombianas; Como se había mencionado anteriormente de todas las vías Colombianas solo el 7% esta pavimentado el resto son vías de muy baja calidad el cual no permite que haya crecimiento a escala con otro tipo de países, por lo tanto en las siguientes imágenes y texto demostraremos que aunque nuestro país es uno de los más productivos del mundo el tema de las vías y la inseguridad vial no permite un aprovechamiento máximo de nuestros recursos

4.1.1 REGIÓN ANDINA

Es la región más importante de todas, y abarca una tercera parte del territorio nacional con su extensión de 282.450 km². Allí se concentra la mayoría de la población colombiana, y está conformada por los tres ramales de la cordillera Andina (Occidental, Central y Oriental) de donde toma su nombre.²²

Departamentos: Risaralda, Caldas, Quindío, Tolima, Huila, Cundinamarca, Boyacá Santander, Norte de Santander y en parte Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Chocó, Antioquia, Meta, Córdoba, Cesar, Casanare, Caquetá y Putumayo.

Clima: Aunque tiene todos los climas, en la zona predomina el de montaña tropical, mientras que en los valles cálidos y húmedos se da el de selva tropical ecuatorial. La temperatura va desde 28° hasta 0° C bajo cero en los nevados.

Economía: La actividad económica de esta región gira alrededor de la ganadería, la agricultura y la minería. Los cultivos de café, la caña de azúcar (cañadul), arroz y algodón son los más representativos. En la producción minera se destacan las explotaciones de oro, plata, platino, hierro, carbón, sal, mercurio y petróleo. Además, se concentran las principales industrias del país en textiles, calzado, productos químicos, alimentos y bebidas.

²² Colombia Aprende. Regiones naturales. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.colombiaprende.edu.co/html/productos/1685/article-141072.html>

4.1.2 REGIÓN DE LA AMAZONÍA

Es un territorio importante de Colombia y una de las regiones más ricas en especies naturales. La Región Amazónica está situada al sur y la forman las cuencas de los ríos Caquetá, Putumayo y Amazonas. La mayor parte de esta región la conforman selvas húmedas y extensas planicies, aptas para la ganadería y la agricultura, principalmente en Caquetá y Putumayo. Es la región menos poblada y la habitan en su mayoría indígenas.²³

Departamentos: Caquetá, Putumayo, Guainía, Guaviare, Amazonas y Vaupés.

Clima: predomina el clima cálido y húmedo con temperatura promedio de 28°C y abundantes lluvias durante todo el año.

Economía: La base de la economía de esta región es la agricultura, la ganadería y la pesca. Estos recursos se explotan artesanalmente, pues casi toda la región la pueblan tribus indígenas y además no poseen vías de comunicación apropiadas para el transporte.

4.1.3 REGIÓN DE LA ORINOQUÍA

Al igual que la Amazonía tiene un clima tropical húmedo y es plano, excepto en las ramificaciones de la cordillera Oriental y la sierra de La Macarena. Reserva nacional por sus recursos y especies zoológicos y botánicos. Toma su nombre del río Orinoco.²⁴

Departamentos: Meta, Arauca, Casanare y Vichada.

Clima: El clima predominante es el semihúmedo, pero también hay zonas áridas y semiáridas.

Economía: Aunque los cultivos de arroz, sorgo, palma africana, yuca y plátano son importantes para la región, esta región centra su economía en la actividad ganadera y la exploración petrolífera. La falta de vías de comunicación limita el desarrollo agrícola y convierte al río Meta en la principal arteria comercial de la región.

²³ Colombia Aprende. Regiones naturales. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.colombiaaprende.edu.co/html/productos/1685/article-141072.html>

²⁴ Colombia Aprende. Regiones naturales. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.colombiaaprende.edu.co/html/productos/1685/article-141072.html>

4.1.4 REGIÓN PACÍFICA

Es una zona estrecha y plana entre el océano Pacífico y la cordillera Occidental. Su clima es cálido, abundan las zonas selváticas y es la región más húmeda del país. La mayoría de la población es negra y mestiza.²⁵

Departamentos: Chocó, Valle del Cauca, Cauca y Nariño.

Clima: Predomina el clima cálido, con una temperatura promedio de 28°C y un régimen pluviométrico considerado entre los más altos del mundo (8000 mm/año).

ECONOMÍA: Sus principales actividades económicas son principalmente mineras: platino, oro y plata. La agricultura y la ganadería están poco desarrolladas debido a la abundancia de suelos pantanosos, y su explotación únicamente se hace para el uso doméstico.

4.1.5 REGIÓN CARIBE

Abarca toda la zona situada en la costa Atlántica y es predominantemente plana, caracterizada por su gran variedad ecológica y posee ecosistemas de bosque seco y selva húmeda.²⁶

Departamentos: Guajira, Sucre, Córdoba, Magdalena, Bolívar y Atlántico.

Clima: En esta región prevalece el clima cálido, con épocas de sequía y de lluvias continuas.

Economía: La ganadería es la principal actividad económica de casi toda la región, igual que los cultivos de banano, caña de azúcar, arroz, yuca y frutas. Además, entre los recursos minerales se encuentran el petróleo y el carbón.

²⁵ Colombia Aprende. Regiones naturales. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.colombiaaprende.edu.co/html/productos/1685/article-141072.html>

²⁶ Colombia Aprende. Regiones naturales. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.colombiaaprende.edu.co/html/productos/1685/article-141072.html>

5. MARCO TEÓRICO

El transporte de carga tradicional, contempla únicamente el envío de mercancías desde puertos o depósitos, hasta puntos definidos por sus clientes, en la red de transportes, el hecho de que después de la entrega de la mercancía, el vehículo de carga regrese vacío a su punto de origen, genera costos elevados de combustible en el trayecto, lo cual en última instancia, afecta el precio final del producto transportado.

La logística basada en la recogida de mercancías en el trayecto de regreso, se fundamenta en que el vehículo de carga, una vez entregada la mercancía en su punto de destino, pueda regresar a su punto de origen con carga de compensación, evitando viajes en vacío, lo cual generaría importantes ahorros en transporte a los proveedores del servicio, de tal forma que se minimice el costo global de llevar mercancías desde el depósito hasta los clientes, contribuyendo significativamente en la competitividad de los productos a través de mejores precios, y también en una importante medida al medio ambiente.

5.1 ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE ARTÍCULOS RELACIONADOS

Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris²⁷

Autores: Andrés Felipe Mediorreal Carrillo

VARIABLES O INDICADORES:

- Rutas
- Tiempos de distribución
- Costos de distribución
- Distancia

MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO:

Cientes: En el problema Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) se tiene un conjunto de clientes $I=\{1,\dots,n\}$ que tienen n ubicaciones diferentes. El depósito donde se cargan los camiones y se despachan va a ser denotado con 0. A

²⁷ MEDIORREAL CARRILLO, Andrés Felipe. Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris. Trabajo de grado Ingeniero industrial. Bogotá DC. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería industrial, 2014.

cada par de clientes (i,j) , donde i, j pertenecen a N , para $i \neq j$, se le asocia un costo de viaje que corresponde a la distancia $L_{ij} > 0$ entre ellos y un tiempo de viaje $T_{ij} > 0$.

Productos: Para el modelo del proceso de distribución de este trabajo, existe un conjunto de productos $L=\{1,\dots,n\}$, los cuales tienen un peso (W_l), un precio de venta (PR_l) y un costo de producción (CI) independientes. Por otro lado, cada cliente tiene una demanda por producto D_{il}

Vehículos: El conjunto de vehículos $K=\{1,\dots,n\}$ para este modelo cuenta con una capacidad (Q_k) independiente para cada vehículo, lo que quiere decir que este modelo puede funcionar con una flota tanto homogénea como heterogénea.

Modelo de Programación Lineal Entera

Grupos

I = Clientes $\{0..n\}$ Almacén $\{i=0\}$

K = Vehículos $\{1..n\}$

L = Producto $\{1..n\}$

Parámetros

A_i : Activación de entrega a cliente i .

CK : Costo Km recorrido de vehículo k .

CP_{il} : Costo de no entregar producto l al cliente i .

CI : Costo de producción producto l .

CV : Salarios conductor y auxiliar vehículo.

PR_l : Precio de producto l .

W_l : Peso del producto l .

L_{ij} : Distancia entre el cliente i y cliente j .

D_{lj} : Demanda del producto l del cliente j .

O_l : Oferta del producto l en el almacén.

Q_k : Capacidad de vehículo k .

l_i : Hora más temprano en que el cliente i puede recibir producto.

s_i : Hora más tarde en que el cliente i puede recibir producto.

TV_{ij}: Tiempo promedio de viaje entre nodo i y j.

TS: Tiempo de servicio promedio en cada cliente.

HI: Hora de inicio de la distribución

Variables

X_{ijk}: 1: Si el arco entre el cliente (i, j) es recorrido por el vehículo k 0: En caso contrario

Y_{ijkl}: Cantidad de unidades transportadas de producto l por el vehículo k del cliente i al cliente j.

Z_k: 1: Si el vehículo k es utilizado 0: En caso contrario

T_{ik}: Tiempo en el que el vehículo k sale del cliente j.

Las variables binarias X_{ijk} indican si el arco entre el cliente (i, j) es recorrido por el vehículo k, toman un valor de uno cuando el arco es recorrido y cero cuando no lo es. Las variables T_{ik} indican la hora de llegada al cliente i cuando es visitado por el vehículo k. Las variables Y_{ijkl} indican la cantidad de unidades transportadas del producto l del cliente i al cliente j por el vehículo k. Por último, las variables binarias Z_k representan la utilización del vehículo k, toman un valor de uno si el vehículo se utiliza y cero si no.

En cuanto a las restricciones, se dividen en varios grupos, donde se programa que todos los clientes deben ser visitados, se determina que cada vehículo $k \in K$ recorre un camino de 0 a n + 1, ya que asegura que se utilice al menos un vehículo. Como en todo VRP la restricción de flujo es necesaria y está determinada indicando que si el arco finaliza en el cliente j el siguiente cliente debe iniciar en este mismo nodo (i=j)

La capacidad de cada vehículo es impuesta. De igual forma, se asegura que, si un vehículo k viaja de i a j, no puede llegar a j antes que $T_{ik} + TS + TV_{ij}$, y actúan además como restricciones de eliminación de sub-ciclos.

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN:

Para la solución óptima del modelo formulado se utilizó la herramienta LPSolve IDE. LPSolve es una herramienta informática de software libre que resuelve problemas de programación lineal entera mixta.

Para la verificación del modelo se utilizó una instancia pequeña de solamente 5 clientes, luego una instancia con 10 clientes y por último con 15 clientes, con el propósito de analizar el tiempo de resolución y número de iteraciones.

Los métodos de búsqueda local (Local Secar) son métodos iterativos que empiezan desde una solución inicial S_0 , la cual debe ser factible, y generan una secuencia de soluciones S_i eligiendo en cada paso la mejor solución vecina. Cada solución S en el espacio de soluciones tiene un costo asociado $z(S)$, siendo una solución S_1 mejor que otra S_2 solo si $z(S_1) < z(S_2)$. Por lo tanto, la secuencia generada cumple la condición $z(S_i) < z(S_{i-1})$ siendo cada nueva solución mejor que la anterior. En algún punto de este proceso el método alcanzará indefectiblemente un mínimo local y no podrá encontrar una solución mejor, punto en el cual finalizará la búsqueda convirtiéndose el mínimo local en la mejor solución hallada.

CONCLUSIONES:

Se logró formular un modelo de ruteo de vehículos que caracteriza el proceso de distribución de los productos de las empresas, el cual maximiza las utilidades por medio de la disminución de costos de recorrido y el aumento en los niveles de servicio a los clientes por la implementación de ventanas de tiempo en el modelo.

Dado que los problemas de tipo combinatorio como el VRPTW y sus variaciones tienen gran complejidad matemática, el uso de meta heurísticas, en este caso la búsqueda tabú es muy eficiente a la hora de obtener una solución de calidad en mucho menos tiempo que un método de solución exacta. Adicionalmente es posible encontrar soluciones a instancias donde el número de nodos es mayor a 15 en el caso del modelo trabajado en este documento.

El algoritmo de búsqueda tabú que fue diseñado obtuvo soluciones muy cercanas para las instancias pequeñas comparadas con los resultados óptimos obtenidos por LPSolve. Para las instancias de 5 y 10 clientes se obtuvo el mismo óptimo y para la instancia de 15 clientes tuvo una diferencia entre el 2% y 3% menor a la respuesta óptima generada por LPSolve.

A través de un cambio en el proceso y además la implementación de un modelo que tiene en cuenta los horarios específicos de recepción de mercancía para clientes es posible encontrar una planeación de rutas donde se reducen costos de recorrido por visitas porque, primero el cliente siempre estará disponible y segundo no se va a incumplir con ningún pedido.

Como conclusiones del análisis de sensibilidad realizado, el parámetro más sensible pues presenta mayor variación de la función objetivo fue la cantidad de clientes a visitar. Por otro lado, el cambio de capacidad de vehículos y la reducción de las ventanas de tiempo presentaron una variación menor de la función objetivo, sin embargo, si las ventanas de tiempo de los clientes son muy reducidas o vehículos con capacidad muy baja, se necesitarían utilizar más vehículos o en algún caso un servicio de entrega externo.

Como resultados del análisis financiero para la propuesta del proyecto, primero, no se requiere de ninguna inversión actualmente para la implementación de la

propuesta y aun así se están generando ahorros en los costos variables de combustible y mantenimiento de los vehículos; por otro lado, el 5% de las ventas que no se están atendiendo mensualmente se van a ser efectivas gracias al modelo propuesto, ya que asegura la atención a todos los clientes diariamente.

TRABAJOS FUTUROS:

Cómo recomendación y para hacer el modelo mucho más preciso, puede realizarse una función de costo de recorrido que dependa tanto de la distancia, como del tiempo de recorrido según el tráfico de las vías, ya que el combustible que se consume cuando hay un tráfico denso es mucho mayor.

Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para el Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Entregas y Recogidas²⁸

Autores: Jhon Jairo Santa Chávez, César Augusto Peñuela Meneses, Mauricio Granada Echeverri.

VARIABLES O INDICADORES:

- Tiempo
- Costos
- Número de recorridos

MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO:

El VRPB puede ser modelado a través de la formulación de un problema de programación binaria.²⁹ En dicha formulación se requiere la construcción de varios conjuntos, descritos a seguir. Sea L (acrónimo del inglés Linehauling) el conjunto de clientes que requieren el transporte de paquetes desde el depósito, mientras que B (acrónimo del inglés Backhauling) reúne el conjunto de clientes con necesidades de recogida.

De esta forma, el modelo matemático de programación entera para el VRPB está formulado mediante ecuaciones donde M es el número de vehículos disponibles, de los cuales se asume que tienen todos la misma capacidad; $costo_i$ es el costo global

²⁸ SANTA CHÁVEZ, Jhon Jairo; PEÑUELA MENESES, César Augusto y GRANADA ECHEVERRI, Mauricio. Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para el Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Entregas y Recogidas.

²⁹ BALDACCI, R., MINGOZZI, A., y GIORGI, S. Agosto de 1999. An Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. Transportation Science, 33(3), 315 - 329.

del transporte por la ruta $i \in G_L$, mientras que $costo_j$ es el costo global del transporte por la ruta $j \in G_B$.

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN:

El modelo matemático descrito puede ser resuelto eficientemente haciendo uso de algoritmos de programación entera, siempre que la cantidad de nodos en el sistema sea relativamente pequeña. A medida que el número de clientes a ser atendidos aumenta, el espacio de solución crece exponencialmente. En estos casos se hace necesaria la implementación de algoritmos de aproximación (heurísticas o metaheurísticas), los cuales reducen la complejidad de un proceso de búsqueda basado en condiciones de optimalidad³⁰. En el caso del presente trabajo, la metaheurística Búsqueda Tabú (BT) es aplicada para la solución del problema³¹. Esta técnica se caracteriza por resolver problemas complejos de optimización combinatoria a partir de criterios de búsqueda local, también llamada como búsqueda en vecindario. A través de un proceso iterativo el algoritmo consigue evaluar intensivamente pequeñas regiones del espacio de solución y determinar la próxima región que debe ser explorada. El desplazamiento sucesivo de un punto X_1 para otro X_2 , dentro de su vecindario, $N(X_1)$, es efectuado a partir de variaciones leves en los atributos que caracterizan el vector de variables de estado.

CONCLUSIONES:

En este artículo se ha desarrollado una estrategia de solución al modelo matemático exacto propuesto por Baldacci, Mingozzi, y Giorgi en 1999³² para el problema de transporte de carga considerando entrega y recolecta de paquetes. El modelo se basa en la idea de disminuir los recorridos totales efectuados por una flota de vehículos considerando que los trayectos en los que se recogen paquetes pueden ser realizados por los vehículos antes de que estos retornen al depósito. Para resolver tal modelo se pueden usar técnicas de programación entera siempre que la instancia sea pequeña, es decir, con pocos clientes. En todo caso, el uso de estas técnicas requiere de un tiempo computacional considerable para entregar la solución. La metodología propuesta en este trabajo resuelve el mismo modelo con ayuda de la estrategia de búsqueda tabú, encontrando tiempos de ejecución bastante inferiores a los reportados en la literatura. El algoritmo debe ser modificado

³⁰ BAZARAA, M. S., SHERALI, H. D., y SHETTY, C. M. (2006). Nonlinear Programming. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

³¹ GLOVER, F. (1989). Taboo Search - Part I. ORSA Journal on Computing, 1(3), 190-206.

³² BALDACC, R., MINGOZZI, A., y GIORGI, S. (August de 1999). An Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. Transportation Science, 33(3), 315 - 329.

para evitar la convergencia prematura a óptimos locales por medio de la incorporación de mecanismos estocásticos que pueden contribuir a la diversificación del espacio de búsqueda y alcanzar mejores soluciones, e incluso mejorar aquellas soluciones reportadas en la literatura. Lograr este objetivo es de gran importancia para evolucionar en la complejidad del modelo matemático e incorporar un mayor número de variables que reflejen de mejor forma los problemas reales, como es el caso del problema de transporte considerando múltiples depósitos, flota heterogénea, ventanas de tiempo, entre otros.

Disminución de contaminación en el problema de ruteo de vehículos³³

Autores: Lorena Pradenas, Boris Oportus, Víctor Parada

VARIABLES O INDICADORES:

- Costos de transporte (en función de la distancia recorrida)
- Tipos de clientes (de entrega o de retiro)
- Impacto medioambiental

MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO:

Este estudio trata el VRPBTW de una manera distinta a la tradicional, ya que además de examinar los costos de transporte (en función de la distancia recorrida) y tipos de clientes (de entrega o de retiro) considera, el impacto medioambiental en la búsqueda de la solución. A continuación, se presenta el modelo matemático a ser utilizado para lograr este objetivo y que proviene desde Cho³⁴ e incorporando el impacto medioambiental propuesto por Bektaş y Laporte³⁵.

La nueva función objetivo para el VRPBTW, minimiza la cantidad de energía requerida por la ruta y además de la distancia, considera la carga transportada en cada arco recorrido, la velocidad del vehículo y otras de sus características. De igual manera, se expresa que cada cliente linehaul y backhaul debe ser atendido exactamente por un vehículo. El vehículo k no puede exceder su capacidad.

³³ PRADENAS, Lorena; OPORTUS, Boris y PARADA, Víctor. Disminucion de contaminación en el problema de ruteo de vehículos. Congreso Latino – Iberoamericano de Investigación Operativa.

³⁴ BAE, S.-T. HWANG, H. S. CHO, G.-S. y GOAN, M.-J. "Integrated GA-VRP solver for multi-depot system," Comput. Ind. Eng., vol. 53, no. 2, pp. 233–240, Sep., 2007.

³⁵ FRANCESCHETTI, HONHON. D., VAN WOENSEL. T., BEKTAS. T., y LAPORTE. G., "The TimeDependent Pollution-Routing Problem," Beta Res. Sch. Oper. Manag. Logist., vol. 409, no. 804, pp. 1–52, Feb., 2013.

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN:

Scatter Search

Scatter Search (SS) o búsqueda dispersa, fue desarrollado por Glover en 1977 y se trata de un algoritmo metaheurístico que pertenece a la familia de los métodos basados en población y se utiliza para resolver problemas de optimización. Opera a partir de un conjunto de referencia para generar soluciones mejores a las anteriores. Utiliza la combinación ponderada, una búsqueda lineal entre dos soluciones (de calidad y/o dispersas), que establece ponderaciones para crear nuevas soluciones. SS consta básicamente de cinco etapas³⁶: método de generación diversificada; método de mejora; método de actualización del conjunto de referencia; método de generación de subconjunto y método de combinación de soluciones que se describirán a continuación, para el caso en estudio. En primer lugar, cada solución se representa como un vector de números enteros donde cada cliente está asociado a un número distinto de 1, ya que este representa al depósito. Por ejemplo, en la solución $S = \{2,4,1,1,3,5,1,6\}$, existen 5 clientes $\{2,3,4,5,6\}$, los cuales son visitados en 3 rutas: $\{1,2,4,1\}$; $\{1,3,5,1\}$ y $\{1,6,1\}$ (notar que cada ruta se inicia y termina con un 1). Además, si existen dos número 1 seguidos como en S , implica que ese vehículo no es asignado. Lo mismo ocurre si existe un 1 al término de S . Las etapas de la metaheurística se detallan a continuación:

Método de generación diversificada: Se genera una población de un tamaño determinado ($P=100$), del que se extrae un subconjunto denominado “conjunto de referencia” de tamaño ($b=10$). Para esto se usa una heurística de construcción, uno por uno, mediante la aplicación aleatoria de 3 distintos métodos de selección, que son: Aleatorio, el siguiente nodo en la ruta se selecciona aleatoriamente; Cercanía, se selecciona al nodo más cercano al último presente en la ruta; Criterio múltiple.

Método de mejora: Las soluciones factibles previamente generadas, son tratadas con algoritmos de búsqueda local para obtener nuevas soluciones de mejor calidad. Se utilizaron 3 métodos distintos y en este estudio son determinados por la propia heurística: Swap (intercambio dentro la ruta), Insertion (intercambio de clientes entre rutas) y Fusion (unión de dos rutas distintas en una).

Método de actualización del conjunto de referencia: En esta etapa, se debe crear y actualizar el conjunto de referencia. El conjunto de referencia (b) se construye en base a las soluciones presentes en P para que contenga soluciones de calidad y diferentes entre sí. Es importante señalar que, en este conjunto, las soluciones están ordenadas de mejor a peor, respecto a su calidad. Se consideran:

³⁶ MARTÍ, R., LAGUNA, M. (2003): “Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias Avanzadas”. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, España.

Método de generación de subconjunto: Scatter Search, se basa en una búsqueda exhaustiva de todas las combinaciones posibles del conjunto de referencia. En este estudio, basado en Rego (2001), se combinan todas las soluciones del conjunto de referencia en 2-elementos, 3-elementos, ... , (n-1)-elementos. A partir del conjunto de referencia ($b=10$), se crea un subconjunto de 165 combinaciones, las que se utilizarán para aplicar el método de combinación. **Método de combinación de soluciones:** SS se basa en examinar de manera exhaustiva todas las combinaciones del conjunto de referencia. Para esto, a los subconjuntos creados en las etapas anteriores se les aplica algún método de combinación. Este estudio, se basa en el propuesto por Corberán, donde se combinan distintas rutas de dos soluciones considerando el número de elementos en común en cada una para construir dos nuevas soluciones completamente diferentes a las originales.

CONCLUSIONES:

En este estudio se plantea un modelamiento matemático para el ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y backhauling. Se diseña e implementa un algoritmo que minimiza la emisión de gases de efecto invernadero con flota homogénea. Para estudiar el desempeño computacional se realiza un experimento considerando instancias provenientes de la literatura con hasta 100 clientes. Además, basándose en un esquema de juego cooperativo se estudia las ventajas de la cooperación entre empresas que atienden a clientes independientes.

Se encontró que el número de vehículos se mantiene o incrementa en todos los casos estudiados en relación con el problema de minimización de distancia. Este comportamiento es debido a que existen rutas en que la energía requerida para recorrerlas es menor, si las rutas son particionadas, sobre todo en los casos de distancias pequeñas con bastante carga a transportar. La división de rutas, conduce a un aumento en los costos totales de la solución, sin embargo, si se considera flota heterogénea, sería posible hacer algunas rutas con otro tipo de vehículos, logrando mejor relación entre la carga máxima, con respecto a la que realmente se traslada, disminuyendo así los costos totales y también las emisiones.

Al estudiar la conveniencia de la cooperación entre las empresas, se encontró que para disminuir el costo de cada empresa de transporte, éstas deben trabajar en conjunto. Se encontró que ésta es una manera adecuada para repartir los ahorros y que también, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

A partir de este, es posible señalar, que el impacto medioambiental y los costos en el ruteo de vehículos se encuentran relacionados con la tasa de utilización del vehículo, las cargas que se transportan entre los clientes y las distancias entre

éstos, pero que encontrando una buena manera de equilibrar el problema (considerando clientes y proveedores en la misma ruta, empleando el vehículo adecuado a la carga y la distancia, entre otros), es posible cumplir con los requerimientos de los clientes disminuyendo el impacto medioambiental.

Algoritmo híbrido basado en un método de aproximaciones sucesivas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneo³⁷

Autores: Tatiana Quintero Quintero

VARIABLES O INDICADORES:

- Número de clientes a servir.
- Conjunto de índices de los nodos en la red,
- Demanda del cliente
- Costos
- Conjunto de tipos de vehículos disponibles en el depósito
- Capacidad de los vehículos
- Costos fijos asociados a cada vehículo de tipo

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Se propone un nuevo método para dar solución al problema de ruteo de vehículos heterogéneo.

En esencia, estamos proponiendo un método de aproximación sucesiva (SAM, por sus siglas en inglés), el cual utiliza como sub-rutina el SR-GCWS-CS. El SR-GCWS-CS, como se mencionó anteriormente, combina el método de los ahorros con la simulación de Monte Carlo utilizando las técnicas de memoria cache y de splitting para dar solución al problema de ruteo de vehículos capacitado.

³⁷ QUINTERO QUINTERO, Tatiana. Algoritmo híbrido basado en un método de aproximaciones sucesivas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneo. Trabajo de grado Maestría En Ciencias En Ingeniería De Sistemas. San Nicolás De Los Garza, Nuevo León. Facultad De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica. División De Estudios De Posgrado, 2012.

CONCLUSIONES

En esta tesis se abordó el problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea. Esta variante del problema de ruteo de vehículos original es un tanto más realista, ya que hoy en día es muy común que la flota de vehículos de las empresas sea de diferentes capacidades, debido por ejemplo a las especificaciones de empaque del material que están transportando u otros factores.

Para dar solución al problema de ruteo de vehículos heterogéneo existen diversos trabajos en la literatura. Sin embargo, se decidió nosotros decidimos diseñar una metodología que utilizara el algoritmo de los ahorros y la simulación de Monte Carlo, la cual es simple y eficiente, además de tener su plataforma en un software de libre distribución, así como evaluar su desempeño para ofrecer una alternativa de solución competitiva y rápida.

Se realizaron experimentos computacionales con varios tamaños y tipos de instancias tomadas de la literatura para dar validez al método.

Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique³⁸

Autores: Marco Antonio Cruz Chávez y Ocotlán Díaz Parra

VARIABLES O INDICADORES

- Cliente
- Vehículos
- Tiempo
- Costos

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

El algoritmo GA-PCP (Genetic Algorithm with Precedence Constraint Posting) consta de los siguientes pasos generales:

Paso 1. Creación de la población inicial compuesto por personas con información de ruta y las personas con la información de ventanas de tiempo. La población inicial

³⁸ CRUZ CHÁVEZ, Marco Antonio y DÍAZ PARRA, Ocotlán. Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique. Autonomous University of Morelos State. 2008.

se crea con 50% de individuos con el procedimiento PCP (Precedence Constraint Posting). Se completa el 100% de los individuos generados de forma aleatoria.

Paso 2. Aplicar la selección de torneo a la población inicial. La selección de torneo consiste básicamente en tomar la lista de la población llamada P, y copiar la lista y ordenar de acuerdo a la aptitud de cada individuo. Esta lista resultante se llama M. Con estas dos listas, se inicia la comparación entre dos individuos de la lista P con dos de la lista M. El que tiene menor aptitud de la lista P tomado como candidato y se combina con el individuo de menor aptitud de la lista M. Esto continúa hasta el final de las listas.

Paso 3. Aplique cruzado k. Un par de individuos se elige al azar de la población. Un par de genes se selecciona al azar, que son los mismos para ambos individuos, pero que están situados en posiciones inversas. Por ejemplo, si se elige el par del individuo uno, el par elegido del individuo dos sería el mismo par, pero en la posición inversa. A continuación, el cruce de los pares de individuos comienza. Este procedimiento es una permutación de un par de genes para cada individuo.

Paso 4. Aplicar mutación flip bit. La mutación flip-bits, consiste del en el intercambio de un par de genes en un individuo. El intercambio se genera aleatoriamente.

Paso 5. Construcción de la siguiente generación con personas migrantes calidad (con PCP) y con individuos de la población obtenida de un procedimiento convencional GA. Con el fin de crear la población inicial, se toma un cierto porcentaje x de la población generada por la fase genética del algoritmo genético (GA por sus siglas en inglés), y un cierto porcentaje $y = 100 - x$ de otra población migrante generado con el PCP se toma la suma del (x, y) el porcentaje es del 100% de la nueva generación a ser evaluada.

a) Construcción de la población x: Existen diferentes tipos de operadores genéticos aplicados en el procedimiento de generación de la población x para la fase genética. Uno de ellos es el operador método de selección de torneos, que consiste en tomar la lista de la población (LISTA DE INDIVIDUOS P), haciendo una copia de esa lista y ponerla en orden de acuerdo a la aptitud F del individuo, de menor a mayor (LISTA DE INDIVIDUOS M). Después de hacer estas dos listas, se comparan dos individuos de la lista de individuos P y dos individuos de la lista de individuos M. El que tiene la menor aptitud en la lista de individuos P se convierte en candidato para ser combinado con la persona que tiene la menor aptitud de la lista de individuos M.

Para el caso en el que la aptitud es igual para dos individuos, cualquiera de los dos individuos puede ser elegido. Este proceso se repite hasta que se alcanzan los extremos de las listas. El cruce propone un nuevo método que consiste en encontrar dos puntos al azar en el individuo RANDOM1 y en busca de los genes correspondientes para hacer el cruce con el individuo RANDOM2. Esto garantiza el

cumplimiento de una de las restricciones de la VRPTW que no está pasando dos veces por el mismo nodo. Para la mutación, se utiliza el método Flip-Bit que consiste en tomar dos genes al azar del mismo individuo, con gen1 siendo diferente de gen2, y procediendo a intercambiar los lugares de gen1 y gen2.

b) Construcción de la población y: El procedimiento de PCP se aplica para la construcción de los individuos factibles.

Paso 6. Evaluar la idoneidad con la función objetivo que se muestra en la ecuación (1), para el caso del problema VRPTW, se utilizan dos objetivos primordiales: el tiempo de la demanda y la atención a cada cliente, tratando de minimizar el costo que implica estos dos objetivos.

Paso 7. Compruebe si el criterio de parada es satisfecho. El criterio de parada se establece en función del tiempo de ejecución y el número de generaciones. Si algunos de estos criterios se cumplen, la ejecución GA-PCP está terminada.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados en esta investigación indican que el uso del algoritmo de búsqueda local de PCP en GA mejora los resultados en VRPTW sólo para pequeños problemas de tipo 1 (pequeña ventana y la capacidad del vehículo pequeño) con clasificación C y RC. No es eficiente si se utiliza el tipo 2 (grandes ventanas y gran capacidad de vehículos) en problemas para los casos con clasificación C y RC.

La población inicial está formada por individuos factibles; una población seleccionada al azar no se utiliza. En su lugar, la población inicial se selecciona de tal manera que se compone de individuos factibles que contienen información de las rutas y la información de tiempo. Para las próximas generaciones, un cierto porcentaje de la población de la PCP se trabajó con el fin de formar la población total de la generación siguiente. Se ha comprobado que cuando la población está formada en gran parte por individuos PCP, los resultados generados se encuentran cerca del óptimo global para los pequeños problemas de tipo 1. Cuando se utilizan pequeños problemas de tipo 2, es mejor no usar PCP en GA.

Está demostrado que, para los parámetros de referencia revisados, el algoritmo GA-PCP propuesto es competitivo en la eficiencia y eficacia con algoritmos de comparación utilizados en esta investigación que también aplica la técnica de limitaciones de satisfacción. El GA-PCP obtiene los mejores resultados en 50% de los problemas con tiempos competitivos de ejecución.

El algoritmo GA-PCP genera buenos resultados para los casos de 25 nodos, sin embargo, para los casos de 100 nodos que no genera buenos resultados. Se puede

ver a través de los resultados de este experimento que la aplicación de un mayor porcentaje de población PCP mejora el resultado de la solución de la GA.

TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo con los resultados obtenidos, que dependían del tipo de problema y su coherencia con el tipo de caracterización de la instancia, se propone que el trabajo futuro analizar más profundamente la caracterización de la instancia con el fin de encontrar posibles mejoras a la estructura del algoritmo GA-PCP, de acuerdo con el ejemplo probada y por lo tanto hacer que el algoritmo más eficiente para grandes casos.

Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado³⁹

Autores: Fredy Alexander Guasmayan

VARIABLES O INDICADORES

- Costos
- Distancia
- Tiempo

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Paso 1. Generación de la población inicial de forma aleatoria (200 individuos).

Paso 2. Partición de vectores de acuerdo a la demanda para generar cada una de las rutas.

Paso 3. Cálculo de la función objetivo. Según (2-19), matriz de costos y sobrecostos por congestión vehicular.

Paso 4. Realizar selección de padres por medio de técnica de ruleta.

Paso 5. Realizar recombinación de padres por medio de intercambio de cromosomas.

³⁹ GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

Paso 6. Partición de vectores hijos, de acuerdo a la demanda para generar cada una de las rutas y generar intercambio 2 OPT en cada ruta.

Paso 7. Hacer mutación si corresponde y calcular valor de la función objetivo. Según (2-19) y matriz de costos para individuos hijos.

Paso 8. Decidir que individuo ingresa a la población y que individuo se deshecha de acuerdo a un criterio de aspiración.

Paso 9. Verificar cumplimiento de iteraciones. Si se cumple, ir al paso 10, en caso contrario ir a paso 4.

Paso 10. Verificar si ya se realizó la modificación de población. Si es así, ir al paso 14, en caso contrario ir al paso 11.

Paso 11. Marcar modificación de la población

Paso 12. Reiniciar iteraciones y reemplazar a los peores individuos de la población por nuevos individuos (20) a través de métodos heurísticos y metaheurísticos listados a continuación:

- Heurística de intercambio 2 OPT.
- Heurística de inserción del más barato.
- Heurística del vecino más cercano
- Heurística del ahorro
- Heurística del barrido.
- Colonia de hormigas.
- Colonia de hormigas con intensificación de búsqueda.

NOTA: Los individuos generados, contienen el orden de las visitas, la partición de rutas y el valor de su función objetivo.

Paso 13. Verificar cumplimiento de iteraciones. Si cumple, ir a paso 14, en caso contrario ir a paso 4.

Paso 14. Se elige la mejor respuesta de la población y se hace una búsqueda en entornos variables.

Paso 15. Realizar intercambio 2 OPT en cada ruta y dar la respuesta final.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión del estado del arte y la búsqueda de artículos en la literatura especializada se encuentra que el problema de ruteo de vehículos tiene una gran variedad de restricciones que acercan al problema de la realidad, aunque la solución a este tipo de problemas combinatoriales se dificulta en la medida en que se tengan mayor cantidad de clientes. Dado esto en problemas en los que la realidad limita al desarrollo de métodos exactos para la solución, se generan diferentes métodos, tanto heurísticos como metaheurísticos que permiten obtener respuestas adecuadas para la implementación a la realidad.

En el desarrollo del proyecto se establece la metodología del algoritmo genético modificado como una metaheurística para la solución del problema, para lo cual se implementa el código en el software matlab, el que por su gran capacidad de manejo matemático por funciones, facilita en gran medida la operatividad de la codificación algorítmica.

Se propuso crear para el algoritmo genético modificado una población inicial híbrida que considera soluciones encontradas a través de técnicas heurísticas y soluciones generadas de forma aleatoria con un desempeño basado en una estructura de búsqueda aleatoria robusta que permite ajustar diferentes métodos tanto exactos como heurísticos y metaheurísticos en el mejoramiento de las soluciones, dando a esta técnica la flexibilidad suficiente en su codificación.

Se planteó una metodología por medio del estudio estadístico de la medida de densidad vehicular en la malla vial de algunas vías de la ciudad de San Juan de Pasto.

Se resolvió el problema de ruteo de vehículos con la restricción de dependencia del tiempo u horario de salida de los vehículos, considerando distintos escenarios basados en la congestión vehicular en horas pico en los días no feriados. Su implementación se realizó mediante el algoritmo genético modificado de Chu – Beasley.

El proceso de mutación en un algoritmo genético permite refrescar las soluciones de la población que tras un conjunto de varias iteraciones pueden tender a encontrar una solución óptima local lo que conlleva a un desgaste computacional, el cual se evita al introducir a la población un hijo con características diferentes a la tendencia de la solución y poder continuar por medio de combinación con la búsqueda de posibles mejores soluciones.

La efectividad de los resultados del algoritmo genético también radica en el uso del proceso de selección por torneo, permitiendo tomar al hijo más competitivo del algoritmo e introducirlo a la población

Dada la flexibilidad en la codificación del algoritmo genético, en el problema se opta por realizar un mejoramiento de la solución final por medio de intercambios de aristas en las rutas finales y la implementación de rutinas de solución básicas como la técnica de ahorros y algoritmo del vecino más cercano de Dijkstra, lo cual permite obtener errores en promedio del 0,5% en las instancias publicadas para el CVRP.

El uso del aplicativo de googlemaps permitió tener un acercamiento a la realidad de las rutas en la ciudad de San Juan de Pasto para los vehículos de la empresa de distribución de productos lácteos COLACTEOS. Dicha aplicación permite por medio de la georreferenciación de sectores en la ciudad tomar los valores de coordenadas en latitud y longitud de cada sector de interés y con base en dichas coordenadas se encuentra los valores de distancias entre sectores de acuerdo con las codificaciones de calles y carreras en la ciudad, estableciendo así la matriz de costos real.

Con el fin de estimar un costo de las rutas en la empresa, la aplicación de googlemaps permite obtener valores de distancia y velocidad media de los diferentes trayectos, con lo que se referencia el estado actual de las rutas de la empresa y su costo, que finalmente se compara con la solución obtenida por medio de los algoritmos genéticos que en el caso real generan un ahorro del 34%.

Los aforos vehiculares en las diferentes calles de la ciudad permiten tener una referencia del comportamiento de la densidad vehicular y por ende la congestión, que es un elemento importante en la descripción del comportamiento de las vías en distintas horas del día.

De acuerdo con las pruebas estadísticas y el análisis de varianza de los datos de densidad vehicular se establece que no existe diferencia significativa en la congestión vehicular en horas pico y entre los días de la semana excepto el día domingo en el que no se realiza recorrido de las rutas por parte de la empresa.

Por medio de los resultados de análisis de varianza de los datos y pruebas comparativas de diferencia de medias se establece la clasificación de las calles congestionadas como alta, media y baja; permitiendo así determinar el costo de las vías en función del tiempo de recorrido.

De acuerdo con los datos de velocidad media tomada de los aforos vehiculares y la velocidad media de googlemaps se establece una relación entre ellas para referir un sobre costo de acuerdo con la congestión vehicular en las calles de la ciudad, con base en esto se generan las rutas para cubrir los 153 sectores con salida y retorno al depósito, obteniendo como resultado un sobre costo por la dependencia del tiempo de 3,57 veces el costo de las rutas en horas no pico.

TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda el uso de aplicaciones de ruteo de vehículos por medio de GPS que generen mayor información como congestión vehicular y alternativas de vías menos congestionadas en tiempo real.

A pesar que la programación en HTML y Java es adecuada en el uso de servicios de googlemaps, se puede incursionar en el uso de matlab y su toolbox googleearth_matlab.

Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú.⁴⁰

Autores: Angélica Sarmiento Lepesqueur

VARIABLES O INDICADORES

- Capacidad del vehículo
- Demanda del cliente
- Distancia

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

- Determinar el tamaño de flota de vehículos
- Realizar meta-heurística con balance de carga o no
- Encontrar una solución inicial
- Definir porcentaje de ocupación deseado
- Encontrar la ruta de cada vehículo
- Intercambio 2 – opt para mejorar la distancia
- Terminar cuando se cumpla el número de iteraciones

⁴⁰ SARMIENTO LEPESQUEUR, Angélica. Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú. Trabajo de grado Maestría En Gerencia de Operaciones (Modalidad de Investigación). Chía. Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de La Sabana, 2014.

CONCLUSIONES

Los objetivos que se perseguían con la presente investigación se cumplieron ya que se logró desarrollar un enfoque tanto exacto como meta – heurístico para caracterizar y comprender el problema de ruteo de vehículos multi-objetivo con balance de carga entendiendo el balance de carga como la cantidad de productos a entregar o el número de clientes a visitar. Se logró tener resultados aceptables en tiempo de cómputo razonables.

Las comparaciones realizadas con las instancias conocidas en la literatura y los enfoques propuestos en esta investigación (modelo exacto y meta – heurística) muestran que se encuentran resultados con un gap promedio de 25% con relación al óptimo de minimización de distancia lo que evidencia que para mejorar el balance de carga es necesario castigar la distancia recorrida, pero se logra un equilibrio entre los dos objetivos.

Por medio del diseño experimental realizado se logra encontrar los parámetros que son relevantes en la variable de respuesta de la investigación y muestra que la meta – heurística presenta los mejores resultados con el uso de un tamaño de lista tabú dependiente la cual varía directamente proporcional al número de nodos de la instancia analizada (se define de tamaño $n/2$ donde n es el número de nodos de la instancia).

La herramienta desarrollada en C++ de Visual Studio 2008 es una herramienta de gran utilidad que fue probada en instancias teóricas de la literatura pero que se puede convertir en una herramienta importante para la toma de decisiones en las empresas logrando un equilibrio entre el costo de transporte (al minimizar la distancia) y la equidad en la asignación de carga a cada vehículo. Puede ser de interés, para las empresas que subcontratan el transporte ya que les garantiza a los propietarios de los vehículos que la asignación de carga se está realizando de una manera justa y equitativa.

Incorporar el objetivo de balance de carga entendiendo el balance como la cantidad de productos a entregar también puede contribuir a las empresas a estandarizar el proceso de carga y descarga de los vehículos ya que la carga almacenada en cada viaje es similar para todos los vehículos.

Finalmente, el aporte de los conocimientos adquiridos en la Maestría en Gerencia de Operaciones de la Universidad de La Sabana fue fundamental para la realización del presente trabajo ya que se logra integrar los diversos temas vistos durante la misma y aplicarlos a un problema particular.

TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se abren varias vías de investigaciones futuras. Por un lado, se puede incluir un criterio de aspiración en el enfoque de Búsqueda Tabú es decir contemplar la posibilidad de utilizar un movimiento vetado si éste genera una buena solución y analizar si este criterio mejora los resultados obtenidos en esta investigación.

Por otro lado, se puede considerar incluir esquemas de construcción de la solución inicial en la meta-heurística de Búsqueda Tabú, como nodo de inserción o la heurística de (Clarke & Wright, 1964). Igualmente considerar métodos adicionales para mejorar la distancia recorrida por cada vehículo, como intercambios 3-OPT o la heurística de Kernighan-Lin.

Otra investigación futura es contemplar otro tipo de balance de carga como número de clientes a visitar, longitud de la ruta o tiempo del recorrido y comparar los resultados con los obtenidos en esta investigación.

Adicionalmente, se considera en investigaciones futuras comparar los resultados obtenidos con otros métodos meta - heurísticos, como algoritmos genéticos, GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) o PSO (Particle Swarm Optimization).

Finalmente, buscando que el enfoque meta- heurístico propuesta se convierta en una herramienta de fácil acceso para la toma de decisiones en las empresas se propone como futura investigación el realizar una interfaz amigable y de fácil uso.

Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases.⁴¹

Autores: Julio Mario Daza, Jairo R. Montoya Y Francesco Narducci

VARIABLES O INDICADORES

- Capacidad de vehículos
- Distancia
- Costos
- Tiempo

⁴¹ DAZA, Julio Mario. MONTOYA, Jairo Y NARDUCCI, Francesco. Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 23-38. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), Diciembre 2009.

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En esta investigación se optimizó la solución mediante la metaheurística llamada búsqueda tabú. Ésta es la más reconocida entre las metaheurísticas y ha sido extensamente aplicada a numerosos problemas combinatorios tales como VRP, TSP, el problema de asignación cuadrática (QAP) o el problema de la mochila 0-1 multidimensional (0-1 multidimensional knapsack problem).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con base en la alternativa metaheurística de dos fases para el problema de ruteo de vehículos, con restricciones de capacidad y flota homogénea, permiten concluir que la aplicación de procedimientos heurísticos que implementen un proceso de programación de operaciones vehiculares puede presentar un comportamiento homogéneo y confiable ante diversas instancias de situaciones problemáticas reales del ruteo de vehículos.

En general, se encontraron soluciones muy buenas al problema en lo que respecta al tiempo computacional T_c requerido, el cual es sorprendentemente menor de un minuto ($T_c < 1 \text{ min}$), además se encontró una notable mejoría en la determinación del número óptimo de camiones para asignar a los clientes, esto mediante la planificación, llevando así a disminuir el costo fijo de la capacidad instalada de hasta en un 50 % menos que con las otras aplicaciones evaluadas en la presente investigación.

Los anteriores resultados pueden llevar a concluir que esta alternativa podría resultar muy conveniente en la práctica, si se cuenta con procesamiento de mediano a alto nivel. En esto radica su ventaja práctica y en la organización de las soluciones para una gestión provechosa. En consecuencia, se deduce también que el objetivo general de desarrollar una opción que permita mejorar la planeación y asignación de las rutas de transporte en las empresas de carga y mensajería se cumple a cabalidad.

Se evaluaron características de desempeño de varias metodologías de optimización en trabajos previos, justificando la escogencia de las heurísticas elegidas y la metaheurística búsqueda tabú para la propuesta; se diseñó e implementó el algoritmo en lenguaje Visual Basic 6.0, con una sencilla, agradable y didáctica interfaz gráfica para agilizar el análisis experimental.

The real-time time-dependent vehicle routing problem⁴²

Autores: H.-K. Chen, C.-F. Hsueh, y M.-S. Chang

RESUMEN:

En el presente artículo, se toma un problema de enrutamiento de vehículos dependientes del tiempo y con ventanas de tiempo, su solución está dada por programación entera mixta al modelo matemático que se describe en tiempo real, así como las rutas y horarios los cuales se toman como variables de decisión, además se tiene en cuenta un retraso en los nodos de salida. Este problema se prueba con 56 puntos, encontrando su valor óptimo.

TÉCNICA DE SOLUCIÓN

Solución del modelo matemático por medio de programación entera y heurísticas de inserción.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La solución del problema según los autores se hace con base en el algoritmo de inserción de clientes.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

El desarrollo del modelo matemático consiste básicamente en la adición de restricciones y penalizaciones al modelo de ruteo de vehículos. La solución de este se basa en verificar el costo de introducción un cliente a una ruta verificando su dependencia de tiempo basado en la probabilidad de congestión vehicular, la ventana de tiempo y la demanda del cliente.

RESULTADOS

Este problema se resuelve usando las 56 instancias de máximo 36 clientes según lo reporta Solomon, obteniendo buenos resultados en tiempos prudentes.

En este caso se toma varias instancias para hacer las pruebas correspondientes con el VRP, para posteriormente adicionarle las restricciones de tiempo con la

⁴² CHEN. H.-K., HSUEH. C.-F., y CHANG. M.-S., "The real-time time-dependent vehicle routing problem," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 42, no. 5, pp. 383–408, Sep., 2006.

misma metodología del VRP obteniendo resultados que están enmarcados en situaciones reales con valores de tiempo en un problema que se aproxima a la realidad, además de la posibilidad de cambiar las rutas de los vehículos de acuerdo a las restricciones en tiempo real de tráfico y tiempos de ventana de los clientes.

CONCLUSIONES

El RT-TDVRPTW fue estudiado y formulado como un modelo de programación entera mixta, que representa restricciones de tiempo de viaje, demanda y tiempos de espera o de ventana en tiempo real generando un algoritmo que actualiza las rutas en tiempo real con pequeñas modificaciones al problema básico de VRP.

En el modelo que se plantea, es importante resaltar que la hora de salida de los vehículos es tomada como una variable de decisión, la cual permite penalizar y optimizar el uso de la ruta en ciertos horarios.

Además de las restricciones en el modelo se plantea un nodo crítico penalizándolo para no optar por la introducción de este cliente a la ruta. Este concepto de nodos críticos distingue la ventana de tiempo en alto grado en tiempo real con el problema tradicional.

ANÁLISIS

El artículo permite visualizar el problema de ruteo de vehículos con dependencia de tiempo en situaciones cercanas a la realidad, por lo que es de gran importancia en el desarrollo del proyecto, además permite caer en cuenta de la dificultad tan grande en la solución del modelo matemático planteado como programación entera. Así se nota como las soluciones son muy buenas en la medida de las posibilidades computacionales, sin embargo, para instancias mayores sería imposible dar solución a este problema por métodos exactos, así se pretende implementar este problema como una codificación metaheurística que resuelva el problema con un número mucho mayor de instancias y con valores cercanos al óptimo en tiempo computacional pertinente.

Para el desarrollo del proyecto se pretende usar la codificación algorítmica de las restricciones cambiantes en tiempo real de los valores de tiempo que penalizan las rutas según el horario.

Adicionalmente en este artículo se muestra cómo se puede aplicar el problema de ruteo de vehículos en casos reales, como se pretende con este tipo de problemas

que en el caso se aplicaría al modelo de visitas para entrega de productos lácteos en la ciudad de San Juan de Pasto. ⁴³

Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system⁴⁴

Autores: A. V. Donati, R. Montemanni, N. Casagrande, A. E. Rizzoli, y L. M. Gambardella

RESUMEN:

En el artículo relacionado, se resuelve el problema TDVRP en el que el tiempo empleado para atravesar cada arista, depende de la hora del día en que se realiza el viaje, además se consideran flotas de vehículos con capacidad fija. El método de optimización consiste en la búsqueda de soluciones que minimicen dos objetivos jerárquicos: el número de visitas y el tiempo total de viaje.

OBJETIVO

Notar como la restricción de tiempo en el problema de ruteo de vehículos hace que la solución factible en el VRP sea infactible en el VRPTD.

TÉCNICA DE SOLUCIÓN

Para la solución del problema se implementó un Algoritmo de colonia de hormigas y ruta mínima entre dos pares de puntos.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El problema se codifica con vectores aleatorios de rutas o recorridos por hormigas artificiales que buscan el óptimo, estas hormigas tienen una función de eliminación y creación de la feromona en función del tiempo, la cual permite obtener una ruta por cada hormiga de forma cercana al óptimo.

⁴³ CHEN. H.-K., HSUEH. C.-F., y CHANG. M.-S., "The real-time time-dependent vehicle routing problem," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 42, no. 5, pp. 383–408, Sep., 2006. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. *Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado* Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

⁴⁴ DONATI. V., MONTEMANNI. R., CASAGRANDE. N., RIZZOLI. A. E., y GAMBARDELLA. L. M., "Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, no. 3, pp. 1174–1191, Mar., 2008.

POBLACIÓN INICIAL

La población de rutas iniciales para las hormigas se hace de manera aleatoria. Luego de encontrar rutas con las hormigas artificiales se realiza una corrida del algoritmo para mejorar la solución factible usando algoritmos de búsqueda local.

FUNCIÓN DE ADAPTACIÓN:

En este caso la función de adaptación del algoritmo está dada de acuerdo a la probabilidad con que se evapora o conserva la feromona, la cual está en función del horario en que se dan las rutas.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

Para esto se usa una ecuación de probabilidad con que se actualiza la feromona en cada cliente en función de constantes de peso y el tiempo.

RESULTADOS

El algoritmo tiende a favorecer a las rutas con clientes más alejados ya que posiblemente viajaban en períodos de tiempo con velocidades más altas, y los clientes con distancia más corta en períodos de tiempo con velocidades más bajas. Las mejores soluciones conocidas para el modelo no dependiente de tiempo se utilizan en el contexto del modelo dependiente del tiempo, su factibilidad y optimalidad podrían cambiar drásticamente en función de los horarios.

CONCLUSIONES

Se presenta un modelo dependiente del tiempo para el vehículo de enrutamiento basado en colonia de hormigas con un componente dependiente del tiempo para la actualización de feromonas. El algoritmo también está soportado por los procedimientos de búsqueda local, y se mostró la forma en que es posible mantener constante en el tiempo la búsqueda de movimientos adecuados para el recorrido de las hormigas.

Por otra parte, se demuestra que en la mayoría de los casos con la mejor solución conocida en el VRP, no se puede afirmar que esta sea adecuada en el VRP con dependencia de tiempo.

Para aplicaciones reales se debe tener muy en cuenta los horarios en que se hacen los recorridos para la búsqueda de valores óptimos en el ruteo de una situación real.

ANÁLISIS

En este artículo se nota como una metaheurística encuentra una buena solución a un problema combinatorial difícil, y como el tiempo influye notablemente en la solución de un problema de ruteamiento de vehículos.

De este modo para el desarrollo del proyecto se hace uso de la información del algoritmo de hormigas en la generación de soluciones al VRP iniciales para luego generar una búsqueda intensiva con otros métodos heurísticos y Metaheurísticos que encuentren mejores soluciones para instancias de un gran número de combinaciones.

Por otra parte, en el proyecto a desarrollar se tendrá en cuenta el método de actualización de feromona, pero en rutas mucho más grandes con instancias de al menos 80 clientes.⁴⁵

TESIS DOCTORAL, “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”⁴⁶

Autores: Y. V. Piqueras

RESUMEN:

El propósito de la tesis consiste en la presentación de un modelo económico de distribución de mercancías que generalice los problemas de rutas sometidos a restricciones temporales de servicio “vehicle routing problem with time windows” (VRPTW) y de un conjunto de técnicas heurísticas y metaheurísticas capaces de resolverlo eficientemente.

⁴⁵ DONATI. V., MONTEMANNI. R., CASAGRANDE. N., RIZZOLI. A. E., y GAMBARDELLA. L. M., “Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, no. 3, pp. 1174–1191, Mar., 2008. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

⁴⁶ PIQUERAS. Y. V., “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW,” Ph.D. Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Valencia, May., 2002.

OBJETIVO

Diseñar nuevos algoritmos que permitan resolver problemas de transporte y que sean robustos, flexibles y lo suficientemente rápidos como para abordar casos que, alejándose de los esquemas teóricos, se acerquen lo más posible a las situaciones reales.

TÉCNICA DE SOLUCIÓN.

En esta tesis se analiza un conjunto variado de técnicas de resolución basadas en la búsqueda secuencial por entornos que se aplicarán al problema VRPTW básico. Asimismo, se ensayan distintas variantes que surgen al modificar los parámetros que definen cada una de las estrategias. La optimización heurística de un problema combinatorio comienza con una solución, o un conjunto de ellas que, mediante cambios guiados estratégicamente, llevan a un resultado satisfactorio, aunque no necesariamente el óptimo.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En este trabajo se propone una heurística denominada HESECOR (heurística económica y secuencial de construcción de rutas) que permitirá la generación de soluciones tanto para el VRPTW como para las generalizaciones contempladas en el modelo propuesto. Este algoritmo constituye la base del desarrollo de las metaheurísticas empleadas posteriormente en la tesis.

FUNCIÓN DE ADAPTACIÓN: (CRITERIO DE EVALUACIÓN)

Todas las técnicas que se presentan parten de soluciones iniciales generadas con la heurística HESECOR. Se han propuesto diez estrategias de búsqueda basadas en distintas familias de metaheurísticas, y otras cuatro híbridas de las anteriores.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

Todos los parámetros se basan en la comparación de algoritmos clásicos con metaheurísticas y la formación de híbridos entre metaheurísticas, las cuales se basan en generar soluciones iniciales y posteriormente usar algoritmos como Búsqueda en vecindario variable, búsqueda Tabú y recocido simulado para mejorar las soluciones de acuerdo al algoritmo de economías planteado en la tesis, las soluciones obtenidas con diferentes métodos cuando no mejoran se usan

algoritmos para empeorar algunas rutas y continuar iterando hasta encontrar mejoras o valores cercanos al óptimo.

RESULTADOS

El algoritmo de las economías propuesto en la tesis mejora las soluciones generadas por algoritmos clásicos en tiempo y en valor en la función objetivo y sobre todo la opción de solución a problemas genéricos básicos que se desprenden del VRPTW.

El autor toma como referencia la instancia de Solomon y realiza comparaciones con los diferentes métodos heurísticos y metaheurísticos obteniendo resultados como se indican en los anexos del documento.

ANÁLISIS

La tesis de Víctor Yepes, menciona el uso de una metaheurística basada principalmente en los ahorros en la selección de rutas, esto lo logra básicamente retirando algunos puntos o nodos y resolviendo un problema de ruteo con los diferentes algoritmos existentes, posteriormente usa un método de inserción de los nodos retirados y se mide la función objetivo; para la inserción de los nodos se usa algoritmos como recocido simulado principalmente y se hace una búsqueda en los entornos con el fin de salir de óptimos locales.

Los resultados que obtiene son de buena calidad según los que se tiene como referencia para este caso, además de considerar muchos aspectos cercanos a la realidad como son el uso de flotas heterogéneas con capacidad no fija en los vehículos y las ventanas de tiempo variables, además de considerar a la función objetivo como la rentabilidad económica que tendría el uso de las rutas dependientes de distancias, satisfacción del cliente en la medida en que se entregue los productos a tiempo por medio de factores como velocidad de carga, jornadas laborales, uso múltiple de vehículos, asimetría en la duración de los viajes, congestión vehicular, horas extras y ruptura en la llegada al depósito. Todos estos elementos que se asocian con las restricciones del modelo matemático generan gran dificultad en la solución del problema, por lo que en la tesis se soluciona usando una penalización a la función objetivo que reduce o aumenta su rentabilidad económica.

Para el caso del proyecto a realizar se toma como referencia algunas de las técnicas heurísticas y metaheurísticas con mayor relevancia en la generación de una población inicial del algoritmo genético para el problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo y optando por la adición de la penalización de la función

objetivo o aumentando un factor a la matriz de distancias que permita generar diferentes costos en la medida en que los horarios en los transportes cambien con valores de probabilidad según la congestión vehicular.

Por otra parte, en el proyecto a realizar se generará la solución a un problema tomado totalmente de la realidad para una empresa de distribución de productos lácteos en la ciudad de San Juan de Pasto, para lo cual se establecen los puntos geo referenciados y se establece el modelo usando una matriz de costos por distancia y por penalización de esta según el horario en el que se genera la ruta.⁴⁷

Modelo matemático para el análisis y mejoramiento de los métodos aproximados para la solución de los problemas de enrutamiento, asignación de horarios y distribución de cargas: una aplicación a la entrega de productos embotellados⁴⁸

Autores: J. F. Delgado O.

RESUMEN:

Este trabajo presenta un modelo de programación entera para el problema RoSLoP (Routing- Scheduling-Loading Problem) en una compañía caso de estudio. La meta de RoSLoP es obtener una solución para el proceso de entrega de productos embotellados, minimizando el número de vehículos y la distancia de recorrido de los vehículos para satisfacer los pedidos de los clientes. RoSLoP se ha formulado a partir de dos problemas clásicos de optimización combinatoria: el problema de enrutado de vehículos (Vehicle Routing Problem o VRP) y el problema de empaqueo de objetos (BPP).

⁴⁷ PIQUERAS. Y. V., "Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW," Ph.D. Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Valencia, May., 2002. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

⁴⁸ DELGADO O. J. F., "Modelo matemático para el analisis y mejoramiento de los métodos aproximados para la solución de los problemas de enrutamiento, asignación de horarios y distribución de cargas: una aplicación a la entrega de productos embotellados," Instituto tecnológico de CD. Madero, TAM. México, dic., 2007.

OBJETIVO

1. Formular un nuevo modelo matemático que incorpore las variantes del problema VRP involucradas en el problema RoSLoP de la empresa caso de estudio.
2. Elaborar un estudio comparativo de los métodos de solución aproximados desarrollados para el problema RoSLoP.

El modelo matemático desarrollado para RoSLoP, se formuló utilizando las restricciones de los modelos creados en la literatura para la construcción de soluciones a las variantes de VRP, lo cual involucra la solución de un problema de optimización con satisfacción de restricciones (CSP) en el caso de un método exacto, así como la aplicación de formulismos que permiten la reducción de la dimensión del problema y la validación de las restricciones cuando la alternativa de solución es aproximada, como ocurre en la implantación de los métodos aproximados THSA y SBH-ARHC en el sistema de administración logística de la empresa caso de estudio.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Para dar solución al problema del VRP, el autor toma el modelo matemático clásico del VRP y como principal objetivo menciona el uso mínimo de vehículos para cubrir las rutas con la menor distancia y el menor tiempo de viaje tomando la base de datos de la empresa con la información de distancias y tiempos además de la demanda de cada uno de los clientes, posteriormente se toma el modelo matemático planteado en la tesis junto con una instancia del problema para realizar una comparación usando un software especializado como es LINDO API 4.0.

RESULTADOS

Las métricas aplicadas para los problemas de solución de problemas VRP son: número de vehículos utilizados y distancia recorrida, parámetros de interés en la empresa del caso de estudio. Por ello se desea tener una solución de referencia para medir el desempeño de los métodos aproximados de la variante rich VRP asociada a RoSLoP.

CONCLUSIONES

Se creó un método de solución exacto para la solución de RoSLoP, el cual se fundamenta en dos problemas de optimización clásicos: ruteo de vehículos VRP y empaçado de productos BPP. Siendo objeto de estudio de este trabajo la solución

de una variante rich VRP como disminución de costo por número mínimo de vehículos a usar en las rutas asociadas al caso de estudio. Se obtuvo, del análisis comparativo que los métodos heurísticos obtienen soluciones de 100% y 98% de aproximación en los parámetros de VRP: vehículos utilizados y distancia recorrida respectivamente, respecto a la solución óptima obtenida como referencia por el método exacto de este trabajo.

ANÁLISIS

En este proyecto se nota claramente como el modelado matemático de los problemas combinatoriales permiten resolver de manera exacta o casi exacta cada restricción, sin embargo, el número de ciudades a visitar sigue siendo limitado por la generación de las múltiples combinaciones y lo imposible de resolver por un procesador.

Por otro lado es importante recalcar como un modelo matemático permite generalizar los diferentes tipos de problema con la acción de adicionar o eliminar líneas de ecuaciones en el modelo ya sea como restricciones o coeficientes en la función objetivo, de este modo se puede acercar con mayor precisión a la realidad de la distribución de productos de las empresas, además de permitir agregar diferentes factores que puedan influir en el tiempo a los casos particulares de las empresas como son el tiempo de ventana, satisfacción del cliente, demandas heterogéneas, capacidades de los vehículos ya sean fijas o no, entre otros elementos.

Para el caso del proyecto a realizar se usa algunos formatos del modelado matemático para generar restricciones en las rutas como es el tiempo de recorrido de las rutas que se involucra junto con la distancia en el costo de la ruta, así se pretende usar un factor de estandarización entre tiempo y distancia para generar un costo que dependa tanto de la distancia de recorrido como del horario en el que el vehículo visita a los clientes como se desarrolla en la tesis de José Delgado.⁴⁹

También es importante recalcar que el desarrollo de software permite no solo adicionar restricciones particulares en una empresa, sino que presenta flexibilidad en el manejo de dichas restricciones, así se puede generalizar el problema y su

⁴⁹ DELGADO O. J. F., "Modelo matemático para el analisis y mejoramiento de los métodos aproximados para la solución de los problemas de enrutamiento, asignación de horarios y distribución de cargas: una aplicación a la entrega de productos embotellados," Instituto tecnológico de CD. Madero, TAM. México, dic., 2007. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

solución o particularizar de acuerdo a los requerimientos de la empresa, midiendo el tiempo de ejecución del programa y la manipulación de diferentes variables que no las contempla en un software comercial.

Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance⁵⁰

Autores: A. L. Kok, E. W. Hans, and J. M. J. Schutten

La congestión del tráfico diario constituye un problema importante para las empresas, tales como los proveedores de servicios logísticos y las empresas de distribución. La causa de llegadas tarde de clientes genera costos adicionales para la contratación de los conductores de camiones. Tales costos causados por la congestión del tráfico pueden reducirse teniendo en cuenta que se puede evitar la congestión del tráfico la cual es predecible antes de hacer el viaje. En la literatura, se proponen diversas estrategias para evitar la congestión del tráfico, tales como la selección de rutas alternativas, el cambio de las secuencias de visita de los clientes, y el cambio de las asignaciones de vehículo a los clientes.

En este artículo se presenta el desarrollo de una serie de rutas para vehículos con instancias de problemas en redes reales por carretera, y un modelo de velocidad que refleja los elementos clave de la congestión del tráfico de la hora pico. Los casos se resuelven para diferentes niveles de congestión utilizando el algoritmo de Dijkstra modificado y una heurística de programación dinámica restringida.

OBJETIVO

Encontrar la solución del problema de ruteo de vehículos con dependencia del tiempo estableciendo un modelo de velocidad de tráfico para reducir los costos de las rutas en distancia y tiempo.

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Los autores proponen el método de solución por medio del algoritmo modificado de Dijkstra, el que permite encontrar soluciones con el vecino más cercano, esto con el fin de resolver un TSP para cada ruta de forma rápida para que no afecte el

⁵⁰ KOK. L., HANS. E. W., y SCHUTTEN. J. M. J., "Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance," *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 5, pp. 910–918, May., 2012.

cambio inmediato en el tráfico vehicular, así se selecciona una ruta para un tiempo definido y se cambia según el horario junto con la velocidad de flujo de los vehículos y del tráfico.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La propuesta de los autores consiste en modelar la velocidad con que se desplaza el vehículo sobre la ruta en función del tiempo incorporando la hora pico y la congestión de tráfico.

CRITERIO DE EVALUACIÓN:

Para cada situación se resuelve un modelo de velocidad dependiente del tiempo denominado TDSPP y luego un problema de ruteo dependiente del tiempo VRPTD usando métodos de solución clásicos como el algoritmo de Dijkstra y la ruta más corta con el fin de resolver de forma general el VRP y con cambios simples solucionar la dependencia de tiempo, además se considera el tiempo de respuesta en la medida que este no debe afectar al cambio de horario mientras se resuelve el problema, posteriormente se hace un seguimiento de los horarios de salida en cada nodo alcanzado con el fin de determinar los tiempos de viaje en función del tiempo u horario y asignar etiquetas de los nodos que necesiten ser actualizados.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES:

Los autores proponen cuatro escenarios diferentes en los que las congestiones de tráfico se evitan con un promedio creciente. Para esto se ha propuesto un modelo que considera la velocidad en redes de tráfico reales por carretera, durante las horas pico que causan mayor congestión de tráfico. Este modelo de velocidad proporcionó una plataforma para probar el impacto de los diferentes escenarios de la realidad. Los resultados indicaron gran confiabilidad en la ruta al presentarse congestiones de tráfico en ciertas horas. Sin embargo, si se modela el problema del VRP con tiempos de viaje independientes del horario, la confiabilidad permite disminuir el costo visto en la disminución del número de rutas de vehículos y el tiempo de actividad total, además cuando se considera el problema de ruteo dependiente del tiempo en los niveles más altos de evitación de la congestión, las medidas de costo se pueden reducir significativamente puesto que se eliminan los vehículos que permanecen en la congestión, reduciendo los costos totales.

ANÁLISIS

Los autores mencionan que debido a la creciente cantidad de tráfico y una limitada capacidad de la red de carreteras, la congestión de tráfico se ha convertido en un fenómeno cotidiano causando costos elevados en la contratación de conductores de vehículos pesados en las empresas de logística y distribución.

La congestión del tráfico puede tener varias causas. Algunas muy predecibles, como la gran cantidad de tráfico de pasajeros durante las horas máximas diarias y otras son menos previsibles, tales como el clima o los accidentes de tráfico.

Dado que las congestiones en hora pico son muy predecibles y que constituyen un 70 a 87% de todos los retrasos los autores se centran en evitar congestiones de tráfico en la hora pico evitando estar en el lugar equivocado en el momento equivocado. Las estrategias para lograrlo son cambiar la secuencia de la visita de un vehículo, quitar a un cliente de una ruta de vehículos y se inserta en un complemento de otra. Estas estrategias de evitación de la congestión se pueden optimizar mediante la resolución de un VRP con tiempos de viaje dependientes del tiempo (TDVRP). Otra estrategia para evitar congestiones de tráfico es seleccionar una ruta alternativa entre dos clientes en horas pico. Esta estrategia implica que la ruta entre dos clientes depende de la hora de salida elegida, que puede optimizarse mediante la resolución de un problema del camino más corto con los tiempos de viaje en función del tiempo (TDSPP).

Para el proyecto se pretende tener en cuenta las estrategias de solución del problema de VRP para luego adicionar las restricciones del tiempo pero usando instancias de prueba de 80 a 100 clientes, para posteriormente poner en prueba en un caso real para la distribución de productos lácteos en la ciudad de San Juan de Pasto. Además, la solución inicial será planteada por diferentes métodos heurísticos para potencializar las soluciones por medio de algoritmos genéticos.⁵¹

⁵¹ KOK. L., HANS. E. W., y SCHUTTEN. J. M. J., "Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance," *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 5, pp. 910–918, May., 2012. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms⁵²

Autores: C. Malandraki and M. Daskin

RESUMEN:

El problema TDVRP se define como una flota de vehículos con capacidad fija que presta servicios a clientes con demandas fijas, el vehículo parte del depósito y visita los diferentes clientes de tal manera que el tiempo total de las rutas se reduce al mínimo. El tiempo de viaje entre dos clientes o entre un cliente y el depósito depende de la distancia entre los puntos y la hora del día.

Las características y propiedades de este problema semejantes a la del VRP, o incluso al problema del agente viajero permiten el uso de algoritmos clásicos para su solución con algunas modificaciones que generalmente se basan en la heurística del vecino más cercano.

OBJETIVO

Minimizar el costo de las rutas de acuerdo a la distancia y la hora del día.

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

La solución planteada por los autores se remite al modelado matemático del problema de TSP con dependencia de tiempo y luego el modelo de VRP y la consideración de la restricción de la dependencia del horario en que se genera la ruta. Para esto los autores generan una probabilidad de los horarios con mayor dificultad de tráfico y lo asignan al modelo, para realizar su solución por medio de una heurística planteada como una secuencia de pasos que resuelven el modelo del TSP y lo generalizan para un VRP. Finalmente la heurística que plantean se basa directamente en los métodos de programación lineal entera, que para este caso usan el método de los planos de corte.

⁵² MALANDRAKI y DASKIN. M., "Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms," *Transp. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 185–200, Aug., 1992.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El modelo matemático contempla una matriz de costos que depende de la distancia en que se encuentren los clientes y en qué tiempo se puede llegar a estos, es decir la velocidad a la cual puede acceder un vehículo que parte desde el depósito continua por la ruta y retorna nuevamente al depósito.

El problema se resuelve por programación entera

FUNCIÓN DE ADAPTACIÓN:

La función de medida del problema consiste básicamente en la obtención del valor mínimo de tiempo que tarda cada vehículo en recorrer su ruta como un problema de TSP.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

Para este modelo los autores plantean un valor de tiempo entre viaje desde cada cliente y el depósito y de acuerdo al horario, con eso se genera la matriz de costos, para lo cual generan soluciones de hasta máximo 25 clientes comparando los valores óptimos según las instancias de VRP propuestas por Christofides.

RESULTADOS

Los autores realizan varias corridas de los algoritmos para solucionar el modelo matemático usando técnicas de planos de corte encontrando soluciones cercanas al óptimo para problemas de TSP y VRP en tiempos adecuados para instancias de 10, 15, 20 y 25 clientes.

CONCLUSIONES

Según los autores, la principal conclusión radica en el tiempo de respuesta del algoritmo de planos de corte de la programación entera. En el caso de instancias pequeñas el algoritmo encuentra buenas soluciones pero para aplicarse a instancias con un número mayor a 25 clientes genera tiempos de cómputo muy altos.

Los autores encuentran que existe gran dificultad en la restricción temporal y no es posible generalizar un modelo de TSP o VRP simples que soluciones el problema de rutas con dependencia del horario, puesto que el tiempo es una restricción

dinámica y se debe considerar la solución del problema real en el momento en que se genere el recorrido del vehículo, es decir que se debe correr el algoritmo según la hora en que se requiera.

La consideración del tiempo en las rutas mejora en la realidad los costos de viaje de forma notable, aunque en algunos casos como accidentes de tránsito y congestión por factores climáticos no es fácil de considerar en el modelo.

ANÁLISIS

Para el desarrollo del proyecto los autores generan el interés por el uso de la restricción de tiempo como la conformación de una matriz de costos que no sea únicamente en función de la distancia entre los clientes, sino de la velocidad con que se accede a ellos, para esto se apoya en el concepto de función objetivo propuesta, sin embargo se nota fácilmente como el problema combinatorial no permite realizar un algoritmo de programación entera para un número grande de instancias, para lo cual en el proyecto se desarrollara métodos metaheurísticos que permitan considerar un número de clientes de 80 a 100 o más.⁵³

Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems⁵⁴

Autores: A. Subramanian

RESUMEN:

El VRP es un problema de optimización combinatoria clásica que se propuso a finales de 1950 y sigue siendo uno de los más estudiados en el campo de la investigación de operaciones. El gran interés en el VRP es debido a su importancia práctica, así como la dificultad en la solución de ella. Este trabajo aborda heurísticas exactas e híbridos para la solución de las diferentes variantes de la VRP, a saber: VRP capacitados (CVRP), Open VRP (OVRP), asimétrica CVRP (ACVRP), VRP con recogida y entrega simultánea (VRPSPD), VRP con Pickup mixto y Entrega (VRPMPD), Multi-Depot Vehicle Routing Problem, con recogida y entrega Mixto

⁵³ MALANDRAKI y DASKIN. M., "Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms," *Transp. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 185–200, Aug., 1992. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

⁵⁴ SUBRAMANIAN. "Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems," Ph. D Thesis. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2012.

(MDVRPMPD) y flota heterogénea VRP (HFVRP). Una extensa revisión de la literatura se realiza para todas estas variantes, centrándose en los principales aportes de cada obra.

El método de solución exacto es un algoritmo de Ramificación y planos de corte que también está diseñado para resolver el VRPSPD / VRPMPD.

Las pruebas se hacen con los valores de instancias de hasta 200 clientes.

Además, los autores proponen un algoritmo heurístico para resolver los VRP, dicho algoritmo lo denominan ILS-RVND, el cual se basa en la búsqueda local iterada (ILS) y hace uso de un algoritmo de descenso variable con zona aleatoria (RVND) en la fase de búsqueda local. Por último, un algoritmo híbrido que incorpora un conjunto de particiones en el enfoque heurístico ILS-RVND para la solución de 8 de los VRP tratados en este trabajo. La heurística desarrolla algoritmos híbridos y se prueban en cientos de casos de referencia y los resultados obtenidos son, en promedio, altamente competitivos.

OBJETIVO

- Revisión de los VRP, que describen algunas aplicaciones prácticas y métodos de soluciones propuestos en la literatura.
- Desarrollar métodos exactos de problemas de ruteo con entrega y recogida.
- Desarrollar un marco general heurística capaz de resolver una gran clase de VRP.
- Desarrollar un algoritmo general híbrido capaz de resolver una gran clase de VRP.

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

El autor en la tesis de doctorado se basa principalmente en la solución por métodos exactos de programación lineal entera al modelo matemático, para ello usa el método simplex para la generación de la solución inicial, a la que posteriormente le realiza un método de ramificación y planos de corte aplicados a la búsqueda de un valor óptimo con algoritmos de búsqueda local en el entorno de la solución encontrada por el método simplex.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La codificación del problema está basada directamente en el modelo matemático del VRP, con la adición de restricciones como la recogida y entrega de productos, Flota homogénea y heterogénea, demanda y capacidad de los vehículos. Todo en conjunto con el fin de resolver un problema general que contenga varias formas del problema particular como puede ser la flota homogénea o VRP con capacidad fija, entre muchos otros.

CONCLUSIONES

Esta tesis aborda enfoques heurísticos, exactos e híbridos del problema de ruteo de vehículos VRP. Se prueban las soluciones óptimas de 30 problemas abiertos y fueron capaces de demostrar la optimalidad de 7 problemas abiertos, además de encontrar buenas soluciones con problemas de hasta 200 clientes.

ANÁLISIS

La tesis presenta gran contenido de información acerca del modelamiento matemático del problema y como los algoritmos básicos de búsqueda local como 2 OPT, entre otros permiten mejorar la solución inicial sin generar problemas de tiempos computacionales y acercándose al óptimo con algoritmos heurísticos. Por otra parte, se tiene en cuenta el uso de algoritmos heurísticos como swap, inserción del más barato, intercambios de nodos y aristas, entre otros para sacar al problema del sesgo sobre un óptimo local y generar la búsqueda en el espacio de soluciones y llegar a otro valor que mejore la función objetivo del problema.

Para el desarrollo del proyecto, esta tesis ayuda a la revisión del estado del arte sobre los problemas y modelamiento matemático en el ruteo de vehículos, sin embargo la metodología de solución que se presenta no está basada directamente en el modelamiento sino en la aplicación de metaheurísticas que permitan obtener soluciones rápidas a problemas complejos con gran cantidad de clientes.⁵⁵

⁵⁵ SUBRAMANIAN. "Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems," Ph. D Thesis. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2012. Citado por: GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.

The TimeDependent Pollution-Routing Problem⁵⁶

Autores: A. Franceschetti, D. Honhon, T. Van Woensel, T. Bektas, y G. Laporte

RESUMEN:

El problema TDPRP consta del ruteo de una flota de vehículos con el fin de servir a un grupo de clientes y la determinación de las velocidades en cada tramo de las rutas. La función de costo incluye los costos de combustible, las emisiones y el conductor, teniendo en cuenta la congestión de tráfico que, en las horas pico, restringe significativamente las velocidades del vehículo y aumenta las emisiones.

En el artículo se describe una formulación de programación lineal entera del TDPRP y se proporciona ejemplos ilustrativos para motivar el problema y dar ideas acerca de las ventajas y desventajas que implica. También proporciona una caracterización analítica de las soluciones óptimas para una versión de un solo arco del problema, la identificación de las condiciones bajo las cuales es óptimo.

Con base en los resultados analíticos se presenta un algoritmo de optimización de la velocidad en una ruta fija y el desempeño computacional de instancias de referencia junto con el procedimiento de optimización de la velocidad.

OBJETIVO

Solucionar el problema del ruteo de vehículos dependientes de tiempo considerando la medida de contaminación dada por la velocidad de desplazamiento de la ruta debida a la congestión vehicular.

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Programación lineal entera.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El problema se modela como un PRP (Pollution routing problem) definido como una extensión del problema clásico de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo VRPTW.

⁵⁶ FRANCESCETTI, HONHON. D., VAN WOENSEL. T., BEKTAS. T., y LAPORTE. G., "The TimeDependent Pollution-Routing Problem," Beta Res. Sch. Oper. Manag. Logist., vol. 409, no. 804, pp. 1–52, Feb., 2013.

De esta forma los autores generan restricciones en el modelo dadas por la velocidad con que el vehículo cumple la ruta, además de hacer correspondencia entre la cantidad de kilómetros de recorrido y la velocidad a la cual los recorre con la cantidad de contaminantes dadas por el consumo de combustible.

FUNCIÓN DE ADAPTACIÓN: (CRITERIO DE EVALUACIÓN)

Los autores proponen como función objetivo la minimización del uso de un factor de consumo de combustible, puesto que este depende de la velocidad de flujo, y las congestiones vehiculares, para ello plantean el factor de consumo dependiente de varios factores como donde la relación de masa de combustible y aire, el valor calorífico de un combustible diésel típico, un factor de conversión de gramos a litros, el factor de fricción del motor, la velocidad del motor, el desplazamiento del motor, la densidad del aire, la superficie frontal, el peso en vacío del vehículo, la constante gravitacional, el ángulo de la carretera, coeficientes de resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura, entre otros.

Con este factor se constituye la matriz de costos para evaluar la función objetivo.

RESULTADOS

Se toma distancias reales en ciudades seleccionadas al azar en el Reino Unido con 10, 15 y 20 nodos. Todos los experimentos se llevaron a cabo mediante el uso de CPLEX 12.1 en un servidor con 2,93 GHz y 1,1 Gb RAM. Las ventanas de tiempo y tiempos de servicio, se generan aleatoriamente.

Los autores analizan el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y dependiente del tiempo u horario, el cual considera los vehículos que viajan en dos períodos sucesivos de la congestión y de flujo libre, respectivamente, y de manera explícita las cuentas de consumo de combustible que aumenta considerablemente cuando los vehículos circulan a baja velocidad. Dado que la cantidad de las emisiones de un vehículo es proporcional a la cantidad de combustible consumido, el enfoque de modelización adoptada en este trabajo la solución con rendimientos de menores emisiones de gases de efecto invernadero.

ANÁLISIS

En el desarrollo del proyecto se nota como el modelado matemático genera un gran aporte al comportamiento del problema, sin embargo la técnica de solución exacta no es la mejor en casos en que los clientes se presentan en cantidades mayores a

25, para esto se plantea la solución del problema aproximado usando metaheurísticas, aunque se considera en gran medida el uso de restricciones del tiempo como función de la velocidad con que se desplaza el vehículo y la congestión presente en las vías para formar la función objetivo cercana a la realidad de la distribución de productos en la ciudad de San Juan de Pasto.

The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times The Time - Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times⁵⁷

Autores: D. Tas, N. Dellaert, T. Van Woensel, and T. De Kok

RESUMEN:

En este trabajo se estudia el problema de ruteo de vehículos dependientes de tiempo, tomando los tiempos de viaje de forma probabilística. En este problema, los clientes tienen ventanas de tiempo un tanto permisibles.

El modelo matemático que describe este problema se basa en la eficiencia de la prestación del servicio y la fiabilidad que se genera en los clientes dependiendo si los tiempos de servicio incluyen o no.

La solución de este problema está dada por dos metaheurísticas, la Búsqueda Tabú y la técnica de Búsqueda en entorno variable, Llevando a cabo experimentos para casos de problemas conocidos y realizando análisis exhaustivos sobre los resultados numéricos en términos de tiempo de cálculo y de calidad de la solución, llegando a la conclusión de que los resultados pueden ser soluciones muy buenas para ser implementadas en el entorno de la vida real.

OBJETIVO

Solucionar el problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo donde el tiempo de viaje en las rutas sea determinado por medio de un proceso estocástico.

⁵⁷ TAS, DELLAERT. N., VAN WOENSEL. T., y DE KOK. T., "The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times The Time - Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times," vol. 413, no. March., 2013.

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Modelado matemático, metaheurística de búsqueda Tabú y búsqueda en entorno variable.

CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los pasos para encontrar la solución del problema son:

1. Construir una solución factible inicial con respecto a los tiempos probables de viaje dependientes del tiempo.
2. Mejorar la solución generada en el paso 1 mediante el uso de un método de búsqueda tabú TS con respecto al costo total ponderado.
3. Mejorar la solución generada en el paso 1 mediante el uso de un método de búsqueda en entornos variables adaptativos ALNS con respecto al costo total ponderado.
4. Aplicar un método de post-optimización de las soluciones obtenidas en el paso 2 y en el paso 3.

CRITERIO DE EVALUACIÓN:

Los autores toman en consideración el uso de instancias de problemas con 100 clientes y un depósito según lo propone Salomón en el año de 1987. Se toma el valor de la función objetivo como la minimización del costo dado por la relación de la distancia y el tiempo que tarda ir de un cliente a otro, además de tener en cuenta restricciones como las ventanas de tiempo y la capacidad fija de los vehículos.

RESULTADOS

En este trabajo, se considera un VRP con ventanas de tiempo suaves en las que los tiempos de viaje son modelados con respecto a la dependencia del tiempo y la probabilidad de congestión. La solución inicial construida en la primera fase se ha mejorado en la fase de enrutamiento que es manejado por un TS y un ALNS. En la tercera fase, se aplica un método de post-optimización a las soluciones obtenidas por las metaheurísticas. Formulando la hora de llegada, distribuciones tanto exactamente (sin tiempos de servicio) y aproximadamente (con tiempos de servicio). Llevando a cabo experimentos computacionales en casos de problemas conocidos. Los resultados indican que las formulaciones propuestas en este documento estiman con fiabilidad las distribuciones y los valores esperados empleados en el

modelo matemático. A pesar de que este modelo es bastante complejo y las distribuciones del tiempo de llegada son muy complicados, se tiene un procedimiento de solución eficaz que ofrece muy buenas soluciones finales en un período razonable de tiempo.

ANÁLISIS

El uso de metaheurísticas en un problema de ruteo con varios clientes permite generar soluciones de buena calidad en un buen tiempo computacional, como lo indican los autores en el artículo en el que trabajan con instancias de hasta 100 clientes. En el caso del proyecto en particular se toma la consideración de la matriz de costos en función de la velocidad con que se completa la ruta, así se permite tener en cuenta el costo tanto por distancia como por ocurrencia de congestión vehicular dependiente del horario en que se genere la ruta.

Tabla 1. Resumen Artículos

ARTICULO	MODELO	ALGORÍTMO	AUTORES	AÑO
Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris	Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)	Búsqueda tabú	Andrés Felipe Mediorreal Carrillo	2014
Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para el Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Entregas y Recogidas	Vehicle Routing Problem with Backhauling (VRPB)	Búsqueda tabú	Jhon Jairo Santa Chávez, César Augusto Peñuela Meneses, Mauricio Granada Echeverri.	2014
Disminución de contaminación en el problema de ruteo de vehículos	Vehicle Routing Problem with Backhauling and Time Windows (VRPBTW)	Scatter Search o Búsqueda Dispersa	Lorena Pradenas, Boris Oportus, Víctor Parada	2012

Continuación Tabla 1.

ARTICULO	MODELO	ALGORÍTMO	AUTORES	AÑO
Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado	Vehicle Routing Problem (VRP)	GA (Genetic Algorithm)	Fredy Alexander Guasmayan	2014
Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú.	Vehicle Routing Problem (VRP)	Búsqueda tabú	Angélica Sarmiento Lepesqueur	2014
Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases.	Vehicle Routing Problem (VRP)	Búsqueda tabú	Julio Mario Daza, Jairo R. Montoya Y Francesco Narducci	2009
The real-time time-dependent vehicle routing problem	Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)	Programación entera e Inserción de clientes	H.-K. Chen, C.-F. Hsueh, y M.-S. Chang	2006
Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system	Vehicle Routing Problem with Time Deadlines (VRPTD)	Algoritmo de colonia de hormigas	A. V. Donati, R. Montemanni, N. Casagrande, A. E. Rizzoli, y L. M. Gambardella	2008

Continuación Tabla 1.

ARTICULO	MODELO	ALGORÍTMO	AUTORES	AÑO
Modelo matemático para el análisis y mejoramiento de los métodos aproximados para la solución de los problemas de enrutamiento, asignación de horarios y distribución de cargas: una aplicación a la entrega de productos embotellados	RoSLoP (Routing-Scheduling-Loading Problem)	Solución de un problema de optimización con satisfacción de restricciones (CSP)	J. F. Delgado O.	2007
Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance	Vehicle Routing Problem with Time Deadlines (VRPTD)	Algoritmo modificado de Dijkstra (soluciones con el vecino más cercano)	A. L. Kok, E. W. Hans, and J. M. J. Schutten	2012
Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms	Vehicle Routing Problem with Time Deadlines (VRPTD)	Programación Lineal entera	C. Malandraki and M. Daskin	1992
Algoritmo híbrido basado en un método de aproximaciones sucesivas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneo	Vehicle Routing Problem (VRP)	Algoritmo de los ahorros y la simulación de Monte Carlo	Tatiana Quintero	2012

Continuación Tabla 1.

ARTICULO	MODELO	ALGORÍTMO	AUTORES	AÑO
Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems	VRP capacitados (CVRP), Open VRP (OVRP), asimétrica CVRP (ACVRP), VRP con recogida y entrega simultánea (VRPSPD), VRP con Pickup mixto y Entrega (VRPMPD), Multi-Depot Vehicle Routing Problem, con recogida y entrega Mixto (MDVRPMPD) y flota heterogénea VRP (HFVRP)	Algoritmo de Ramificación y planos de corte y método simplex	A. Subramanian	2012
The TimeDependent Pollution-Routing Problem	Vehicle Routing Problem with Time Deadlines (VRPTD)	Programación Lineal entera	A. Franceschetti, D. Honhon, T. Van Woensel, T. Bektas, y G. Laporte	2013
The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times The Time - Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times	Vehicle Routing Problem with Time Deadlines (VRPTD)	Búsqueda Tabú y Búsqueda en entorno variable	D. Tas, N. Dellaert, T. Van Woensel, and T. De Kok	2013

Continuación Tabla 1.

ARTICULO	MODELO	ALGORÍTMO	AUTORES	AÑO
Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique	Vehicle Routing Problem (VRP)	GA-PCP (Genetic Algorithm with Precedence Constraint Posting)	Marco Antonio Cruz Chávez y Ocotlán Díaz Parra	2008
Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)	HESECOR (heurística económica y secuencial de construcción de rutas)	Y. V. Piqueras	2002

CONCLUSIONES

El rezago logístico en el que se encuentra sumergido Colombia es una problemática latente que afecta de forma directa o indirecta todos los sectores económicos del país, generando poca competitividad y obligando al consumidor final a pagar, en última instancia, los altos costos logísticos de las empresas.

Mediante la recogida de mercancías en el trayecto de regreso, los costos logísticos de las empresas podrán disminuir y, en consecuencia, tener una mayor competitividad en el mercado; esto en conjunto con un plan estratégico que incluya la creación de puertos secos en nodos logísticos estratégicos del territorio nacional y una inversión que permita mejorar el transporte de carga y la infraestructura vial podría generar un curso logístico que permita un mejor desarrollo de la economía nacional.

En los artículos analizados en el proyecto, se pudo observar que el modelo más utilizado es el Vehicle Routing Problem (VRP), lo que plantea principalmente una mayoría de artículos de optimización combinatoria generalizada sin contemplar a profundidad un enfoque específico en el tiempo de entrega o en carga de compensación. De igual forma, se denotó que el algoritmo de solución más utilizado fue el de la búsqueda tabú, el cuál es un método metaheurístico de búsqueda local.

TRABAJOS FUTUROS

Dentro de un trabajo de investigación es de suma importancia identificar las líneas de trabajo para dar continuidad al esfuerzo invertido. La presente investigación se posiciona como precedente en cuanto al desarrollo de un modelo logístico a gran escala que permita implementar las mejoras logísticas recomendadas en el plano nacional tomando en cuenta la carga de compensación. Por esto, esta sección pretende sugerir distintas líneas de trabajo futuro, que es necesario realizar para seguir avanzando en el conocimiento de la logística colombiana y su continuo mejoramiento a través de un modelo VRP.

A continuación, se presentan algunas sugerencias para trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de esta investigación o que, por exceder el alcance de la misma, no han podido ser tratados con la suficiente profundidad:

- Incluir una mayor cantidad de artículos dentro de la revisión bibliográfica y realizar un estudio estadístico que permita conocer cuáles son los métodos más utilizados en la resolución de los problemas de ruteo de vehículos y sus distintas variantes.
- Realizar un modelo matemático con base en el transporte de mercancías a nivel nacional y aplicarlo en un modelo de ruteo de vehículos, tomando como nodos logísticos las principales ciudades del país y cuantificando el beneficio económico que la carga de compensación genera en el sector transportador de carga y su impacto en los costos logísticos nacionales.
- Ampliar y profundizar la información referente a los distintos modelos de ruteo de vehículos y de los algoritmos en los que estos se basan para encontrar una solución adecuada.

RECOMENDACIONES

Es importante mencionar que realizar una encuesta como herramienta para obtener información cuantificable con respecto al estado en el cuál se encuentra el sector logístico nacional, puede resultar en un esfuerzo de gran complejidad debido a la fragmentación del parque automotor. Cabe mencionar que para el presente proyecto, se intentó realizar una encuesta a los grandes transportadores de carga a nivel nacional, y no se obtuvo una respuesta favorable por parte de la población objetivo.

Para conocer más a fondo los distintos modelos de ruteo de vehículos, se recomienda considerar un cuadro comparativo entre ellos de manera que se puedan conocer las similitudes y diferencias significativas entre ellos y entre sus algoritmos de solución.

BIBLIOGRAFÍA

- BAE, S.-T. HWANG, H. S. CHO, G.-S. y GOAN, M.-J. "Integrated GA-VRP solver for multi-depot system," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 53, no. 2, pp. 233–240, Sep., 2007.
- BALDACCI, R., MINGOZZI, A., y GIORGI, S. Agosto de 1999. An Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. *Transportation Science*, 33(3), 315 - 329.
- BAZARAA, M. S., SHERALI, H. D., y SHETTY, C. M. (2006). *Nonlinear Programming*. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- CHEN. H.-K., HSUEH. C.-F., y CHANG. M.-S., "The real-time time-dependent vehicle routing problem," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 42, no. 5, pp. 383– 408, Sep., 2006.
- Consejo privado de competitividad. 6 de octubre del 2012. Informe nacional de competitividad 2012-2013. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.compite.com.co/site/wp-content/uploads/2012/10/6-Infraestructura-Transporte-y-Logistica.pdf>
- Consejo nacional de política económica y social. Documento conpes 3574, Política nacional logística. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://wsp.presidencia.gov.co/sneci/politica/Documents/Conpes-3547-27oct2008.pdf>
- CRUZ CHÁVEZ, Marco Antonio y DÍAZ PARRA, Ocotlán. Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique. Autonomous University of Morelos State. 2008.
- DAZA, Julio Mario, MONTOYA, Jairo Y NARDUCCI, Francesco. Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 23-38. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), Diciembre 2009.

- Departamento Administrativo Nacional De Estadística (DANE). Índice de Costos de Transporte de Carga por Carretera – ICTCIV Trimestre 2015.. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ictc/bol_ICTC_IV_2015.pdf
- DELGADO O. J. F., “Modelo matemático para el analisis y mejoramiento de los métodos aproximados para la solución de los problemas de enrutamiento, asignación de horarios y distribución de cargas: una aplicación a la entrega de productos embotellados,” Instituto tecnológico de CD. Madero, TAM. México, dic., 2007.
- Diario El Universal. 9 de octubre del 2011. Solo el 8,5% de la red vial en Colombia está pavimentada. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/nacional/solo-el-85-de-la-red-vial-en-colombia-esta-pavimentada-47681>
- Diario el país. 13 de septiembre de 2012. Transporte de carga dentro de Colombia es más costoso que exportar. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.elpais.com.co/elpais/valle/noticias/mover-carga-dentro-colombia-carro-exportarla>
- DONATI. V., MONTEMANNI. R., CASAGRANDE. N., RIZZOLI. A. E., y GAMBARDELLA. L. M., “Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system,” Eur. J. Oper. Res., vol. 185, no. 3, pp. 1174–1191, Mar., 2008.
- DUQUE ESCOBAR. Gonzalo. Septiembre de 2008. Problemática y posibilidades del sistema de transporte de carga en Colombia. Consultado el 09 de agosto del 2015. Disponible <http://www.bdigital.unal.edu.co/1673/1/gonzaloduqueescobar.20083.pdf>
- FRANCESCHETTI, HONHON. D., VAN WOENSEL. T., BEKTAS. T., y LAPORTE. G., “The TimeDependent Pollution-Routing Problem,” Beta Res. Sch. Oper. Manag. Logist., vol. 409, no. 804, pp. 1–52, Feb., 2013.
- GLOVER, F. (1989). Taboo Search - Part I. ORSA Journal on Computing, 1(3), 190-206.

- GUASMAYAN GUASMAYAN, Fredy Alexander. Solucion del problema de ruteo de vehiculos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado Trabajo de grado Maestría En Investigación Operativa y Estadística. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad De Ingeniería Industrial, 2014.
- KOK. L., HANS. E. W., y SCHUTTEN. J. M. J., “Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 5, pp. 910–918, May., 2012.
- MALANDRAKI y DASKIN. M., “Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms,” *Transp. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 185–200, Aug., 1992.
- MARTÍ, R., LAGUNA, M. (2003): “Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias Avanzadas”. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, España*.
- MEDIORREAL CARRILLO, Andrés Felipe. Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marlioü París. Trabajo de grado Ingeniero industrial. Bogotá DC. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería industrial, 2014.
- PIQUERAS. Y. V., “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW,” Ph.D. Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Valencia, May., 2002.
- PRADENAS, Lorena; OPORTUS, Boris y PARADA, Víctor. Disminucion de contaminación en el problema de ruteo de vehículos. Congreso Latino – Iberoamericano de Investigación Operativa.
- QUINTERO QUINTERO, Tatiana. Algoritmo híbrido basado en un método de aproximaciones sucesivas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneo. Trabajo de grado Maestría En Ciencias En Ingeniería De Sistemas. San Nicolás De Los Garza, Nuevo León. Facultad De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica. División De Estudios De Posgrado, 2012.
- SANTA CHÁVEZ, Jhon Jairo; PEÑUELA MENESES, César Augusto y GRANADA ECHEVERRI, Mauricio. Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para el Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Entregas y Recogidas.

- SARMIENTO LEPESQUEUR, Angélica. Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú. Trabajo de grado Maestría En Gerencia de Operaciones (Modalidad de Investigación). Chía. Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de La Sabana, 2014.
- SUBRAMANIAN. "Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems," Ph. D Thesis. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2012.
- TAS, DELLAERT. N., VAN WOENSEL. T., y DE KOK. T., "The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times The Time - Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times," vol. 413, no. March., 2013.