

**DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA
DIMENSIONAMIENTO DE CAPACIDADES DE FLOTAS DE TRANSPORTE
BASADA EN PROGRAMACIÓN DINÁMICA.**

FERNANDO ANDRES LANDAZURY LEMUS

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
NOVIEMBRE DE 2016**

**DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA
DIMENSIONAMIENTO DE CAPACIDADES DE FLOTAS DE TRANSPORTE
BASADA EN PROGRAMACIÓN DINÁMICA**

FERNANDO ANDRES LANDAZURY LEMUS

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Magíster en Ingeniería Industrial**

DIRECTOR:

ALCIDES RICARDO SANTANDER MERCADO

UNIVERSIDAD DEL NORTE

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

BARRANQUILLA

NOVIEMBRE DE 2016

TABLA DE CONTENIDOS

1. CAPITULO I. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	9
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.2. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.2.1. PROGRAMACIÓN DINÁMICA	11
1.2.2. PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO, MEZCLA Y RUTEO DE FLOTAS DE VEHÍCULOS (FSMVRP)	12
1.2.3. MÉTODOS DE SOLUCIÓN	14
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4. METODOLOGÍA	15
2. CAPÍTULO II. REVISIÓN LITERARIA	16
2.1. DEFINICIÓN Y ALCANCE DE LA REVISIÓN LITERARIA	16
2.2. ANALISIS DE LA LITERATURA	18
2.3. LITERATURA REPRESENTATIVA	21
3. CAPITULO III. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAPACIDADES DE FLOTA PARA EL PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO, MEZCLA Y RUTEO DE VEHÍCULOS. FSMVRP	24
3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	24
3.2. EL FSMVRP DINÁMICO MULTI OBJETIVO: PLANEACIÓN A LARGO PLAZO, DEMANDA BAJO ESTOCÁSTICA, ESTOCASTICIDAD EN CONDICIONES DE OPERACIÓN, MAXIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD Y MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS EXTERNOS GENERADOS POR LA FLOTA DE VEHÍCULOS	26
3.2.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL FSMVRP DINÁMICO MULTI OBJETIVO	27
3.2.2. METODOLOGIA PROPUESTA	33
3.2.3. ALGORITMO GENÉTICO	34
3.2.3.1. CODIFICACIÓN DEL CROMOSOMA	37
3.2.3.2. GENERACIÓN DE SOLUCIONES INICIALES	40
3.2.3.3. EVALUACIÓN DE LAS FUNCIONES OBJETIVO	40
3.2.3.4. SELECCIÓN DE SOLUCIONES PARA CRUZAMIENTO Y MUTACIÓN	41
3.2.3.5. CRUZAMIENTO Y MUTACIÓN	41

3.2.4.	ALGORITMO DE RUTEO PARA MÚLTIPLES VEHÍCULOS	42
3.2.5.	ALGORITMO DE SIMULACIÓN	46
4.	CAPITULO IV. PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SOLUCIÓN AL FSMVRP DINÁMICO MULTIOBJETIVO	50
4.1.	INSTRUCCIONES BÁSICAS DE EJECUCIÓN	50
4.2.	INSTRUCCIONES BÁSICAS DE USO	51
5.	CAPITULO V. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	58
5.1.	INSTANCIA DEL PROBLEMA	58
5.2.	EXPERIMENTACIÓN	60
5.2.1.	CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.	65
5.3.	RESULTADOS FINALES	71
6.	CAPITULO VI. ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN	80
6.1.	FASE DE IMPLEMENTACIÓN 1: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	80
6.2.	FASE DE IMPLEMENTACIÓN 2: MINERÍA DE DATOS Y MACHINE LEARNING	81
6.3.	FASE DE IMPLEMENTACIÓN 3: DESARROLLO Y DISEÑO DE SOFTWARE	81
6.4.	FASE DE IMPLEMENTACIÓN 4: VALIDACIÓN E IMPLEMENTACIÓN FINAL. 81	
7.	CONCLUSIONES	82
8.	REFERENCIAS	84
	ANEXOS	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos iniciales que abordaron el FSP y FCP.	17
Tabla 2 Factores de diseño para el experimento de calibración de parámetros de ejecución del algoritmo genético.	62
Tabla 3 Diseño de experimento para calibración de parámetros del algoritmo genético.	62
Tabla 4 Método del ascenso pronunciado para determinar parámetros del algoritmo	70
Tabla 5 Funciones Objetivo de las soluciones del frente de pareto	71
Tabla 6 Soluciones del frente de pareto decodificadas representando conformación de la flota a través del período de planeación.	72
Tabla 7 Características de diseño de las embarcaciones seleccionadas en cada solución	76
Tabla 8 Porcentaje promedio de utilización de los vehículos de la flota de transporte durante el período de planeación	77
Tabla 9 Comparativo entre métodos de solución	79
Tabla 10 Principales artículos del FSMVRP.....	96
Tabla 11 Artículos del FSMVRP de siglo XXI.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Período de planeación, sub-período de planeación y períodos de operación.....	27
Figura 2. Estructura general de la metodología de solución.	33
Figura 3. Estructura general de solución de los algoritmos genéticos	35
Figura 4. Algoritmo de ordenamiento de soluciones no dominadas.	36
Figura 5. Algoritmo NSGA-II.....	36
Figura 6. Descripción gráfica del problema de asignación como un problema de programación dinámica.	38
Figura 7. Ejemplo de representación del Cromosoma para $T=5$, $k=3$ y $Max_{Adq}=2$.	39
Figura 8. Ejemplo del procedimiento de cruzamiento para $T=5$, $k=3$ y $Max_{Adq}=2$.	41
Figura 9. Ejemplo del procedimiento de Mutación para $T=5$, $k=3$ y $Max_{Adq}=2$.	42
Figura 10. Representación del problema de ruteo mediante programación dinámica.	43
Figura 11. Algoritmo de ruteo basado en programación dinámica para múltiples vehículos.....	44
Figura 12. Figura que ilustra los elementos básicos del algoritmo de simulación.....	47
Figura 13. Seudocódigo del algoritmo de simulación utilizado en la metodología.....	48

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución de artículos consultados por fecha de publicación...	18
Gráfica 2. Distribución de artículos según objetivos abordados	20
Gráfica 3. Distribución de artículos según tipo de demanda abordada en el artículo.....	21
Gráfica 4 Gráfico de Pareto de los efectos para la variable de respuesta $\Delta\%$Utilidad.....	66
Gráfica 5 Grafico de Pareto de los efectos para la variable de respuesta $\Delta\%$Externalidades.....	67
Gráfica 6 Gráfica de efectos principales para la variable de respuesta $\Delta\%$Utilidad.....	68
Gráfica 7 Gráfica de interacción para la variable de respuesta $\Delta\%$Utilidad ...	68
Gráfica 8 Gráfica de efectos principales para la variable de respuesta $\Delta\%$Externalidades	69
Gráfica 9 Gráfica de interacción para la variable de respuesta $\Delta\%$Externalidades.....	69
Gráfica 10 Frente de pareto con parámetros del algoritmo genético calibrados.	71
Gráfica 11 Conformación de la flota de embarcaciones de la Solución 8 a lo largo del período del período de planeación.....	78
Gráfica 12 Gráfica de Residuo para %Utilidad	102
Gráfica 13 Grafica de residuos para %Externalidades	102

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Portada del prototipo de Software programado.....	50
Ilustración 2 Interfaz gráfica de usuario inicial del prototipo programado.....	51
Ilustración 3 Cargue de archivos externos - Excel	52
Ilustración 4 Interfaz de cargue de datos externos.....	53
Ilustración 5 Interfaz soluciones que conjuga la fase I y II de la metodología propuesta.....	54
Ilustración 6 Vista de la interfaz Soluciones luego de haber ejecutado el algoritmo de la fase I y II	55
Ilustración 7 Interfaz Simulation	56
Ilustración 8 Interfaz Simulation_2. Contiene las medidas de desempeño de la flota simulada.....	57

1. CAPITULO I. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Uno de los factores claves para el buen desempeño de las economías actuales es la efectividad de los sistemas de transporte los cuales en mayor o menor escala representan la transferencia física de los productos y/o servicios entre orígenes y destinos, constituyendo el mecanismo por el cual se reduce el desfase temporal y geográfico entre los puntos de oferta y demanda.

La planeación de las operaciones de los sistemas de transporte es de vital importancia debido a que representan un rubro importante en los costos logísticos de un país y a su vez por el impacto negativo que tiene sobre la sociedad a través de las externalidades del transporte. Un sistema de transporte eficiente y sostenible debe ir orientado a reducir los costos de operación y a disminuir el impacto externo sobre la sociedad.

El objetivo de este proyecto de investigación es el diseño de una metodología basada en programación dinámica para la planeación de la capacidad de flotas de transporte, que minimice los costos de transporte externos y maximice la utilidad percibida por las operaciones de la flota de transporte.

Este documento está organizado en cuatro capítulos; en el capítulo I se presentara una descripción del proyecto presentado que incluye el planteamiento del problema, el marco teórico, los objetivos y la metodología de la investigación; en el capítulo II presenta la revisión literaria y el análisis de la misma; posteriormente en el capítulo III se presenta la descripción, modelación del problema matemático y los modelos que soportan la metodología de solución y por último en el capítulo IV se presenta los resultados experimentales y la evaluación del desempeño de la metodología de solución.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dos elementos cruciales para que un sistema de transporte sea efectivo son la infraestructura y la flota de vehículos; el primer elemento está asociado a la accesibilidad y es común que sea financiada en mayor proporción por los gobiernos, mientras que el segundo elemento constituye un modelo de negocio que debe ser planeado y que su administración puede estimular o inhibir la economía de una región.

El desempeño logístico de nuestro país a nivel mundial es bajo, causado principalmente por la deficiente infraestructura para el transporte de carga. En el índice de desempeño logístico del año 2016 medido por el Banco Mundial, nuestro país se ubica en la posición número 94 (Ramirez, 2016), donde registra una caída de 30 posiciones con respecto a los resultados del año 2012 y una leve mejoría con respecto a los resultados del 2014. Así mismo, este organismo identifica los

principales componentes causantes del detrimento del indicador, como lo son la puntualidad, la infraestructura y calidad y las competencias logísticas.

Por otro lado los resultados de la Encuesta Nacional de Logística 2015 realizada a través de la perspectiva de los usuarios de servicios logísticos (USL) y la de los prestadores de servicios logísticos (PSL) identifican como barreras que afectan los procesos logísticos los altos costos del transporte, las insuficientes carreteras, puertos y aeropuertos, falta de zonas adecuadas para carga y descarga, falta de talento humano en logística, insuficiencia en zonas logísticas y la falta de sistemas de información logística (Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e innovación, 2015).

Este deficiente resultado orientó las políticas nacionales en materia de transporte al uso de múltiples modos de transporte, dando paso al multimodalismo para el transporte de carga (Departamento Nacional de Planeación, 2013). La infraestructura resultante de esta política, aún no es una realidad, sin embargo, antes de la materialización de esta política, la misma requiere de una planeación con un mayor grado de precisión y ajuste de elementos reales que permita al país mejorar su desempeño logístico y haga del transporte un sistema económicamente eficiente.

La planeación de sistemas de transporte bajo esta óptica debe describir una realidad dinámica, capturando dentro de la planeación la evolución de las operaciones de transporte a través del tiempo, permitiendo determinar el tamaño, composición y capacidad de las flotas de transporte que reduciendo los costos operación puedan satisfacer una demanda influenciada por escenarios de desarrollo económico y la realización de proyectos de infraestructura.

Por otro lado, la mayoría de los modos de transporte no solo impactan a la sociedad de una forma positiva sino que dan lugar a efectos secundarios. Por ejemplo, las carreteras contribuyen a la congestión, los trenes al ruido y los barcos a la polución del aire. En contraste a los beneficios, el costo de los efectos secundarios no es asumido directamente por los usuarios del modo de transporte, sin embargo, si tienen un efecto negativo directo sobre la vida de las poblaciones donde operan los mismos. Estos efectos son llamados, efectos externos y deben ser tomados en cuenta como elementos dentro de la planeación de los sistemas de transporte de modo que permitan disminuir el impacto social asociado a la composición, tamaño y capacidad de la flota de transporte.

Es entonces del anterior enfoque que surge la siguiente pregunta problema: ¿Cómo mediante modelos de gestión de transporte, modelación matemática y optimización se puede establecer una metodología que de soporte a la planeación a la capacidad de flotas de transporte, teniendo en cuenta demanda y tiempos de viaje

estocásticos, maximizando la utilidad percibida por concepto de las operaciones de transporte y minimizando los costos externos de la flota?

1.2. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

En general el problema planteado en este trabajo sobre de planeación de la capacidad de flota de transporte es abordado a partir de tres sub-problemas los cuales son: el problema de dimensionamiento de flota (Fleet Sizing Problem, FSP), el problema de composición de flota (Fleet Composition Problem, FCP) y el problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP).

El primer problema abordado fue el VRP por Dantzing y Bernard en 1959, este problema abarca de manera general los problemas de asignación de vehículos a rutas preestablecidas que atienden a nodos dentro de una red de transporte definida, permitiendo que las variantes de este problema sean amplias (Hoff, A. et al. 2010). El FSP abordado por primera vez por Kirby en 1959, consiste en calcular el número de vehículos que deben pertenecer a una flota homogénea y que deberán satisfacer una red nodos de orígenes y destinos con demandas asociadas (Hoff, A. et al. 2010). El FCP por otro lado fue inicialmente abordado por Gould en 1969, este problema determina cuales vehículos conformarán la flota de vehículos, teniendo en cuenta la existencia de diferentes tipos de vehículos diferenciados por características como capacidad, velocidad, consumo, impacto medioambiental, etc. (Etezadi & Beasley, 1983).

En la literatura es común encontrar en la literatura solución simultánea al FSP, al FCP y VRP bajo una categoría especial de problemas conocido como el problema de dimensionamiento, mezcla y ruteo de flotas de transporte (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, FSMVRP) el cual fue abordado por primera vez por Gould et al. en 1984 (Hoff, A. et al. 2010) e incluye los costos de adquisición de vehículos para soportar la decisión de qué tipo de vehículos y en qué cantidad adquirir.

Se presenta a continuación el problema en el que se enmarca la investigación junto con las herramientas abordadas para su solución.

1.2.1. PROGRAMACIÓN DINÁMICA.

La programación dinámica es una herramienta matemática de optimización en el campo de la Investigación de operaciones para la toma de decisiones secuenciales e interrelacionadas; esta consiste en la descomposición del problema en etapas y en cada etapa se busca maximizar o minimizar una función objetivo que depende del cambio en las variables de estado del sistema por cada etapa durante el horizonte de la planeación o número total de etapas. Una de las características principales de la programación dinámica como herramienta es la capacidad de formular una política de solución óptima la cual consiste en una hoja de ruta de las

posibles decisiones a tomar en una etapa. Esta herramienta no contiene una estructura universal de solución sino un algoritmo que es modificado dependiendo a la forma como se plantea el problema a resolver y de manera especial ofrece una solución exacta a los problemas si y solo si el problema planteado cumple el principio de optimalidad (Bertsekas, 1995). Desde su formulación la programación dinámica ha sido implementada con éxito en la solución de problemas de la investigación de operaciones como (Hillier et al., 1989):

- Planes de reparación de maquinaria.
- Problemas de transporte y asignación.
- Diseño de modelos de inventario de revisión periódica.
- Calculo de fuerza de trabajo.

1.2.2. PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO, MEZCLA Y RUTEO DE FLOTAS DE VEHÍCULOS (FSMVRP).

En general cualquier empresa dedicada al transporte en el marco de la planeación estratégica de las operaciones de la compañía persigue el diseño o adquisición de una flota óptima de vehículos de transporte. El diseño óptimo de una flota de transporte incluye decisiones acerca del tipo de vehículo que debe ser incluido en la flota y el tamaño de la flota en términos de la cantidad de vehículos de cada tipo que deben ser adquiridos (Christiansen, Fagerholt, Nygreen, & Ronen, 2007). No obstante, la selección de una flota óptima de vehículos de transporte debe estar soportada en la planeación de las operaciones de la flota y las necesidades demandadas por los clientes. Es así como tomar una decisión sobre la flota de vehículos óptima involucra la decisión de que rutas deben ser atendidas por un tipo de vehículo incluido en la flota.

Existen muchas variantes de este tipo específico de problema y la complejidad de los modelos propuestos depende de las siguientes características y consideraciones:

- **Horizonte de planeación:** La alta inversión en activos necesaria para adquirir una flota de transporte, puede conllevar a que la decisión que deba tomarse tenga en cuenta el dinamismo del tiempo de las operaciones. Es decir, tomar la decisión de adquirir una flota de transporte que se mantenga óptima con respecto a lo que pueda suceder en un horizonte de planeación de largo plazo. Algunas variaciones que tienen en cuenta este elemento incluyen planes de compra, reparación y reemplazo de vehículos.
- **Composición de la flota:** La flota de vehículos puede ser homogénea o heterogénea. Una flota de vehículos homogénea, indica que de una selección de posibles vehículos, la flota final deberá estar compuesta por un

número de vehículos de un solo tipo seleccionado. Una flota heterogénea es una flota de vehículos compuesta por diferentes tipos de vehículos en diferentes cantidades.

- **Modo de transporte:** El modo de transporte hace referencia al modo en el que será transportada la demanda, sea terrestre, marítimo o aéreo.
- **Tipos de servicios:** El tipo de servicio prestado por la compañía influye directamente en la solución del problema de ruteo. Los servicios más comunes identificados son los servicios de itinerario, es decir, un vehículo con una capacidad conocida debe salir con un itinerario y recorrer la misma ruta. Otro servicio son los servicios especiales o contractuales, los cuales se asemejan más al servicio prestado por taxis, donde un cliente necesita transportarse de un destino a un origen en particular cuando lo requiera. Por último, otro tipo de servicio mezcla los dos mencionados anteriormente.
- **Tipo de carga transportada:** Aunque existen diferentes tipos de carga transportada, se pueden resumir en carga contenedorizada o carga unitarizada, carga a granel y transporte de pasajeros.
- **Demanda:** Se considera una demanda estática cuando esta se mantiene con respecto al tiempo. Se considera que la demanda es dinámica cuando se tiene en cuenta la variación de la demanda con respecto al tiempo.

Algunas de las variantes del FSMVRP son las siguientes:

- El problema de dimensionamiento, mezcla y ruteo de flota de vehículos por arco capacitados. Este problema abordado por Ulusoy (Ulusoy, 1985) se aborda el problema de dimensionamiento, mezcla y ruteo de vehículos que deben visitar todos los arcos que componen la red, en al menos una ocasión.
- El problema de dimensionamiento en optimización de redes. Esta variante del problema definida por Bookbinder et al. (Bookbinder & Reece, 1988) asigna la locación de plantas o almacenes que minimicen los costos asociados a transportar a través de la flota la mercancía a los clientes finales.
- El problema de dimensionamiento, mezcla y ruteo de flota de vehículos con ventanas de tiempo. Esta variación del problema fue abordada por primera vez por Liu et al. (Liu & Shen, 1999) y en esta se mantienen en cuenta que los clientes deben ser atendidos durante un límite de tiempo, a ese límite se le conoce ventana de tiempo. De no ser atendidos, no podrán atenderse.
- Problema de ruteo de vehículos heterogénea fija. Inicialmente abordada por Taillard (Taillard, 1999) se propone una variante del FSMVRP donde una flota heterogénea fija que debe asignarse a rutas establecidas con el objetivo de minimizar los costos operativos y de adquisición de la flota.

1.2.3. MÉTODOS DE SOLUCIÓN

En general si bien existen herramientas de solución exacta para el problema presentado como lo es la programación lineal, la programación lineal entera e incluso la programación dinámica, el uso de estas herramientas para instancias incluso pequeñas del problema conlleva a que el óptimo sea alcanzado en un tiempo de solución enorme como resultado de la vocación combinatoria del problema en mención.

Es por esta razón que la mayoría de investigaciones de los últimos años se centran en sacrificar del óptimo global con el fin de balancear la obtención de buenas soluciones en un tiempo de solución racional. A estos métodos de solución se le llaman métodos de solución aproximados y hacen parte de este conjunto los métodos heurísticos y las Metaheurísticas. La diferencia principal entre ambos métodos de solución se centra en el uso de reglas determinísticas o probabilísticas para la consecución de las soluciones.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y validar una metodología para la planeación del dimensionamiento de capacidades de flotas de transporte basada en programación dinámica que maximice la utilidad por concepto de la operación de la flota y minimice los costos de transporte externo.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los métodos actuales de dimensionamiento de flota identificando el aporte al conocimiento generado con la metodología propuesta en comparación con las metodologías actuales.
- Diseñar una función que permita calcular los costos sociales y de operación de flotas.
- Desarrollar un modelo de optimización basado en programación dinámica que de soporte a la planeación del dimensionamiento de flotas de transporte.
- Construir un modelo de simulación que incluya elementos estocásticos inherentes a la de operación de la flota en la planeación.
- Validar la metodología propuesta en función del tiempo de ejecución y soluciones propuestas en modelos existentes para flota de embarcaciones fluviales portacontenedores.

1.4. METODOLOGÍA

El objetivo de esta investigación es el diseño de una metodología para la planeación del dimensionamiento de capacidades de flotas de transporte que minimice los costos de transporte externo y maximice la utilidad como respuesta al problema de ruteo, mezcla y dimensionamiento de flotas de vehículos, que puede tener impacto sobre los indicadores de costos logísticos del país. El problema es abordado usando técnicas de la investigación de operaciones como la programación dinámica y métodos artificiales inteligentes (Metaheurísticas) para el diseño de un algoritmo que aborde el FSMVRP como un problema de optimización combinatoria.

El proyecto fue desarrollado en cuatro fases:

- FASE I: Revisión de fuentes primarias y secundarias para la definición de la estrategia de cálculo de las métricas para los objetivos relacionados y la caracterización de los métodos actuales de dimensionamiento de flotas de transporte. Durante esta fase se realizó un levantamiento de información para la definición de las métricas de medición de los costos externos y la utilidad asociados al dimensionamiento de la capacidad de la flota de transporte, así como la diferenciación con respecto a otros trabajos hasta el año 2016.
- FASE II: Desarrollo del modelo de optimización basado en programación dinámica. Durante esta fase se modeló matemáticamente con base en programación dinámica el problema con las métricas definidas en la fase I y posteriormente se construyó el algoritmo de solución en forma de herramienta computacional que soporte la planeación de flotas de transporte.
- FASE III: Construcción del modelo de simulación. En esta fase se construyó el modelo de simulación que tendrá por objetivo la inclusión de elementos estocásticos en las operaciones de las flotas de transportes con el fin de evaluar el comportamiento de la solución propuesta por el modelo de optimización bajo escenarios de operación.
- FASE IV: Validación de la metodología. Por último se validó la metodología de solución propuesta a la planeación de la capacidad de flotas de transporte a partir de la comparación con casos empresariales publicados y resueltos, así como pruebas computacionales de rigor a las herramientas.

2. CAPÍTULO II. REVISIÓN LITERARIA.

En este capítulo se presenta la revisión de la literatura sobre los trabajos que han abordado el problema de dimensionamiento de flota (Fleet Sizing Problem, FSP), el problema de composición de flota (Fleet Composition Problem, FCP) y el problema de dimensionamiento, mezcla y ruteo de flotas de transporte (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, FSMVRP). Esta revisión se encuentra estructurada de la siguiente manera: definición y alcance de la revisión literaria y un análisis de la literatura revisada.

2.1. DEFINICIÓN Y ALCANCE DE LA REVISIÓN LITERARIA

Múltiples son las revisiones literarias que se han realizado sobre el FSP, FCP y el FSMVRP, algunas de las más representativas que hacen especial mención del FSMVRP son las realizadas por los autores Salhi & Rand, 1993, Christiansen, Fagerholt, & Ronen, 2004, Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008, Hoff, Andersson, Christiansen, Hasle, & Løkketangen, 2010, Soonpracha, Mungwattana, Janssens, & Manisri, 2014, Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam, 2014 y Caceres-Cruz, Arias, Guimarans, Riera, & Juan, 2015. Cada una de estas revisiones literarias sintetiza los diferentes trabajos realizados en torno a la solución del FSMVRP e incluyen aspectos esenciales como la adición de objetivos de minimización del impacto medio ambiental o la maximización de criterios de servicio.

El primer trabajo que se ha realizado propiamente abordando el FSP es el realizado por Dantzig & Fulkerson, 1954, el cual si bien no otorga el nombre de problema de dimensionamiento de flota, su investigación esta direccionada a estimar el tamaño de una flota óptima para un itinerario de rutas establecido. El primer autor que trata de clasificar esta nueva serie de problemas es Kirby, 1959 el cual propone un método exacto que calcule el tamaño de una flota de vagones de tren. De manera posterior a los dos trabajos mencionados surgieron múltiples trabajos que empiezan a darle forma al FSP, a través de la integración junto al FCP. La **Tabla 1** resume los trabajos inicialmente abordados y que dan lugar al FSP y FCP.

Una vez son abordados el FSP y el FCP, los primeros autores que abordan el FSMVRP son Golden, Assad, Levy, & Gheysens, 1984 definiendo el problema como una combinación del FSP, FCP y VRP. Así mismo, los autores presentan una formulación del problema donde el costo unitario de funcionamiento de un vehículo es el mismo para todos los tipos de vehículos y proponen como método de solución una heurística. Otro trabajo elaborado el mismo año y que se apoya en la publicación de Golden es el trabajo presentado por Gheysens, Golden, & Assad, 1984, el cual recopila múltiples heurísticas existentes para abordar el problema planteado por Golden.

Tabla 1. Trabajos iniciales que abordaron el FSP y FCP.

Autores	Año	Problema		Función Objetivo				Método de Solución						
		FSP	FCP	MC ¹	MU ²	MS ³	MNV ⁴	S ⁵	PD ⁶	MILP ⁷	LP ⁸	OC ⁹	QT ¹⁰	IP ¹¹
Dantzig & Fulkerson	1954	X					X							X
Kirby	1959	X										X		
Wyatt	1961	X		X								X		
Gould	1969	X	X	X							X			
Nicholson & Pullen	1971	X			X				X					
Mole	1975	X		X					X					
Parikh	1977	X				X							X	
Williams & Fowler	1980	X		X				X						
Avramovich, Cook, Langston, & Sutherland	1982	X			X						X			
Etezadi & Beasley	1983		X	X						X				

Fuente: Elaboración Propia. Nota.¹MC: Minimización de Costos, ²MU: Maximización de Utilidades, ³MS: Maximización del Servicio, ⁴MNV: Minimización del número de Vehículos, ⁵S: Simulación, ⁶DP: Programación Dinámica, ⁷MILP: Programación Mixta Lineal Entera, ⁸LP: Programación Lineal, ⁹OC: Optimización Clásica, ¹⁰QT: Teoría de Filas, ¹¹IP: Programación Entera.

La mayoría de trabajos consultados en esta revisión de la literatura corresponden a artículos científicos extraídos de las bases de datos de libros que cubren la mayor cantidad de editoriales, artículos de conferencia, libros y revistas especializadas en el problema de investigación abordado; algunos de estos son: *Computers & Operation Research*, *OR Spectrum*, *European Journal of Operation Research*, *Netflow at Pisa*, *Omega*, *Transportations planning and Technology*, *Operations Research*, *Moderns heuristic search methods*, *Parallel and Distributed Processing*,

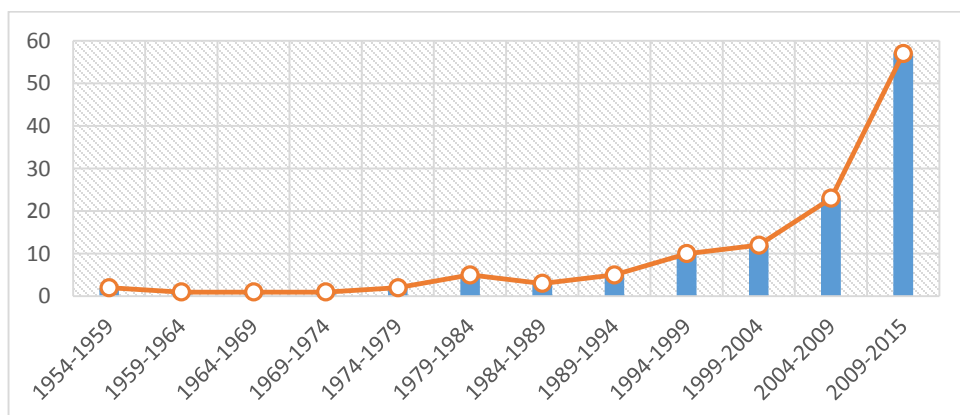
Genetic Programming, Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle, Transactions in Operations Research, Essays and Surveys in Metaheuristics, Journal of the Operation Research Society, Transportation Science, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Electronic Notes in Discrete Mathematics, Mathematical Programming, Experimental Algorithms, The Vehicle Routing Problem: Latest advances and new Challenges, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation, Networks, entre otros.

En total se recopilaron 122 artículos que fueron publicados entre el año 1954 y 2015 los cuales fueron seleccionados por el nivel de relevancia para esta investigación, en la búsqueda se usaron como palabras claves Fleet Sizing Problem, Fleet Composition Problem y Fleet Sizing and Mix Vehicle Routing Problem. Las 122 fuentes consultadas se pueden ver en detalle en la **Tabla 10** y **Tabla 11** de la sección de anexos de este documento; las tablas resumen la información relacionada con los autores, fecha de publicación, objetivos abordados y métodos de solución.

2.2. ANALISIS DE LA LITERATURA

Como se muestra en la **Gráfica 1** desde el año 1954 cuando surgió el primer artículo para el problema del FSP y en especial a partir de 1984 cuando surge de manera propia el FSMVRP se ha marcado una tendencia de incremento en el número de publicaciones donde se abordan los problemas abordados en esta investigación. Es como también de la misma gráfica se puede concluir que solo en lo que va de este siglo se han desarrollado más del doble de publicaciones que las realizadas el siglo pasado y esta conclusión encuentra especial sentido debido a la dificultad del problema para instancias pequeñas, lo que ha demandado una mayor cantidad de recursos computacionales para resolverse.

Gráfica 1. Distribución de artículos consultados por fecha de publicación.



Fuente: Elaboración Propia.

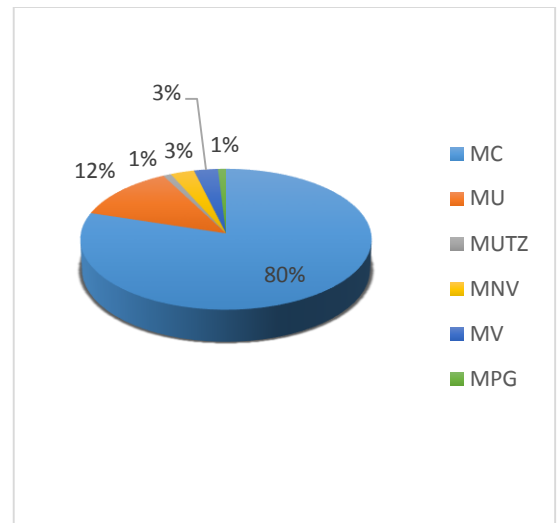
Del total de los 122 artículos tomados en consideración en esta revisión literaria presentada en este capítulo, cerca del 85% considera un solo objetivo de optimización, el 9% considera dos o más objetivos y el 6% restante de los artículos son de revisión de la literatura tal y como se muestra en la **Gráfica 2 (a)**. Del 85% de los artículos que consideran un solo objetivo cerca del 80% persigue el objetivo de minimización de costos, el 12% maximización de la utilidad, el 3% la maximización en el nivel de servicio, el 3% la minimización en el número de vehículos, el 1% la maximización de la utilización de los vehículos de la flota y el 1% restante la maximización de la probabilidad de ganar la campaña según es mostrado en la **Gráfica 2 (b)**. De manera análoga del 9% que aborda el problema multiobjetivo el 28% abordan el problema de minimización de costos y minimización del tiempo de respuesta, el 27% abordan la minimización de costos y maximización del nivel de servicio, el 27% abordan la minimización de costos y minimización del impacto medioambiental, el 9% abordan la minimización de costos y la maximización en la utilidad de la flota y el 9% restante abordan la maximización de la utilidad y la minimización del impacto medioambiental como es mostrado en la **Gráfica 2 (c)**.

De este análisis en específico se puede identificar un gap entre el problema a abordar en esta investigación y los trabajos realizados donde tan solo se aborda el problema multiobjetivo de maximización de la utilidad y la minimización del impacto medioambiental como un 1% de los artículos recopilados en la revisión literaria, permitiendo que sea uno de los elementos en los que próximas investigaciones como la presentada puedan profundizar.

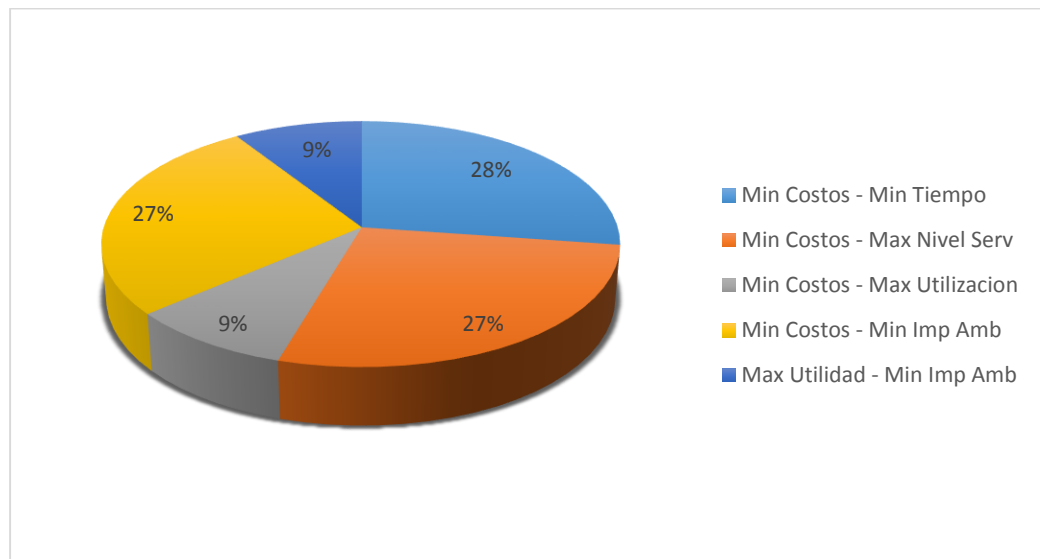
Gráfica 2. Distribución de artículos según objetivos abordados



(a)



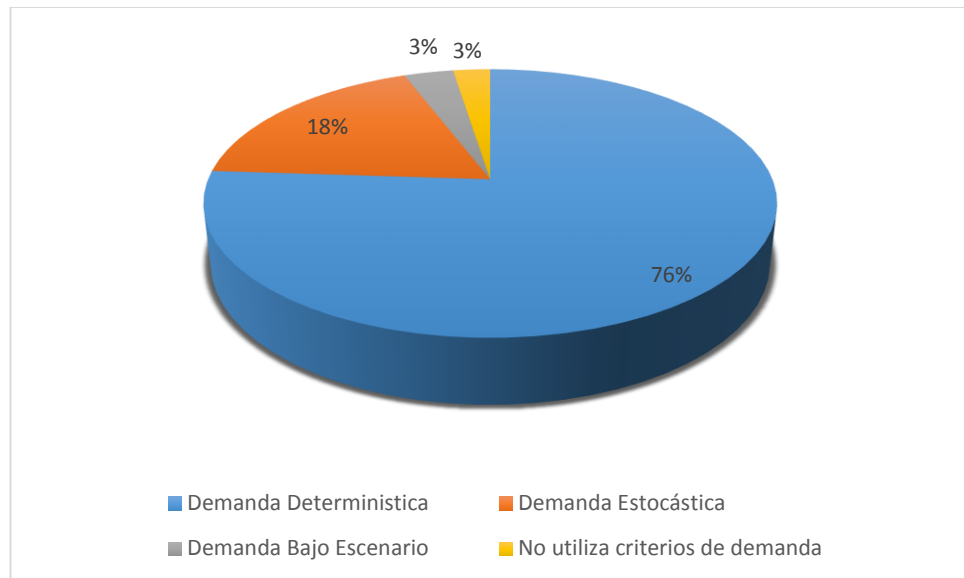
(b)



(c)

Fuente: Elaboración Propia. MC: Minimización del costo, MU: Maximización de la Utilidad, MUTZ: Maximización de la Utilidad del vehículo, MNV: Maximización del Nivel de Servicio, MV: Minimización del número de vehículos, MPG: Maximización de la probabilidad de ganar la campaña.

Gráfica 3. Distribución de artículos según tipo de demanda abordada en el artículo.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, otro de los elementos diferenciales de esta investigación es el tratamiento de la demanda donde cerca del 18% de las investigaciones según la **Gráfica 3** dan tratamiento estocástico a la demanda. De manera adicional, solo el 2% de artículos en la revisión cubren características similares del problema abordado en esta investigación como los son la demanda con comportamiento estocástico, planeación a largo plazo, flota heterogénea y tiempos de viaje estocásticos y solo el 12% del total de los trabajos consultados abordan la solución mediante algoritmos genéticos o programación dinámica, no perteneciendo a este grupo de investigaciones ninguno de los trabajos incluidos en el grupo del 2% de los trabajos anteriormente mencionados.

2.3. LITERATURA REPRESENTATIVA

De las 122 fuentes consultadas 7 artículos de manera especial presentaron modificaciones al problema del FSMVRP y fueron resueltos por aproximaciones a la programación dinámica. Estos artículos de manera directa motivaron la presente investigación y sirvieron de soporte para la construcción de la solución planteada en este documento.

El trabajo de Nicholson y Pullen (1971) fue el trabajo pionero en desarrollar un algoritmo de programación dinámica para el problema de administración de flotas de manera que se pueda determinar una política óptima de reemplazo y compra de vehículos.

Topaloglu (2006) soluciona el problema de la administración de flota (Fleet Management) el cual si bien no esta manera directa relacionado con el FSP o el FSMVRP aborda elementos operacionales de una flota de transporte como lo son el flujo de tráfico y en este trabajo de manera especial se abordan los tiempos de viajes de cada vehículo perteneciente a la flota como tiempos de viaje aleatorios. El autor resuelve este problema introduciendo elementos estocásticos que modelen el tiempo de viaje de los vehículos dentro de la formulación en etapas del problema a través de programación dinámica.

Por otro lado el trabajo Zhang et al. (2007) analiza el FSMVRP a través de la modelación de una flota de vehículos de tamaño dinámico, asumiendo en el análisis del problema que este debe solucionarse teniendo en cuenta múltiples periodos de planeación y que los vehículos de la flota tienen deben realizar viajes que cumplan con la solución de un VRP estático. La solución proporcionada por los autores deriva en un algoritmo exacto basado en el método simplex, programación dinámica y el método Branch and Cut.

De manera alterna Song et al. (2008) consideran el problema de reposición de vehículos vacíos y de dimensionamiento de flotas para una instancia de este problema con dos sistemas almacenes como sistema de servicio. El objetivo principal del modelo propuesto es minimizar los costos incurridos por mantenimiento del vehículo, reposición de vehículos vacíos y leasing de vehículos. La solución construida por los autores incluye programación dinámica para la construcción de una política óptima de reposición de vehículos vacíos y elementos estocásticos para modelar la incertidumbre en los tiempos de viajes y los tiempos de duración en almacenamiento.

Xinlien y Tengfei (2010) abordan el problema de planeación dinámica de flota a través del diseño de un algoritmo exacto que involucra programación lineal y programación dinámica. La solución óptima aborda decisiones sobre el número de vehículos en la flota que deberán ser vendidos y cuales vehículos deberán ser adquiridos para pertenecer a la flota.

Meng y Wang (2011) proponen un algoritmo más realista para solucionar el problema de planeación de flotas de transporte para una compañía de embarcaciones con viajes itinerantes, donde se plantean escenarios de operación diferentes a los que puede estar sometida las embarcaciones. Cada período de planeación o etapa dentro del problema general modelado a través de programación dinámica es resuelto como un problema de programación lineal.

Khoo y Teoh (2014) es uno de los primeros y pocos autores en la actualidad en abordar el problema de planeación de flotas específicamente de aviones por medio de dos objetivos: Maximización de la utilidad y minimización del índice de flotas

verdes. Los autores abordan la solución a través del uso de un algoritmo de programación dinámica.

En general cada una de estas investigaciones resuelve el FSMVRP tomando como punto de partida las características esenciales del problema propuesto, sin embargo se identifican brechas en los siguientes aspectos:

- La solución del FSMVRP no ha teniendo en cuenta estocasticidad en elementos inherentes a la operación.
- La solución del problema no se ha enfocado a la optimización de múltiples objetivos (maximización de utilidad y minimización del impacto social).
- La inclusión de la demanda estocástica no se incluye en la mayoría de las investigaciones.

Estos elementos se abordarán en la investigación permitiendo realizar un aporte a la literatura del tema.

3. CAPITULO III. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAPACIDADES DE FLOTA PARA EL PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO, MEZCLA Y RUTEO DE VEHÍCULOS. FSMVRP.

Se presenta en este capítulo la metodología de solución al FSMVRP. Este capítulo incluye en la sección 3.1 la formulación matemática general del problema mediante programación lineal, en la sección 3.2 la formulación matemática específica del problema a abordar mediante programación dinámica y por último en la sección 3.3 la metodología de solución diseñada.

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Como se ha realizado mención el FSMVRP es una extensión del problema clásico del VRP aplicado a una flota heterogénea de vehículos y con una modificación en la función objetivo que incluye el costo de adquisición de los vehículos y/o el costo de depreciación de los mismos. Formalmente, el FSMVRP es definido por Gheysens, 1984, como una modificación del presentado por Golden, 1984, de la siguiente manera:

Sea $G = (N, A)$ un grafo dirigido donde $N = \{0\} \cup \{1, \dots, n\} \cup \{n+1\}$ representa el set de nodos, siendo que $j = \{0, n+1\}$ representan el depósito y $C = \{1, \dots, n\}$, $j \in C$ define el set de clientes, cada uno con demanda $q_j > 0$. A , representa el set de arcos $A \subseteq N \times N$ los cuales a su vez representan las posibilidades de viajes entre nodos, donde $(i, i), (i, 0), (n+1, 1); i \in N$ son excluidos. El peso de cada arco $c_{ij} > 0$ corresponde a los costos operativos de viajar del nodo i al nodo j y se define $V = \{1, \dots, K\}$ como el set del tipo de vehículos disponibles para satisfacer la demanda q_j .

El problema consiste en seleccionar un sub-set de vehículos de los posibles tipos contenidos en V y las posibles rutas de cada vehículo del sub-set de manera que:

- i. Cada uno de los clientes es visitado al menos en una ocasión.
- ii. La demanda es satisfecha para todos los clientes.
- iii. Los costos totales de operación y adquisición sea minimizado.

Desde el punto de vista de la complejidad matemática el FSMVRP por ser una extensión del VRP clásico es clasificado como un problema NP-hard, implicando que problemas de dimensiones reales puedan ser solamente resueltos eficientemente mediante algoritmos heurísticos (Dullaert, Janssens, Sörensen, & Vernimmen, 2002).

Se presenta a continuación la formulación matemática presentada por (Golden et al., 1984):

Sea,

n = Número de clientes,

K = Número de tipos de vehículos,

Q_k = Capacidad del vehículo del tipo k ($Q_1 < Q_2 < \dots < Q_k$),

f_k = Costo de adquisición del vehículo de tipo k ($f_1 < f_2 < \dots < f_k$),

q_j = Demanda del cliente $j = 1, \dots, n$,

c_{ij} = Costo de viajar del nodo i al nodo j ,

y_{ij} = Flujo de carga del cliente i al cliente j ,

$x_{ij}^k = 1$ si el vehículo del tipo k viaja del nodo i al nodo j , 0 en otro caso.

$$\text{Minimize } \sum_{k \in V} \sum_{j \in N} f_k x_{0j}^k + \sum_{k \in V} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in V, \forall j \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ij} - \sum_{i \in N} y_{ji} = q_j, \quad \forall j \in C \quad (4)$$

$$y_{0j} \leq \sum_{k \in V} Q_k x_{0j}^k, \quad \forall j \in C \quad (5)$$

$$y_{ij} \leq \sum_{k \in V} M_{ijk} x_{ij}^k, \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

$$y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A \quad (7)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in V, \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

La ecuación (1) corresponde a la función objetivo la cual representa la suma de dos costos, la primera expresión de la función representa el costo de adquisición de los vehículos incluidos a la flota y la segunda expresión representa los costos totales de operación a partir del ruteo de cada vehículo.

La ecuación (2) restringe que cada cliente $j = 1, \dots, n$, sea visitado una sola vez.

La ecuación (3) asegura que un vehículo de un mismo tipo una vez llegue a un destino se vea obligado a dejarlo ocasionando que haya una relación de conexión entre las variables de ruteo x_{ij}^k para cada vehículo k candidato posible de la flota.

La ecuación (4) describe el flujo del movimiento de carga entre los nodos a través de la variable y_{ij} , asumiendo que solo podrá ser disminuido el total de carga transportada en cantidades iguales a la demanda q_j de cada nodo.

La ecuación (5) restringe que la carga llevada por cualquier vehículo k no exceda su capacidad Q_k .

La ecuación (6) conecta la cantidad de carga transportada y_{ij} junto con los viajes realizados por los vehículos x_{ij}^k , impidiendo de esta manera que haya transferencia de carga entre nodos si al menos un vehículo no ha sido asignado a realizar el viaje entre los nodos donde hay transferencia de carga.

La ecuación (7) asegura que no haya un flujo de carga transportada negativa para todos los nodos.

La ecuación (8) define la naturaleza binaria de la variable x_{ij}^k donde cada arco en la red tiene valor de 1 si es usado y 0 sino es usado por un vehículo del tipo k .

3.2. EL FSMVRP DINÁMICO MULTI OBJETIVO: PLANEACIÓN A LARGO PLAZO, DEMANDA BAJO ESTOCÁSTICA, ESTOCASTICIDAD EN CONDICIONES DE OPERACIÓN, MAXIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD Y MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS EXTERNOS GENERADOS POR LA FLOTA DE VEHÍCULOS.

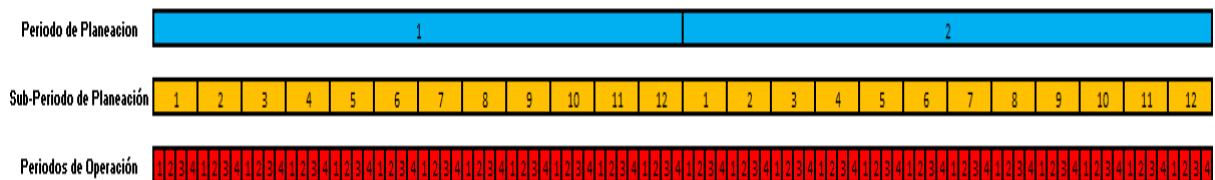
De acuerdo al problema planteado en el capítulo I y el análisis de la literatura presentada en el capítulo II, resolver el FSMVRP teniendo en cuenta como objetivo la minimización de los costos o maximización de la utilidad, limita la solución propuesta y no toma en cuenta varios elementos reales necesarios en la planeación de la capacidad de una flota de vehículos eficiente. Por tal motivo este trabajo de investigación integra múltiples elementos dentro de la planeación, como lo es la inclusión de un horizonte de planeación para la operación de la flota, demanda de transporte de carga bajo escenarios, estocasticidad en el tiempo de transporte por condiciones de operación y la adición de un objetivo que reduzca el impacto social del medio de transporte: Los costos externos generados por la flota.

Para abordar este problema se ha diseñado una metodología de solución la cual combina el uso de programación dinámica, la Metaheurística algoritmos genéticos y simulación, soportadas en una herramienta para la toma de decisiones.

3.2.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL FSMVRP DINÁMICO MULTIOBJETIVO.

Se presenta a continuación una formulación del problema del FSMVRP dinámico multiobjetivo como un problema de programación dinámica. La formulación presentada divide en tres secciones la dimensión de tiempo del horizonte de planeación: período de planeación, sub-período de planeación y períodos de operación. Un período de planeación está compuesto por sub-períodos de planeación, los cuales a su vez están compuestos por períodos de operación, tal y como se muestra en la **Figura 1**. Esta división se realiza con el fin de incluir elementos de estacionalidad que afectan las operaciones de la flota dentro de la formulación.

Figura 1. Período de planeación, sub-período de planeación y períodos de operación.



Fuente: Elaboración Propia.

Sets

$t = \{1, \dots, T\}$ Set de períodos de planeación,

$t' = \{1, \dots, T'\}$ Set de sub-períodos de planeación,

$t'' = \{1, \dots, T''\}$ Set de períodos de operación en un sub-período de planeación,

$N = \{1, \dots, n\}$ Set de nodos en la red a visitar,

$K = \{1, \dots, k\}$ Set de tipo de vehículos,

$l_t^K = \{0, \dots, x_t^K\}$ Set de vehículos seleccionados hasta el período de planeación t de cada tipo de vehículo K ,

$p = \{1, \dots, C\}$ Set de contaminantes,

Parámetros

T = Número de períodos de planeación,

T' = Número de sub-períodos de planeación en un período de planeación,

T'' = Número de períodos de operación dentro de un sub-período de planeación,

n = Número de nodos en la red,

k = Número de tipos de vehículos,

C = Número de contaminantes a evaluar,

Max_{Adq} = Máximo número de vehículos a adquirir por cada período de planeación,

d_{ij} = Distancia entre el nodo i y el nodo j , donde $i = j = N$,

Q_K = Capacidad del vehículo del tipo K ,

c_t^K = Costo por unidad de distancia recorrida en el periodo de planeación t para el vehículo K ,

$C_{adq(K)}$ = Costo de adquirir un vehículo del tipo K ,

P_t^K = Precio o flete incurrido al transportar una unidad de carga, por unidad de distancia, durante el período t de planeación, en el tipo de vehículo K ,

EF_p^K = Factor de emisión del gas p en unidades de masa, por unidades de distancia, por tipo de vehículo K ,

γ_p = Costo monetario por unidades de masa del gas p emitido,

a = Disposición a pagar por parte de los usuarios involucrados en el accidente,

b = Disposición a pagar a familiares y amigos del afectado en el accidente,

c = Costos pagados por el sistema de seguridad social,

r = Riesgo de accidente,

θ = Costo proporcional al total de accidentes,

F = Flujo de tráfico en la vía,

L = Longitud de la vía donde se llevan a cabo las operaciones del vehículo,

M = Número de carriles

Variables

$D_{ijt'}$ = Variable aleatoria que representa la demanda de transporte de carga del nodo i al nodo j durante el período de planeación t , para el sub-período de planeación t' , donde $i = j = N$,

x_t^K = Número de vehículos del tipo K adquiridos hasta el período t ,

$R_{ijl_t^K t''}$ = Variable binaria igual a 1 si el vehículo l_t^K , viaja del nodo i al nodo j , en el periodo de operación t'' del sub-período de planeación t' perteneciente al período de planeación t e igual a 0 en otro caso,

$q_{ijl_t^K t''}$ = Unidades de carga transportada del nodo i al nodo j por el vehículo l_t^K en el período de operación t'' , del sub-período de planeación t' ,

$y_{it_t^K}$ = Distancia total recorrida por el vehículo l_t^K durante el período de planeación t ,

TC_{acct} = Costos totales externos por accidentalidad durante el período de planeación t ,

AE_t = Costos totales externos de contaminación del aire, para el período de planeación t ,

CEE_{inf} = Costos totales externos por infraestructura durante el período de planeación t .

$F_{ijt''}$ = Flujo de vehículos del nodo i al nodo j durante el período de operación t'' del sub-período de planeación t' ,

Funciones

$U_t(P_t^K, q_{ijl_t^K t''}, d_{ij}, x_t^K, R_{ijl_t^K t''}, c_t^K)$ = Función de utilidad en términos de la ganancia generada por la operación de los vehículos durante el período de planeación t .

$E_t(TC_{acct}, AE_t, CEE_{inf})$ = Función que representa los costos externos totales en función de la flota seleccionada y la operación de la misma durante el período de planeación t .

Funciones Objetivo

$$\text{Maximizar } Fobj_1 = \left[\sum_{t=1}^T U_t \left(P_t^K, q_{ijl_t^K t' t''}, d_{ij}, x_t^K, R_{ijl_t^K t' t''}, c_t^K \right) \right] - \left[\sum_{K=1}^k (x_t^K - x_{t-1}^K) C_{adq(K)} \right] \quad (9)$$

$$\text{Minimizar } Fobj_2 = \sum_{t=1}^T E_t (TC_{acc}, AE_t, CEE_{inf}, x_t^K) \quad (10)$$

Restricciones

$$TC_{acct} = \sum_i \sum_j \sum_{t'} \sum_{t''} \left[F_{ijt' t''} r \theta (a+b) + F_{ijt' t''} r \left[(1 - F_{ijt' t''}) (a+b) + c \right] \right] \quad (11)$$

$$AE_t = \sum_{K=1}^k \sum_{p=1}^C y_{il_t^K} \gamma_p E F_p^K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$CEE_{inf_t} = f(L; M) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$E_t = TC_{acct} + AE_t + CEE_{inf_t} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (14)$$

$$U_t = \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{t''=1}^{T''} \sum_{l=0}^{x_t^K} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n P_t^K q_{ijl_t^K t' t''} d_{ij} - \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{t''=1}^{T''} \sum_{l=0}^{x_t^K} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_t^K R_{ijl_t^K t' t''} d_{ij} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$q_{ijl_t^K t' t''} = \begin{cases} \min \left\{ Q_K; D_{ijt' t''} - \sum_{l=0}^{x_t^K} \sum_{m=1}^{t''-1} q_{ijl_t^K t' m} \right\} & \text{si } l_t^K > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall t, t', t'' \quad (16)$$

$$y_{il_t^K} = \begin{cases} \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{t''=1}^{T''} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ijl_t^K t' t''} d_{ij} & \text{si } l_t^K > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad l_t^K = 1, \dots, x_t^K \quad (17)$$

$$\sum_{K=1}^k x_t^K \leq t \text{Max}_{Adq} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$x_{t+1}^K - x_t^K \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (19)$$

$$\sum_{l_t^K=0}^{x_t^K} \sum_{t''=1}^{T''} q_{ijl_t^K t' t''} \geq D_{ijt' t''} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad t = 1, \dots, T \quad t' = 1, \dots, T' \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n R_{ij_t^k t^r} - \sum_{i=1}^n R_{jil_t^k t^r+1} = 0 \quad \forall j=1, \dots, n \quad t=1, \dots, T \quad t'=2, \dots, T \quad t''=1, \dots, T \quad (21)$$

$$I_t^K = 1, \dots, X_t^K$$

La ecuación (9) y (10) son las funciones objetivos del modelo de programación dinámica. La ecuación (9) de manera específica representa la acumulación de la función de utilidad por operación de la flota de transporte durante el período de planeación teniendo en cuenta dos expresiones matemáticas, la primera expresión representa la función de utilidad acumulada durante el período de planeación y la segunda expresión denota el costo de adquisición de los vehículos de la flota, mientras, por otro lado, la ecuación (10) representa la acumulación de la función de los costos de las externalidades de la flota de transporte durante el período de planeación esta ecuación es tomada de manera precisa de la función proporcionada por Márquez y Cantillo, 2013.

La ecuación (11) describe el cálculo de los costos externos asociados por accidentalidad en la flota de transporte seleccionada por período de planeación. Esta ecuación hace parte de la función de costos de las externalidades del transporte proporcionada por Márquez y Cantillo, 2013. Note que la ecuación involucra la relación entre la magnitud del flujo de vehículos entre dos nodos en un período de tiempo en específico ($F_{ij_t^r}$), una tasa del riesgo de accidente (r), una tasa del costo total del accidente que recae sobre el dueño del vehículo (θ) y la voluntad del individuo a pagar por una reducción del riesgo de accidente (a), a familiares y amigos (b) y los costos pagados por el sistema de seguridad social (c).

La ecuación (12) describe el cálculo de los costos externos asociados a la emisión de gases contaminantes por la operación de la flota de transporte. Esta ecuación fue proporcionada por Márquez y Cantillo, 2013. Note que la ecuación describe la relación entre la distancia recorrida por los vehículos de la flota (y_{it^k}), el factor de emisión de gases contaminantes para cada vehículo (EF_p^K) y el costo por unidad de masa de los gases emitidos en los que incurre en la sociedad por detrimento de la salud (γ_p).

La ecuación (13) describe el cálculo de los costos externos asociados por infraestructura del modo de transporte utilizado. Esta ecuación es proporcionada por Márquez y Cantillo, 2013. Esta ecuación describe los costos como una función entre el flujo de tráfico (F) y la longitud (L) del medio imprescindible para realizar la operación de transporte.

La ecuación (14) describe el cálculo de los costos externos totales por período de planeación como la suma de los costos externos por accidentalidad (TC_{acct}), los

costos externos por emisiones de gases contaminantes (AE_t) y los costos externos de la infraestructura del modo de transporte (CEE_{inf}^t).

La ecuación (15) introduce el cálculo de la función de utilidad obtenida por la operación de la flota de transporte para un período de planeación. La utilidad es calculada como la sustracción de dos expresiones matemáticas, la primera expresión denota la relación del precio del flete de venta (P_t^K), la distancia recorrida (d_{ij}) y la cantidad de carga transportada ($q_{ijl^k n^t}$), calculando la ganancia operativa, mientras que la segunda expresión denota la relación entre el costo del flete percibido por el dueño de la flota (c_t^K), la distancia recorrida por el vehículo (d_{ij}) y la asignación de un vehículo a una ruta entre nodos ($R_{ijl^k n^t}$) calculando de esta manera el costo operativo.

La ecuación (16) describe el cálculo de la carga transportada por cada embarcación de la flota durante todos los períodos de operación. La cantidad de carga transportada está en función de la demanda entre nodos y la capacidad de los vehículos que hacen parte de la flota de transporte, entendiendo que un vehículo no puede transportar carga superior a su capacidad.

La ecuación (17) introduce el cálculo de la distancia total recorrida por vehículo durante los períodos de operación para un período de planeación, relacionando la ruta establecida del vehículo por la distancia existente entre los nodos de la ruta establecida.

La ecuación (18) presenta la restricción de selección de vehículos a pertenecer en la flota con base al número máximo de vehículos que pueden ser adquiridos por cada período de planeación. Esta delimitación del problema hace que sea posible la obtención de una solución del problema debido a que aumentaría el número de posibles estados de manera exponencial.

La ecuación (19) representa la acumulación de vehículos adquiridos dentro de la flota a través de los períodos de planeación, lo cual indica que la variable de adquisición de vehículos (x_t^K) es acumulable con respecto a cada período de planeación.

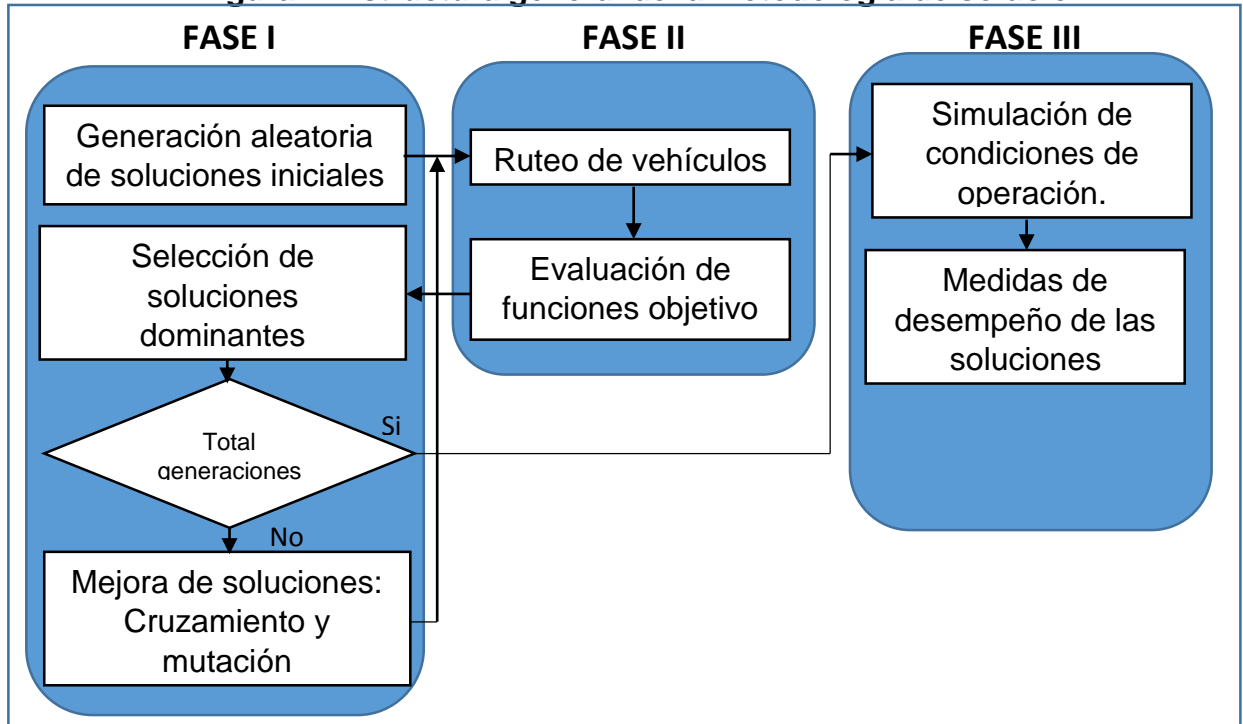
La ecuación (20) restringe que se satisfaga la demanda de transporte de carga para cada arco que conecte dos nodos.

La ecuación (21) restringe que la variable que representa el ruteo de los vehículos de la flota visite en cada período operacional otro nodo.

3.2.2. METODOLOGIA PROPUESTA

La metodología propuesta para solucionar el FSMVRP dinámico multiobjetivo abordado en esta investigación consiste en la descomposición del problema descrito en tres sub-problemas que son resueltos en tres fases distintas como es ilustrado en la **Figura 2**.

Figura 2. Estructura general de la metodología de solución.



Fuente: Elaboración Propia.

El primer sub-problema el cual es abordado en la fase I de la metodología adapta y optimiza mediante un algoritmo genético la asignación de los vehículos que componen la flota de transporte, este sub-problema es planteado como un problema de optimización combinatoria e inspirado en el algoritmo de programación dinámica para la codificación de un gen en forma de política de adquisición de vehículos para conformación de la flota de transporte.

El segundo sub-problema resuelto en la fase II de la metodología plantea el problema de ruteo para las flotas de vehículos seleccionadas través del algoritmo genético en cada período de planeación, este problema es solucionado a través de un modelo de programación dinámica ajustada para el ruteo de múltiples vehículos, soportando de manera continua el modelo de optimización desarrollado en la fase I.

Por último el tercer sub-problema resuelto en la fase III introduce elementos estocásticos en la planeación de la operación de la flota de transporte, permitiendo calcular medidas de desempeño ajustadas a elementos estocásticos para las soluciones proporcionadas por los dos sub-problema anteriores.

3.2.3. ALGORITMO GENÉTICO

La programación dinámica es un método optimización que arroja soluciones exactas, cuyo principal mecanismo de solución consiste en la descomposición de un problema en etapas y estados que permitan reducir la complejidad del problema original. Una de las principales ventajas de este método, es que permite elaborar una solución conocida como política óptima, la cual se asemeja a una hoja de ruta que incluye la decisión óptima a tomar en cada etapa en la que fue descompuesto el problema original. No obstante, la división del problema en etapas y estados puede incrementar de manera exponencial el número de operaciones a realizar, no permitiendo obtener la política óptima en un tiempo razonable.

Por otro lado, los algoritmos genéticos, son metaheurísticas diseñadas para la solución de problemas de optimización combinatorios, populares en la solución de problemas de asignación y problemas de optimización multiobjetivo. Las bondades de ambos métodos de solución son mezcladas para presentar una solución atractiva al FSMVRP dinámico multiobjetivo, a su vez tal y como fue concluido en revisión literaria, la programación dinámica y los algoritmos genéticos aún no han sido ampliamente usados, lo que hace atractivo el desarrollo de una metodología de solución basada en ambos métodos.

De manera general la estructura de solución de los algoritmos genéticos consiste de manera inicial en la generación de un conjunto **P** de soluciones iniciales. A cada solución o representación de la solución se le conoce como **cromosoma** y al conjunto **P** de soluciones iniciales se le conoce como conjunto de soluciones **Padres**.

Una vez se es seleccionado el conjunto de soluciones **Padre** mediante un método de selección aleatoria, se evalúa cada cromosoma con respecto a las funciones objetivos establecidas, lo que se conoce como **fitness** de la solución. El **fitness** de una solución permite comparar las soluciones iniciales distinguiendo según los objetivos perseguidos las soluciones dominantes dentro del conjunto de soluciones **Padres**, para de manera posterior mediante métodos de cruzamiento y mutación de soluciones generar nuevas soluciones a partir de las soluciones dominantes identificadas.

A las nuevas soluciones generadas se les conocen como soluciones **hijas** y componen una nueva generación de soluciones a las que nuevamente se les debe evaluar el **fitness**. El procedimiento es repetido de manera iterativa hasta que se

cumple con un número de generaciones el cual el usuario define previamente. La **Figura 3** contiene el seudocódigo de la estructura general de los algoritmos genéticos.

Figura 3. Estructura general de solución de los algoritmos genéticos

Seudocódigo general de solución para algoritmos genéticos

Generar un conjunto de soluciones iniciales (P).

Evalúe la(s) función(es) objetivo(s) para cada solución del conjunto P (fitness).

Generaciones=0

Mientras Generaciones<=Número de generaciones **Haga**

Seleccionar soluciones dominantes de la población de soluciones (P).

Cruzar soluciones dominantes con soluciones del conjunto de soluciones iniciales con una probabilidad asociada, obteniendo una nueva solución.

Mutar soluciones dominantes con una probabilidad asociada, obteniendo una nueva solución.

El conjunto (P) se compone ahora de las soluciones mutadas, soluciones cruzadas y soluciones dominantes.

Evalúe la(s) función(es) objetivo(s) para cada solución del conjunto P (fitness).

Generaciones=Generaciones+1

Finalizar algoritmo

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo genético diseñado para el FSMVRP dinámico multiobjetivo sigue las especificaciones del algoritmo genético NSGA-II (Deb, Agrawal, Pratap, & Meyarivan, 2000) un algoritmo genético de ordenamiento no dominado elitista construido de manera especial para problemas de optimización multiobjetivo y presenta como ventajas su rapidez computacional y el acercamiento al frente de Pareto óptimo.

El algoritmo NSGA-II primero clasifica las soluciones en múltiples frentes de Pareto, mediante el algoritmo presentado en la **Figura 4**, esta clasificación en múltiples frentes de Pareto, permite diferenciar el nivel de dominancia entre las soluciones.

De manera posterior este procedimiento agrega una medida de calidad de las soluciones llamada distancia de multitud la cual mide la densidad de soluciones que rodean una solución en particular. La clasificación en frentes de Pareto y la distancia

de multitud de cada solución permite dar un rango de importancia entre soluciones permitiendo dar paso al método de selección, cruzamiento y mutación del algoritmo genético básico. La **Figura 5** muestra el pseudocódigo para el algoritmo genético NSGA-II.

Figura 4. Algoritmo de ordenamiento de soluciones no dominadas.

Seudocódigo de ordenamiento de soluciones no dominadas

Sea P un conjunto de soluciones

Y p una solución, donde $p \in P$

Inicio

Mientras $P > 0$

$P' = \{1\}$ Se incluye la primera solución de P en conjunto P'

Para cada $p \in P \wedge p \notin P'$

$P' = P' \cup \{p\}$

Para cada $q \in P' \wedge q \neq p$

Si p domina q, **entonces** $P' = P' \setminus \{q\}$

De otra manera si q domina p, **entonces** $P' = P' \setminus \{p\}$

$F = P'$

Elimine las soluciones P' de P.

Finalizar Algoritmo

Fuente: A fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II, *Deb et al, 2000.*

Figura 5. Algoritmo NSGA-II

Seudocódigo del algoritmo NSGA-II

Inicialice **Población**

Genere **N** soluciones aleatorias e insértelas en **Población**

Para cada ($i = 1$ Hasta **Generaciones**) Haga

Genere **Soluciones_Hijas** de tamaño **N**

Seudocódigo del algoritmo NSGA-II

Seleccione soluciones de **Población**

Cree Soluciones a partir de las soluciones seleccionadas

Introdúzcalas en **Soluciones_Hijas**

Mute Soluciones seleccionadas e introdúzcalas en **Soluciones_Hijas**

Combine **Población** y **Soluciones_Hijas** en **Población_Actual** de tamaño $2N$

Para cada solución en **Población_Actual** Haga

Asigne una clasificación basado en el algoritmo de la figura 4

Genere sets de vectores con soluciones no dominadas en **PF**

Añada soluciones de **PF** a **Población** empezando

Desde el mejor frente hasta **N** soluciones y determine la distancia de similitud

Entre puntos de cada frente.

Presente resultados

Finalizar Algoritmo

Fuente: Multi-objective optimization on a real-world manufacturing process using cuckoo search. Syberfeldt, A, 2014.

3.2.3.1. CODIFICACIÓN DEL CROMOSOMA

Tal y como se ha mencionado anteriormente la principal función del algoritmo genético dentro de la metodología de solución propuesta para el problema del FSMVRP dinámico multiobjetivo es la de abordar el problema de asignación de vehículos para cada etapa.

La codificación del cromosoma o representación de la solución es de especial importancia en el diseño del algoritmo genético, debido a la capacidad del cromosoma de representar fielmente una solución a un problema de optimización combinatoria, a su vez que una representación inadecuada de la solución podría facilitar que el algoritmo explore un universo de soluciones no factibles.

De manera adicional con la intención de obtener las ventajas del uso de la programación dinámica se diseñó un cromosoma para el FSMVRP dinámico multiobjetivo inspirado en la política óptima de asignación de embarcaciones y en el

planteamiento del problema de asignación como problema de programación dinámica, como el que se presenta a continuación:

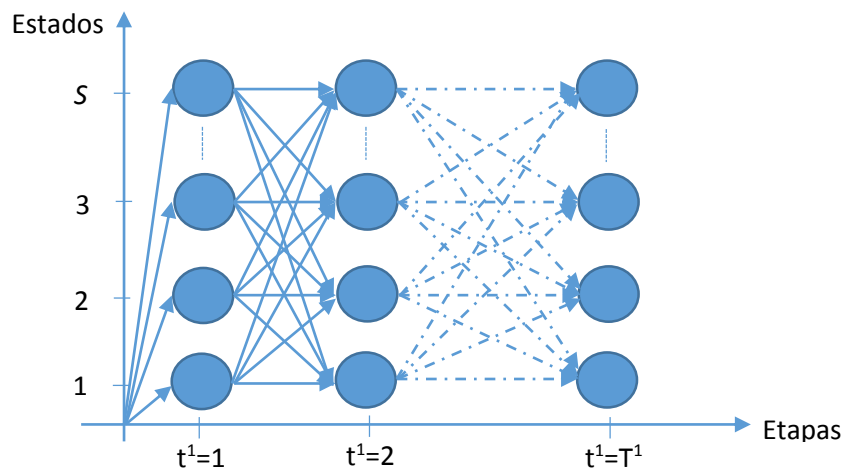
Sea k el número de tipos de vehículos disponibles para conformar la flota durante el período de planeación, $k + 1$ el número de tipos de vehículos más un tipo de vehículo vacío que representa la posibilidad de no adquirir vehículos durante el período de planeación y Max_{Adq} el número de máximo de vehículos de cualquier tipo que pueden ser adquiridos durante cada período de planeación, entonces, siendo S el número de posibles configuraciones entre los tipos de vehículos a adquirir para un período de planeación, el mismo se puede calcular como se muestra en la ecuación (22).

$$S = \binom{(k+1) + Max_{Adq} - 1}{Max_{Adq}} = \frac{(k + Max_{Adq})!}{Max_{Adq}!(k)!} \quad (22)$$

Por lo que el problema de programación dinámica se compone de T etapas donde cada etapa corresponde a un período de planeación y a su vez cada etapa se compone de S estados; cada estado representa la posible configuración de tipos de vehículos que pueden escogerse, la **Figura 6** ilustra el problema de asignación de embarcaciones dentro de la flota para cada período de planeación.

Esta representación del problema permite que la solución acceda a una composición de flota heterogénea u homogénea, dando acceso desde cualquier estado a cualquier configuración con diferentes tipos de vehículos escogidos. A su vez cada arco que conecta un estado (nodo) con otro corresponde a la contribución realizada a la función objetivo al agregado en la flota de una nueva configuración en una etapa definida.

Figura 6. Descripción gráfica del problema de asignación como un problema de programación dinámica.



Fuente: Elaboración Propia

Para la construcción del cromosoma que representará la solución del problema de asignación dentro del algoritmo genético inspirado en la representación del problema de programación dinámica, se configura un vector con una longitud o número de genes igual al número de período de planeación T ; cada gen tomara valores enteros positivos pertenecientes al conjunto $E = \{1, 2, \dots, S\}$, el cual contiene la enumeración de cada posible configuración de embarcaciones en un período de planeación.

Figura 7. Ejemplo de representación del Cromosoma para $T=5$, $k=3$ y $Max_{Adq}=2$.

Enumeración Configuración	Vehículo Tipo	
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	2	2
6	2	3
7	2	4
8	3	3
9	3	4
10	4	4

Periodo de Planeación	1	2	3	4	5
Configuración	5	4	3	6	4

Cromosoma

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 7** muestra un ejemplo del cromosoma construido para el problema de asignación; la manera en la que debe interpretarse la solución es la siguiente, durante el primer año de planeación debe adoptarse la configuración 5 que se compone de dos vehículos del tipo 2, para el segundo año debe incorporarse a la flota la configuración 4 que consiste en un vehículo del tipo 1 y del tipo 4, durante el tercer año de operación debe incorporarse la configuración 3 que consiste en un vehículo del tipo 1 y del tipo 3, durante el cuarto año de operación debe incorporarse la configuración 6 que consiste en un vehículo del tipo 2 y del tipo 3 y por último en el quinto año debe incorporarse la configuración 4 que consiste en un vehículo del tipo 1 y del tipo 4.

Note que la repetición de configuraciones dentro del cromosoma se permiten y que la repetición de una configuración durante el período de planeación conduce a respuestas factibles, de igual manera el diseño de este cromosoma permite que el

cruzamiento o la mutación arroje siempre resultados factibles siempre y cuando el máximo valor que pueda tomar un gen sea igual a S.

3.2.3.2. GENERACIÓN DE SOLUCIONES INICIALES

Las soluciones iniciales en el algoritmo genético diseñado para el problema de asignación se generan de dos formas. Existen soluciones aleatorias puras, donde cada uno de los genes de estas soluciones es generado a través de un procedimiento aleatorio, el propósito de estas soluciones es generar soluciones dispersas en una región amplia de soluciones.

Por otro lado se generan soluciones con flotas de vehículos homogéneas, el propósito de este tipo de soluciones es incluir de manera directa la evaluación de flotas homogéneas como solución al FSMVRP dinámico multiobjetivo, así como regionalizar el espacio de soluciones por dominancia en el tipo de vehículo seleccionado en la solución.

3.2.3.3. EVALUACIÓN DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

Para la solución del FSMVRP dinámico multiobjetivo se ha propuesto medir la utilidad operativa de la flota de transporte y los costos de las externalidades. El cromosoma diseñado para el algoritmo genético resuelve el problema de asignación y conformación de una flota de transporte durante cada período de planeación, no obstante, evaluar la utilidad esperada por concepto de las operaciones de la flota y los costos de las externalidades asociados conlleva a que se aborden decisiones sobre las operaciones o de manera específica sobre la ruta que cada vehículo de la flota cubrirá durante cada período de operación dentro de cada sub-período de planeación. Es por eso que como soporte a la evaluación de la función objetivo se ha diseñado un algoritmo que realice la asignación de rutas o ruteo de los vehículos que se adquieren durante cada período de planeación y el cual es presentado en la sección 3.2.3.5.

A su vez el cálculo de los costos de las externalidades de transporte son calculados bajo la estrategia de evaluación de corredores de transporte de carga presentada por Márquez & Cantillo, 2013, los cuales proponen incluir los costos externos del transporte en la evaluación de un corredor de transporte de carga a través de la medición de externalidades del transporte como la accidentalidad, impacto medioambiental e infraestructura.

3.2.3.4. SELECCIÓN DE SOLUCIONES PARA CRUZAMIENTO Y MUTACIÓN

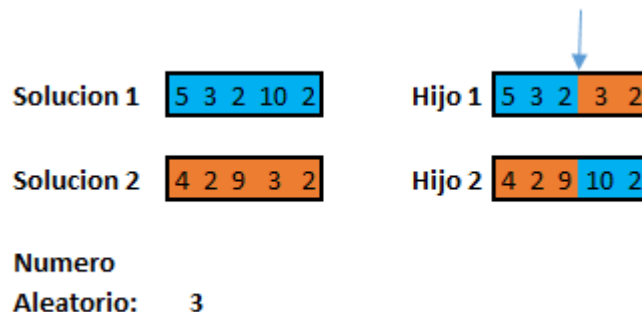
El procedimiento de selección es uno de los elementos que afectan el desempeño del algoritmo genético debido a que es el mecanismo que otorga privilegios a las soluciones para que hagan parte en los procedimientos de generación de nuevas soluciones, un proceso de selección inadecuado podría facilitar la convergencia en soluciones que sean óptimo locales. El proceso de selección utilizado por el NSGA-II es conocido como selección por torneo binaria, donde dos soluciones son escogidas de manera aleatoria y la solución con menor rango de frente de Pareto es escogida para reproducirse, en caso de que ambas soluciones pertenezcan al mismo rango del frente de Pareto, ganará la solución que mayor distancia de multitud posea privilegiando de esta manera a las soluciones del frente de Pareto dominante entre las soluciones seleccionadas y la solución más distante del resto de las soluciones.

3.2.3.5. CRUZAMIENTO Y MUTACIÓN

El procedimiento de cruzamiento y de mutación dentro de los algoritmos genéticos, corresponde al mecanismo con el cual el algoritmo obtiene nuevas soluciones. En general el algoritmo NSGA-II propone usar los procedimientos de cruzamiento y mutación del algoritmo genético básico.

El procedimiento de cruzamiento consiste en seleccionar dos soluciones mediante el procedimiento discutido en la sección 3.2.3.3, de manera posterior se genera un número aleatorio entre 1 y el número de períodos de planeación menos uno, este número representa el punto de cruce donde las dos soluciones realizaran el intercambio de información generando a su vez dos soluciones nuevas adicionales.

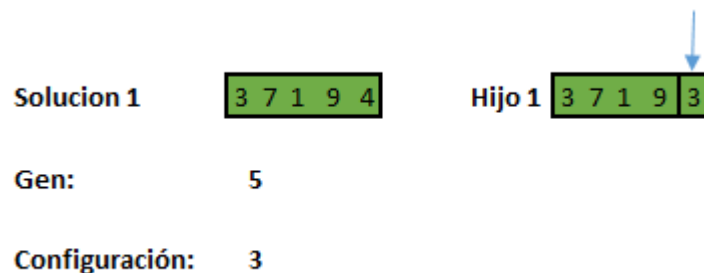
Figura 8. Ejemplo del procedimiento de cruzamiento para $T^1=5$, $k=3$ y $MaxAdq=2$.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 8** se muestra un ejemplo de cruzamiento, donde dos soluciones generan dos soluciones hijas adicionales con un solo punto de corte generado de manera aleatoria. Note que la solución hijo 1 posee la información de la solución 1 del gen 1 al gen 3, mientras que del gen 4 al 5 contiene la información de la solución 2, de manera similar ocurre con la conformación del hijo 2 donde del gen 1 al 3 contiene la información de la solución 2 y del gen 4 al 5 contiene la información de la solución 1. De igual manera note que la relación de antiguas soluciones y nuevas soluciones creadas es 1:1, donde se necesitan dos padres para generar dos nuevas soluciones o soluciones hijas.

Figura 9. Ejemplo del procedimiento de Mutación para $T1=5$, $k=3$ y $MaxAdq=2$.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el procedimiento de mutación consiste en la generación de un número aleatorio entre 1 y el número de períodos de planeación; este número representa el gen del cromosoma que será cambiado por otro número aleatorio generado entre 1 y el número máximo de posibles configuraciones de embarcaciones. La **Figura 9** muestra un ejemplo del procedimiento de mutación.

3.2.4. ALGORITMO DE RUTEO PARA MÚLTIPLES VEHÍCULOS

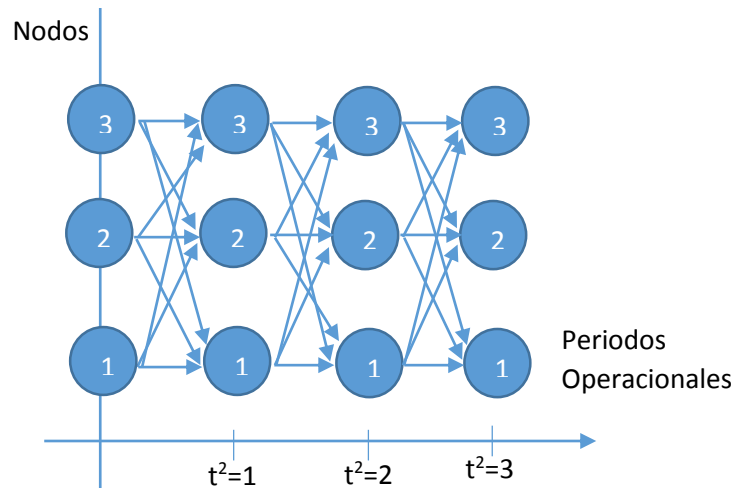
El algoritmo genético presentado en la sección 3.2.2 se enfoca en la solución del problema de asignación de vehículos que conforman la flota operacional, no obstante, la selección de vehículos carece de sentido sin una planeación a nivel táctico de las operaciones de la flota que describa la forma como la flota impactara económicamente al dueño de la flota y externamente a la sociedad, es por esta razón que en esta sección se presenta el diseño de un algoritmo basado en programación dinámica que establece las rutas que cada uno de los vehículos debe cumplir durante períodos operacionales en cada período de planeación bajo

criterios de maximización de las utilidades proyectadas por la operación de la flota de vehículos y satisfacción de la demanda.

Suponga una red de destinos que se visitan etapa por etapa como el mostrado en la **Figura 10**, cada etapa operacional representa la llegada de un vehículo a uno de los nodos existentes nodo, de modo que la red de destinos sea modelado como un problema de programación dinámica discreta.

La flota compuesta por múltiples vehículos según el período de planeación debe decidir que nodos debe visitar cada vehículo de modo que se atienda la demanda de transporte del sistema y se maximice la utilidad en la operación; cada uno de las conexiones entre nodos denota la utilidad proyectada obtenida por uno de los vehículos a prestar el servicio de transporte entre nodos, el valor de utilidad de las conexiones es dependiente de la demanda transportada, el vehículo seleccionado y las decisiones tomadas con respecto el tiempo.

Figura 10. Representación del problema de ruteo mediante programación dinámica.



Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de solución construido es un procedimiento iterativo que utiliza el procedimiento de solución de los algoritmos de programación dinámica; este algoritmo divide el problema en múltiples etapas en donde cada etapa posee una decisión del problema, la sumatoria de los valores óptimos de la función de utilidad etapa por etapa permiten fijar una política de solución óptima. La **Figura 11** contiene el pseudocódigo del algoritmo diseñado especialmente para el ruteo de múltiples vehículos.

Si bien este algoritmo sigue la lógica de solución planteada por Bellman en su algoritmo de programación dinámica como método de solución exacta, el algoritmo

presentado no puede asegurar el óptimo por la dependencia en el cálculo de la utilidad a la asignación por vehículos en etapas posteriores del algoritmo.

Figura 11. Algoritmo de ruteo basado en programación dinámica para múltiples vehículos

Seudocódigo del algoritmo de ruteo para múltiples vehículos

Parámetros

Num_nod: Numero de nodos en la red

Num_veh: Número de vehículos en la flota de transporte

Demanda: Matriz con la demanda de transporte de carga entre nodos de dimensión **Num_nodxNum_nod**.

Capacidad: Vector con la capacidad de cada vehículo perteneciente a la flota de dimensión **Num_vehx1**

Precio_viaje: Matriz de precios de viaje a cada destino por carga transportada (\$/Ton) según el tipo de vehículo. Matriz de dimensión **Num_veh*Num_nodxNum_nod**.

Costo_Operativo: Matriz con los costos operativo por trayecto entre nodos y por tipo de vehículo; de dimensiones **Num_veh*Num_nodxNum_nod**.

Distancias: Matriz con las distancias por Km entre nodos, de dimensión **Num_nodxNum_nod**.

Variables

Demanda_Actualizada: Matriz con la demanda de transporte de origen a destino no transportada hasta la etapa operacional a evaluar; de dimensión **Num_nodxNum_nod**.

Capacidad_Etapa: Matriz con información de la cantidad de carga a transportar por cada tipo de vehículo en la etapa operacional en la que se calcula para un respectivo origen-destino. Se calcula como el Mínimo {**Capacidad, Demanda_Actualizada**}. La matriz es de dimensión **Num_veh*Num_nodxNum_nod**.

Function: Matriz con la función de utilidad calculada por período operacional, que refleja la utilidad obtenida por enviar un tipo de vehículo de un origen a un destino con carga igual a **Capacidad_Etapa**. La matriz tiene una dimensión **Num_veh*Num_nodxNum_nod**.

Seudocódigo del algoritmo de ruteo para múltiples vehículos

Destinos: Matriz que guarda el destino con la máxima utilidad obtenida por tipo de vehículo, por origen y período operacional, con dimensión igual a **Num_veh*Num_nodxPeriodos_Operacionales**

Optimos: Matriz que guarda la máxima utilidad obtenida por tipo de vehículo, por viaje de origen-destino y período operacional, con dimensión igual a **Num_veh*Num_nodxPeriodos_Operacionales**

Asignacion: Matriz que guarda la asignación de ruta por cada vehículo por etapa de operación, de dimensión **Num_vehxPeriodos_Operacionales**

Ruteo: Variable que contiene el ruteo de cada vehículo a través de cada período de operación.

Procedimiento

EtaOperacional = 1

Demanda_Actualizada = Demanda

Mientras la sumatoria de **Demanda_Actualizada** sea **> 0**

1. Se calcula **Capacidad_EtaOperacional**
2. Se calcula **Function**, si la etapa operacional es diferente de 1 se le debe sumar a **Function** los valores de **Optimos** de la etapa anterior.
3. **Si** los vehículos de la flota han sido asignados en **Asignación entonces**
 - 3.1. Eliminar de **Function** la información de los vehículos asignados en la etapa operacional actual.
4. Guardar en **Optimos** en la columna de la etapa operacional actual los valores de utilidad máxima de los viajes origen-destino del vehículo con mayor utilidad en **Functions**.
5. Guardar en **Destinos** los destinos a los que corresponde el valor de utilidad máxima según el origen, para el vehículo al que fue asignado una nueva ruta.
6. Guarde en **Asignación** la asignación del destino del vehículo.
7. Calcule **Ruteo** a partir de **Destinos** y **Optimos** de 1 hasta **EtaOperacional**.
8. Con base a **Ruteo** y **Capacidad_EtaOperacional** actualice **Demanda_Actualizada**
9. **EtaOperacional = EtaOperacional + 1**

Finalizar Algoritmo

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. ALGORITMO DE SIMULACIÓN

Los algoritmos planteados en la sección 3.2.2 y 3.2.3.5 cumplen con la Fase I y la Fase II de la metodología de solución propuesta para el FSMVRP dinámico multiobjetivo, las cuales tienen como objetivo seleccionar un conjunto de flotas como soluciones dominantes pertenecientes al frente de Pareto resultante del algoritmo genético, no obstante, los algoritmos planteados hasta la segunda fase de la metodología, en especial el algoritmo de ruteo con el cual se evalúa la función objetivo, utilizan un mecanismo de solución determinista, donde se evalúan los costos de operación y las externalidades de la flota de transporte para una demanda promedio y que no tiene en cuenta condiciones de operación de las flotas de transporte seleccionadas como disminuciones o aumentos en la velocidad a razón de los cambios en el clima o las variaciones de tiempo en la tasa de cargue y descargue de carga que en algunos modos de transporte tienden a ser un tiempo no despreciable para las operaciones de la flota.

Es por eso que surge dentro de la metodología de solución propuesta la Fase III, donde se busca someter las soluciones dominantes arrojadas por el frente de Pareto a condiciones reales de operación y variaciones en la demanda de modo que se pueda evaluar de manera realista el comportamiento de las flotas y que el proceso de selección final de una flota de transporte no se reduzca a un proceso de elección de maximización de utilidades y minimización de los costos de las externalidades, sino que incluya a su vez medidas de desempeño de las operaciones de la flota como tiempo promedio de viaje por destino, carga total transportada por vehículo de la flota, porcentaje de utilización de la flota, porcentaje de utilización por vehículo en la flota, porcentaje de tiempo en el cual la flota permanece activa, porcentaje de tiempo en el que la flota permanece inactiva, entre otras medidas.

Para el desarrollo de lo discutido se elaboró un algoritmo de simulación orientado de manera precisa a evaluar el comportamiento en tiempo real de las flotas, para lo anterior el algoritmo diseñado retrata el dinamismo en la operación de la flota utilizando tres variables aleatorias como lo son la demanda, variaciones en la velocidad de los vehículos de la flota sujetas a cambios en las estaciones del año y variaciones en la tasa de cargue y descargue de carga en cada uno de los nodos de la red de transporte a evaluar; como punto de partida y supuesto fundamental el algoritmo asume que cada una de estas variables aleatorias tienen un comportamiento bajo una distribución de probabilidad normal, por lo que la generación de números aleatorios asociados a estas variables sigue la distribución de probabilidad mencionada.

Esto conlleva que dentro del algoritmo es la incorporación de parámetros adicionales a los solicitados en la Fase I y II de la metodología; donde se debe incluir la demanda de transporte promedio por nodo de la red, la desviación estándar de la demanda de transporte, la velocidad promedio por vehículo, la división de la

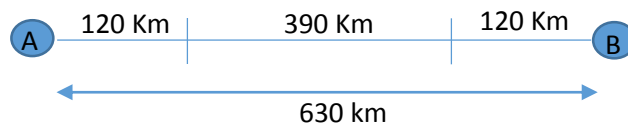
distancia entre un origen y un destino en tramos donde cada tramo represente unas condiciones uniformes de tráfico, las variaciones de velocidad promedio y la desviación estándar de estas variaciones por tramo y por estación del año y la media y desviación estándar de la tasa de cargue y descargue por cada nodo en la red.

Tal y como se ilustra en la **Figura 12** y es explicado con mayor profundidad en el seudocódigo presentado en la **Figura 13**, la simulación en síntesis recalcula mes a mes con el algoritmo presentado en la sección 3.2.3.5 una ruta para cada vehículo que componga la flota de vehículos en cada uno de los períodos de planeación teniendo en cuenta la demanda aleatoria generada.

Esta ruta establece desde cuales nodos a que nodos debe viajar cada vehículo y el parámetro de tramos divide la ruta total en segmentos de tráfico uniforme. Cada uno de los tramos contiene una variación en la velocidad promedio de los vehículos que es tratado de manera aleatoria, esta variación puede incrementar la velocidad promedio del vehículo o disminuirla y a su vez existen parámetros para esta variación diferente conforme la estación del año de planeación, permitiendo dar un factor estacional que represente las variaciones del clima.

Conociendo la velocidad por tramos y las distancias recorridas en cada tramo del viaje se calcula el tiempo de viaje por cada vehículo que compone la flota, a este tiempo se le suma el tiempo cargue y descargue del vehículo en los nodos de origen y destino, permitiendo analizar las medidas de desempeño de la operación de la flota.

Figura 12 *Figura que ilustra los elementos básicos del algoritmo de simulación.*



Fuente: Elaboración Propia

Figura 13 Seudocódigo del algoritmo de simulación utilizado en la metodología

Seudocódigo del algoritmo de simulación

Variables Aleatorias

Demanda: Demanda de transporte de carga de origen a destino.

Variación de Velocidad: Variación de velocidad conforme a los tramos de tráfico uniforme entre un origen y destino y la estacionalidad del clima.

Tasa de Cargue y descargue: Tasa de cargue y descargue de la carga de transporte por nodo en la red.

Parámetros

Velocidad Media: Velocidad media de vehículo de la flota cargado.

Tramos: Segmento en los que se divide la distancia entre un nodo y otro y en los cuales se presenta uniformidad en condiciones de tráfico.

Variables

Tiempo: Contiene el tiempo de viaje más el tiempo de descargue y cargue de vehículos por viajes entre nodos.

Ruteo: Variable que contiene el ruteo de cada vehículo a través de cada período de operación.

Procedimiento

1. Para cada Período de Planeación

1.1. Para cada Mes en un Año

1.1.1. Genere **Demanda** aleatoria con los parámetros de la función de distribución normal de la demanda.

1.1.2. Active el algoritmo de Ruteo de Vehículos y genere la Ruta para cada vehículo.

1.1.3. Para cada Período Operativo

1.1.3.1. Para cada Vehículo

1.1.3.2. Haga **Tiempo=0**

1.1.3.2.1. Para cada Tramo

1.1.3.2.2. Genere una **Variación de velocidad** aleatoria teniendo en cuenta el tramo, la estación del año en el que se encuentra el **Mes** y los parámetros de la función de distribución normal de la variación de la velocidad.

Seudocódigo del algoritmo de simulación

- 1.1.3.2.3. Calcule el tiempo de viaje por tramo y súmelo a la variable **Tiempo**.
- 1.1.3.2.4. **Finalice Para**
- 1.1.3.3. Genere una **Tasa de Cargue y Descargue** teniendo en cuenta los nodos de origen y destino en la ruta del vehículo para esta etapa operacional.
- 1.1.3.4. Multiplique la tasa de cargue y Descargue por el mínimo entre la demanda entre nodo origen y destino y la capacidad del vehículo.
- 1.1.3.5. Añada el tiempo de cargue y descargue a la variable **Tiempo**.
- 1.1.3.6. Guarde la variable **Tiempo** en la variable **Tiempo de viaje de origen a destino**.
- 1.1.3.7. Sume uno a lo contenido en la variable **Número de Viajes** en el origen y destino en el que se realizó el viaje.
- 1.1.3.8. **Finalice Para**
- 1.1.4. **Finalice Para**
- 1.2. Calcule medidas de desempeño Anuales
- 1.3. **Finalice Para**
- 2. Guarde Medidas de desempeño anuales
- 3. **Finalice Para**

Finalizar Algoritmo

Fuente: Elaboración Propia.

4. CAPITULO IV. PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SOLUCIÓN AL FSMVRP DINÁMICO MULTI OBJETIVO

Para una integración mejor de la metodología propuesta en esta investigación se desarrolló un prototipo de Software en Matlab que diera conexión con las diferentes fases de la metodología. Se presentan en este capítulo algunas instrucciones de uso del prototipo diseñado para la ejecución de la metodología propuesta.

4.1. INSTRUCCIONES BÁSICAS DE EJECUCIÓN

El prototipo diseñado tal y como fue mencionado anteriormente fue programado en su totalidad en Matlab. Debido a esto el ejecutable (el archivo FSMVRP_1_8.exe) se encuentra en la carpeta for_testing de la carpeta comprimida FSMVRP 1.8. Este ejecutable se pondrá en marcha si se encuentra instalado en su computador la versión de Matlab 2015a (8.5) o una versión más reciente. De no poseer Matlab en su computador, podrá bajar de manera gratuita el Matlab Runtime de la versión mencionada de Matlab y correspondiente al tipo de sistema operativo instalado en el computador usuario en la siguiente página web <https://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/>.

Al poner en marcha el ejecutable saldrá la portada inicial del prototipo tal y como se muestra en la **Ilustración 1**. Esta portada puede demorarse varios minutos, de manera especial si es la primera vez que es usada.

Ilustración 1 Portada del prototipo de Software programado.

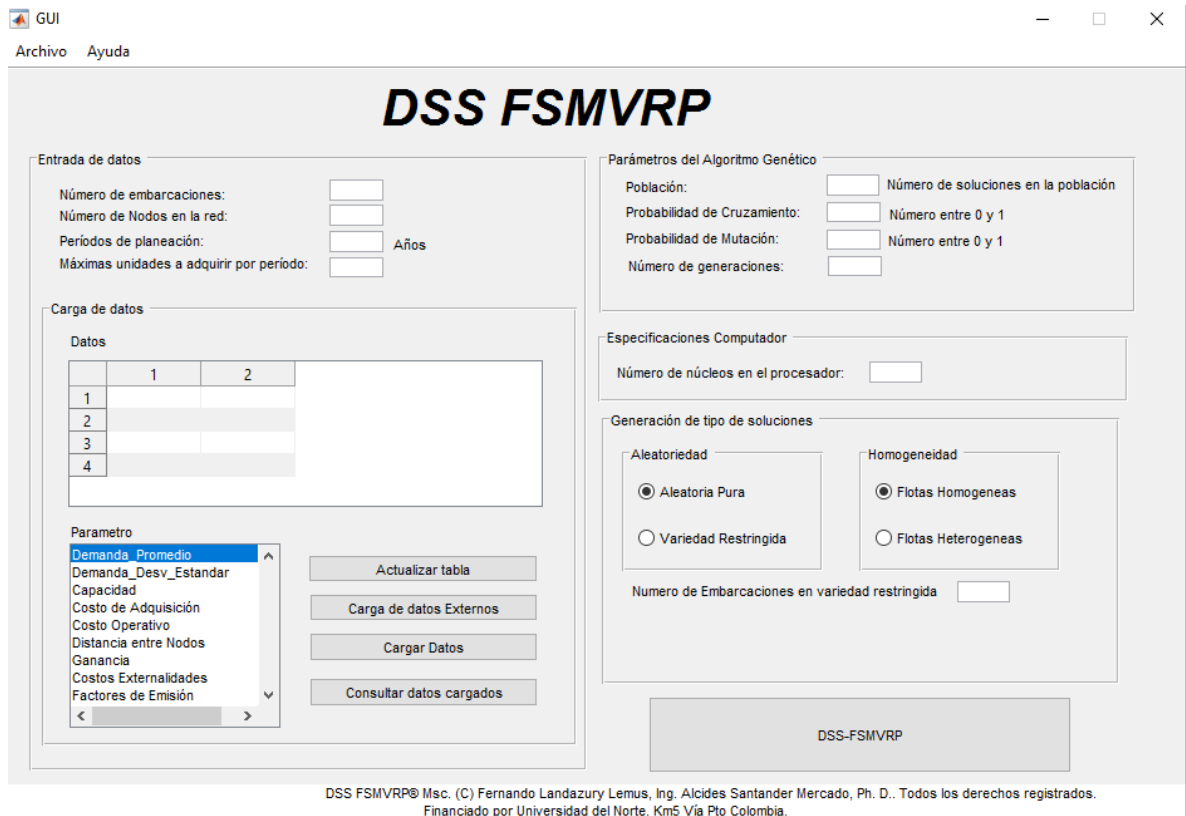


Fuente: Elaboración Propia. Portada del programa Shutterstock.

4.2. INSTRUCCIONES BÁSICAS DE USO

Una vez el prototipo de software carga toda la configuración preestablecida muestra un interfaz principal como la mostrada en la **Ilustración 2**. Esta interfaz controla el ingreso de los datos de entrada necesarios para poner a funcionar la fase I y II de la metodología presentada.

Ilustración 2 Interfaz gráfica de usuario inicial del prototipo programado.



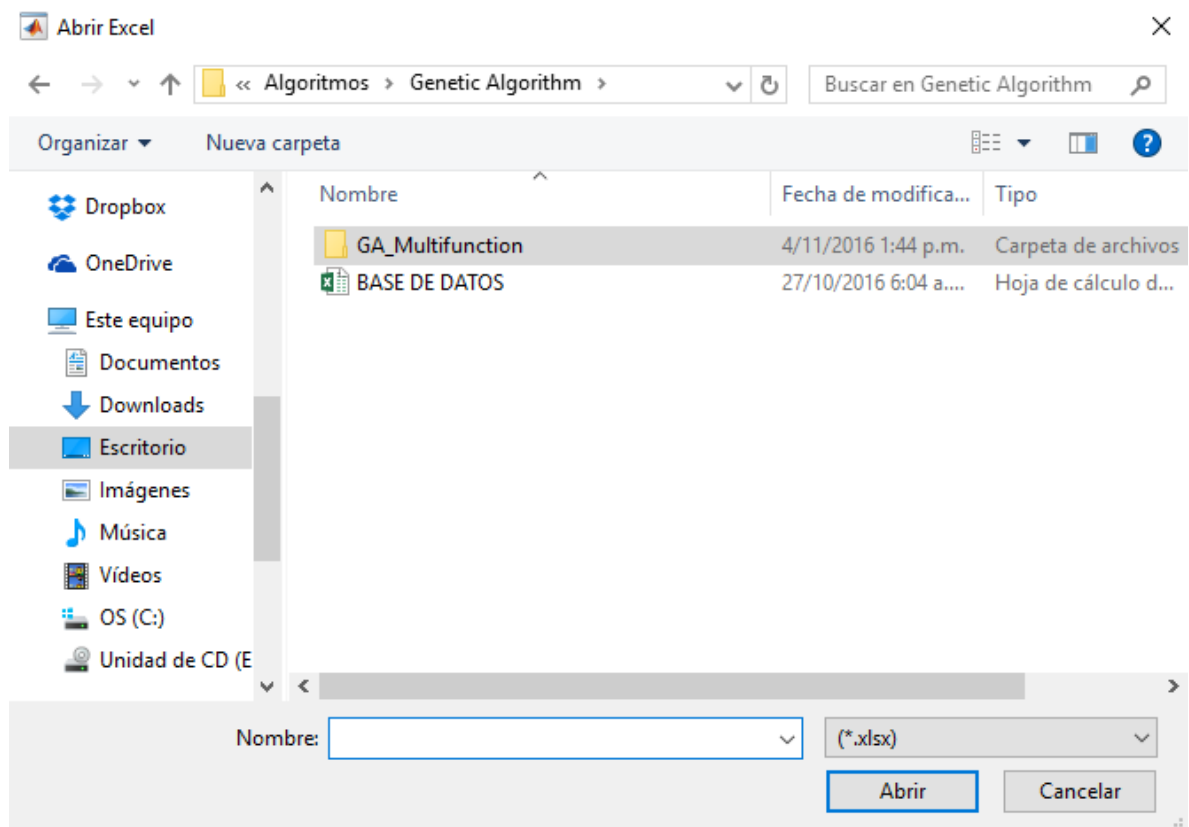
Note el subgrupo “Entrada de datos”, aquí se introduce toda la información relacionada con las dimensiones del problema a resolver como el número de embarcaciones (número de vehículos), nodos en la red sobre la que se realizará la planeación, el número de períodos de planeación y las máximas unidades a adquirir por período de planeación. Por defecto esta herramienta toma como período de planeación la unidad de tiempo años, como sub-períodos de planeación los meses de un año y los períodos de operación como el tiempo en el que llega un vehículo a un destino.

En el subgrupo de “Carga de datos” se añadió a la interfaz dos formas de introducir datos, la primera forma es seleccionar el parámetro necesario indicando que parámetro se desea introducir en la tabla de datos y posteriormente se hace clic en el botón actualizar tabla. De manera inmediata la tabla se actualizará las filas y columnas con las dimensiones del parámetro para la dimensión del problema

introducida en la sección “Entrada de datos”, de esta manera usted podrá ingresar manualmente los datos para cada parámetro y al finalizar deberá dar clic en cargar datos con la finalidad de que el sistema almacene el parámetro introducido.

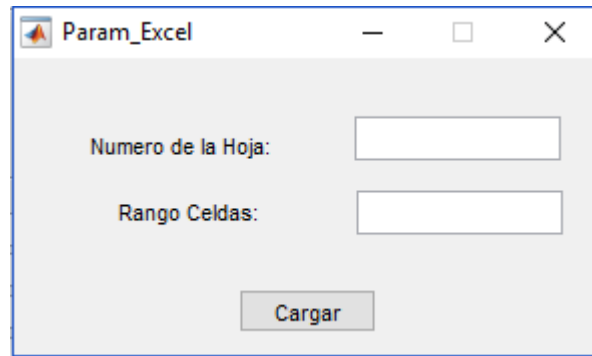
La segunda forma de introducir los datos es mediante una carga externa de los datos. Para utilizar esta opción deberá dar clic en el botón “Carga de Datos Externos”, el cual inmediatamente abrirá una ventana de directorio como la que se puede observar en la **Ilustración 3** es de aclarar que esta interfaz solo permite cargar datos externos de documentos con extensión .xlsx.

Ilustración 3 Cargue de archivos externos - Excel



En esta ventana deberemos buscar la ruta donde se encuentre el archivo de Excel con la información a exportar y luego de seleccionar el archivo se da clic en el botón abrir. De manera posterior se abre una ventana como la observada en la **Ilustración 4**.

Ilustración 4 Interfaz de cargue de datos externos.



Esta ventana solicita el número de la Hoja y el rango de las celdas de Excel donde se encuentra la información a ser subida. Una vez esta información es proporcionada y se da clic en el botón “Cargar”, la información procede a ser cargada en la tabla de la interfaz inicial llamada Datos.

Una vez se rectifican los datos debe seleccionarse de la lista de parámetros el parámetro al que hace referencia los datos cargados y dar clic en el botón “Cargar Datos” para que el programa almacene los datos. De ser necesario consultar cualquiera de los parámetros almacenados, basta con seleccionarlo de la lista de parámetros y dar clic en el botón “Consultar datos Cargados” para que la tabla “Datos” muestre los datos almacenados.

Por otro lado el subgrupo del interfaz inicial llamado “Parámetros del algoritmo” contiene los parámetros básicos necesarios para el funcionamiento del algoritmo como el número de soluciones que componen la población, la probabilidad de cruzamiento, la probabilidad de Mutación y el número de generaciones. Estos parámetros son parámetros que tienen una incidencia directa en la duración de la corrida del algoritmo y la calidad en el frente de pareto generado.

En el subgrupo del interfaz inicial llamado “Especificaciones Computador” se solicita el número de núcleos con los que cuenta el computador. La principal razón es el que el tiempo de procesamiento del prototipo de software con un solo núcleo incluso para instancias pequeñas del problema puede desembocar en varios minutos de operación.

Con esto en mente se adaptó la fase II de la metodología a un sistema de computación en paralelo, donde los computadores con mayores recursos computacionales pueden desarrollar las operaciones del algoritmo de la fase II en paralelo ayudando a reducir el tiempo total de solución. El mínimo número de núcleos aceptado es 1.

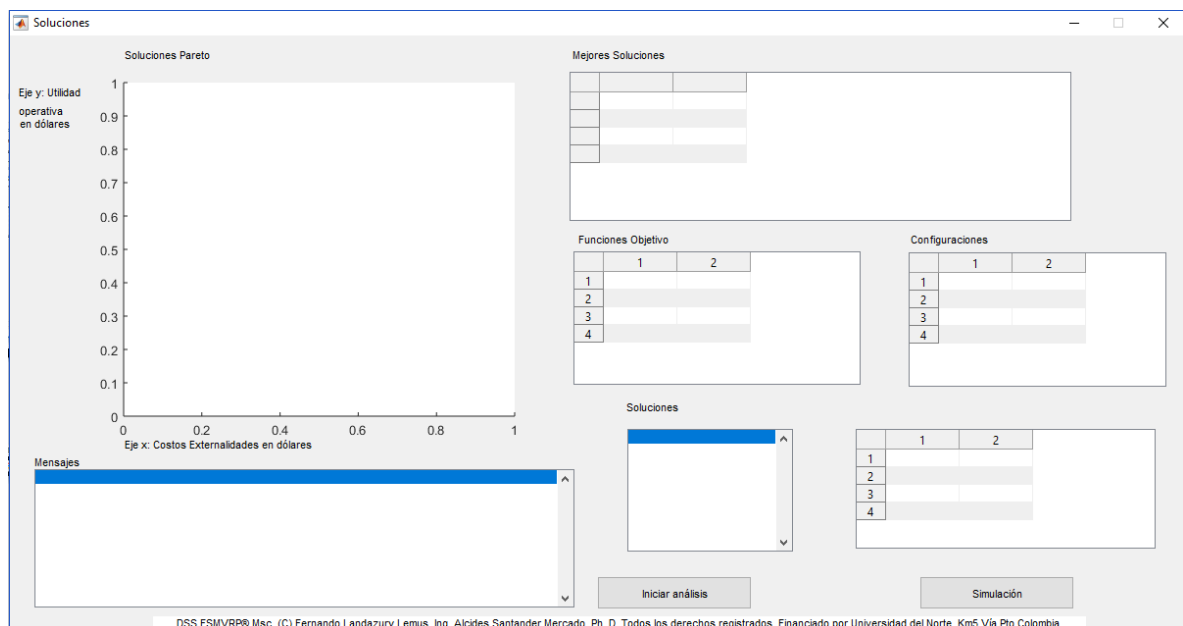
En el subgrupo “Generación de tipo de soluciones” se solicita que el usuario tome la decisión sobre el tipo de soluciones con las que debe conformarse la población inicial de soluciones.

Lo anterior ocurre a que el usuario podría decidir tener en cuenta soluciones con una flota de vehículos homogéneas o totalmente heterogéneas, de igual manera el usuario puede decidir restringir si las soluciones generadas son totalmente aleatorias (con configuraciones aleatorias) o si por el contrario solo admiten que tengan restricción el número del tipo embarcaciones que pueden pertenecer a la flota a lo largo del período de planeación.

Para dar un uso rápido a la herramienta se incluyeron en la pestaña archivo dos botones de cargue de datos. El primer botón “Cargue de datos Prueba” carga un set pequeño de posibles tipos de embarcaciones para probar el funcionamiento de la herramienta. Mientras que el botón “Cargue de datos reales” carga la información necesaria para el análisis desarrollado en el capítulo V de esta investigación.

Una vez todos los datos sean almacenados, podrá dar clic en el botón DSS-FSMVRP el cual nos llevara a la interfaz Soluciones como se muestra en **Ilustración 5**.

Ilustración 5 Interfaz soluciones que conjuga la fase I y II de la metodología propuesta.



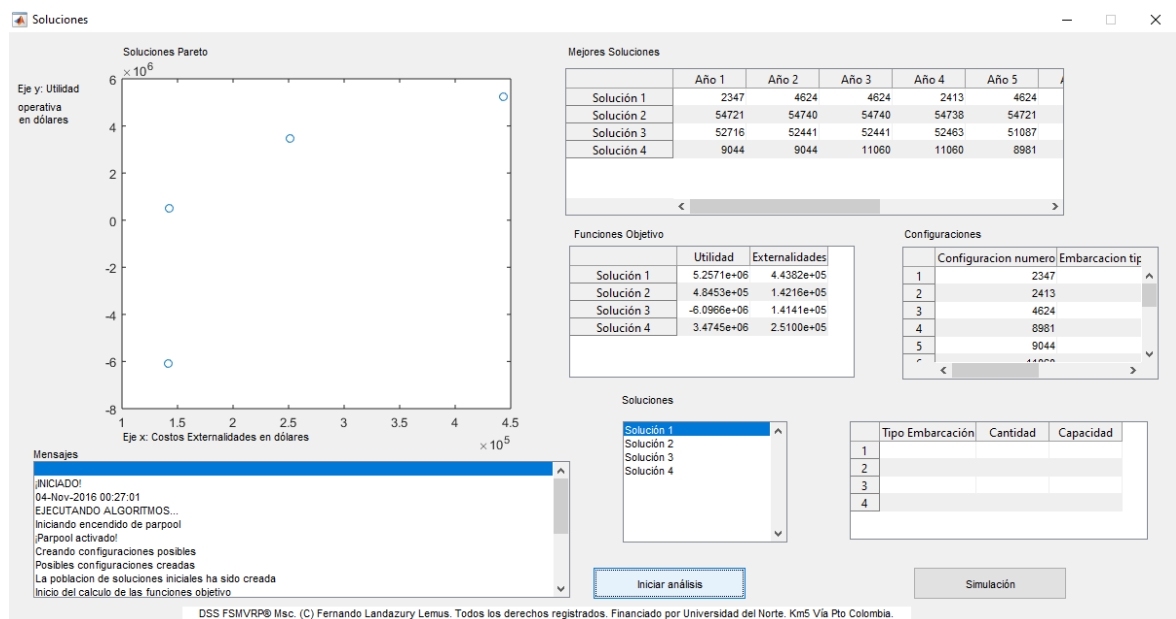
Si da clic en el botón “Iniciar análisis” el prototipo ejecutará la fase I y II de la metodología de solución propuesta. En el listado Mensajes, aparecerán los mensajes con el progreso del algoritmo corriendo. Los mensajes a su vez darán

aviso en la culminación de la fase I y II de la metodología. Una vez terminada el algoritmo generará el frente de pareto en la gráfica “Soluciones de pareto”.

En la tabla “Mejores Soluciones” depositará las soluciones codificadas dominantes, mientras que en la tabla “Funciones Objetivo” depositará el valor respectivo de las funciones objetivo para cada solución. La tabla configuraciones permite observar con que tipología de embarcación están compuestos las soluciones codificadas.

La lista Soluciones permite escoger las soluciones y en la tabla mostrar la composición de cuantas embarcaciones de que tipología y capacidad deberían adquirirse durante el período de planeación. La **Ilustración 6** muestra la interfaz tras haber ejecutado los algoritmos de la fase I y II para la instancia del problema real.

Ilustración 6 Vista de la interfaz Soluciones luego de haber ejecutado el algoritmo de la fase I y II



Una vez el análisis de la fase I y II es ejecutado, el usuario podrá dar clic en el botón “Simulation” ejecutando una nueva interfaz como la mostrada en la **Ilustración 7**.

Note que esta nueva interfaz contiene la información de la interfaz “Soluciones”. Es de suma importancia que de la lista de Soluciones se escoja la solución a simular, teniendo en cuenta que la fase III solo simula una solución a la vez.

De manera adicional esta interfaz solo contiene un subgrupo para introducir datos de entrada. La principal razón es que en esta interfaz se definen los datos de entrada para posteriormente ejecutar la fase III de la metodología propuesta.

La forma de cargar datos utiliza el mismo mecanismo que el explicado para la interfaz inicial del prototipo. Una vez los datos de entrada necesarios son cargados, podemos dar clic en el botón “Simular”. Este botón nos lleva a la última interfaz del programa llamada “Simulation_2” e igual a la mostrada en la **Ilustración 8**.

El botón “Simular” de esta interfaz ejecuta la fase III de la metodología diseñada y la lista de Mensajes anuncia la realización del análisis. La lista medidas de Desempeño una vez la simulación sea culminada arroja en la tabla las diferentes medidas a través de intervalos de confianza con nivel de confiabilidad escogido.

Ilustración 7 Interfaz Simulation

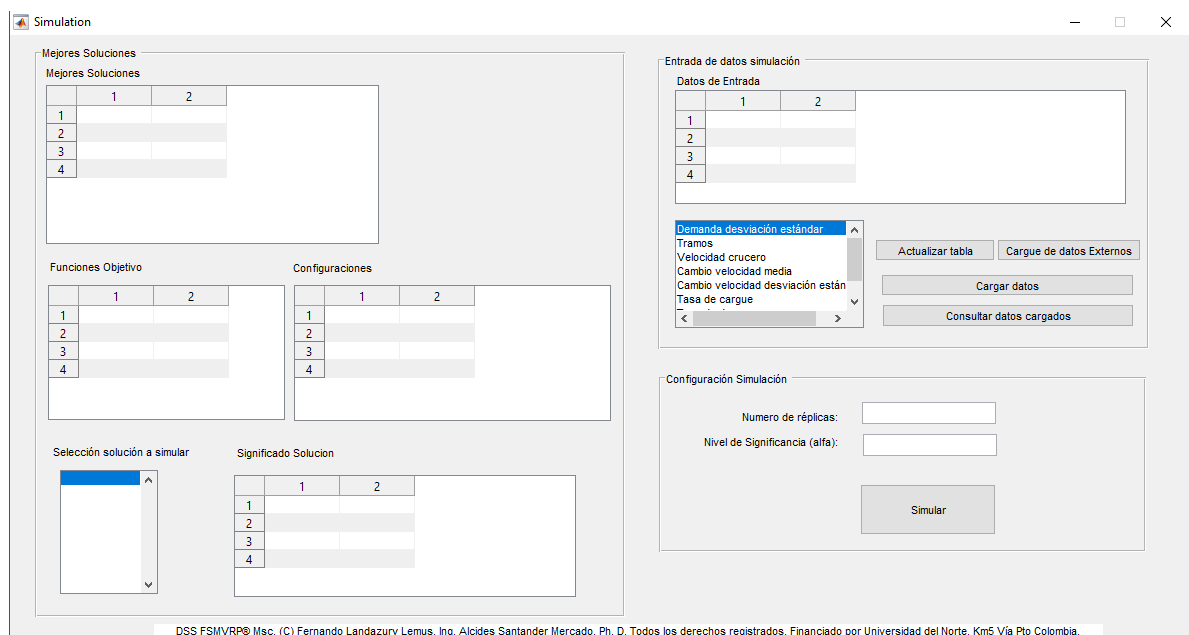
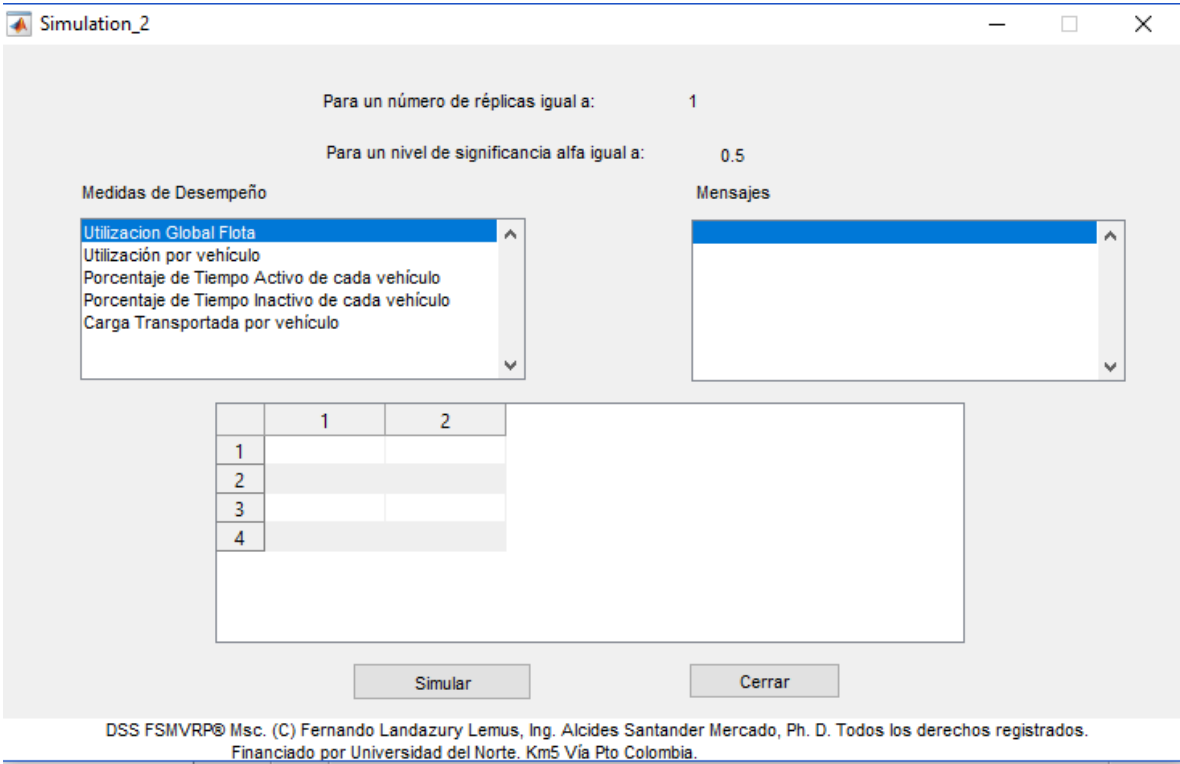


Ilustración 8 Interfaz Simulation_2. Contiene las medidas de desempeño de la flota simulada.



5. CAPITULO V. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

El siguiente capítulo presenta la experimentación y los resultados de la fase de evaluación del desempeño de la metodología propuesta de solución para el FSMVRP dinámico multiobjetivo haciendo especial énfasis en la fase I y fase II de la metodología, como fases de obtención de soluciones mejoradas.

A continuación inicialmente se presentaran los datos y se explicaran los por menores en la obtención de los mismos para la instancia del problema que se analizará, posteriormente se llevará a cabo la experimentación que calibrará los parámetros del algoritmo genético incluyendo factores de diseño categóricos como la distinta conformación de soluciones iniciales, por último se presentaran los resultados finales para la instancia del problema propuesto.

5.1. INSTANCIA DEL PROBLEMA

La instancia del problema a resolver en el marco de esta investigación hace parte del proyecto titulado "*Diseño de Plataformas Logísticas para transporte de contenedores en el río Magdalena*" el cual hace parte del macro proyecto "*Diseño e implementación de una plataforma virtual de gestión científica, tecnológica y de innovación para el mejoramiento de la eficiencia operativa del sistema logístico nacional con amplio impacto en el caribe colombiano, mediante el desarrollo de proyectos específicos en transporte, redes logísticas, integración de servicios (plataforma logística) y operación portuaria*" del programa LOGPORT y el cual fue desarrollado en conjunto con la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial (COTECMAR).

El papel de esta investigación en el marco del proyecto anteriormente mencionado es soportar el diseño de una embarcación en la selección de características de diseño que hagan atractiva en términos económicos y de inversión la adquisición de una embarcación de transporte de carga unitarizada (especialmente de contenedores) que opere en el río Magdalena como alternativa tecnológica para el actual sistema de transporte por el mismo medio como lo son las barcazas. Adelantando el proceso de planeación y de operación de la flota desde el diseño de alternativas comerciales para el transporte de carga.

El proceso de diseño de una embarcación está relacionado de manera directa con la realización de un modelo de síntesis, el cual relaciona variables sobre las condiciones de operación y el cual es alimentado a través de bases de datos de diseño para iniciar una búsqueda de las características de diseño de embarcaciones similares existentes para el uso y las condiciones de operación de la nueva embarcación a diseñar.

Este proceso resulta útil debido a que arroja resultados directos sobre las características de diseño que debe tener una nueva embarcación para unas

condiciones de operación descritas, no obstante, este modelo presenta serias deficiencias debido a que su principal análisis se limita a comparar los diseños históricos para restricciones operacionales similares a las que se sometería la nueva embarcación a diseñar pero que no va acompañado de un análisis de las operaciones reales.

Esto conlleva a que la decisión de diseño deba incluir un análisis que contenga un estudio de la demanda a transportar, condiciones de rutas y análisis sobre la adquisición y operación de una flota, así como la inclusión de variables que permitan disminuir el impacto del medio de transporte sobre la sociedad, permitiendo conectar el modelo de síntesis con la metodología presentada en esta investigación para soportar la toma de decisiones en el diseño de una embarcación con principal incidencia en la operación de transporte de carga contenedorizada en el río Magdalena.

De manera inicial el modelo de síntesis arrojó una base de datos de 522 embarcaciones con características de diseño como: eslora total, eslora de flotación (lwl), manga, puntal, calado, coeficiente de bloque, desplazamiento, velocidad, potencia, capacidad en TEU, estimación del costo de adquisición, estimación del costo de operación durante el ciclo de vida.

Estas 522 embarcaciones se ajustan a las condiciones de operación del río Magdalena como lo son los radios de curvatura y los niveles de calado durante todo el año en el río de acuerdo a las batimetrías suministradas por el Instituto de estudios Hidráulicos y ambientales (Ideha) y las mediciones del calado del río suministradas por la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena).

De esta base de datos de 522 embarcaciones fueron depuradas 455 embarcaciones, dejando 67 embarcaciones para ser analizadas por la metodología propuesta en esta investigación, de acuerdo a los siguientes criterios de dominancia:

- Una embarcación 1 domina a una embarcación 2, si la embarcación 1 posee mayor velocidad, menor costo estimado de construcción y menor costo estimado de operación que la embarcación 2.
- El criterio de dominancia debe establecerse para embarcaciones de capacidades iguales, asumiendo que una flota óptima puede ser heterogénea con una gran diversidad de embarcaciones de diferentes capacidades.

Los datos tomados especialmente de esta base de datos como input para el análisis a desarrollar en la metodología propuesta fueron la velocidad (Km/h), potencia (kW), capacidad (TEU), costos estimados de adquisición (USD/embarcación) y costo estimado de operación (USD/Km).

La estimación del costo de adquisición y el costo estimado de operación para cada embarcación fueron realizadas por COTECMAR, para los costos de adquisición incluyeron variables como el costo del acero, costo de outfitting, costo de maquinaria, un margen de ganancia y otros costos asociados a imprevistos en las construcción de la embarcación, mientras que los costos estimados de operación incluyeron variables como el costo de la tripulación, costo de vitalidad, costo de mantenimiento y reparación, costo de seguro, costo de combustible y costo de administración.

Los otros parámetros de input para la metodología propuesta para esta investigación fueron calculados a partir de las siguientes precisiones:

1. Ganancia ($USD / Km * TEU$): Este parámetro hace referencia al costo de flete directamente percibido por quien necesita transportar los contenedores a un destino. Este parámetro es calculado como el producto resultante entre los costos y un margen de utilidad como es presentado en la ecuación (23). El margen de utilidad utilizado es determinado a través de la simulación de cálculo del flete fluvial presentado por Felfle (2013) donde determina un margen del 24% como atractivo para los inversionistas.

$$Ganancia = Costos * (1 + \%Utilidad) \quad (23)$$

2. Factor de emisión de CO₂ (g/Km) y costo de emisiones de CO₂: Los factores de emisión fueron calculados a partir del consumo de combustible de cada embarcación como lo realizan Márquez y Cantillo (2013). Para el cálculo del consumo de combustible de cada embarcación se utilizó la potencia de diseño de cada embarcación y con ayuda de las tablas suministradas por Barrington (2016) se establecieron los niveles de consumo. Con respecto al costo de emisión de CO₂ se utilizó el costo utilizado por Márquez y Cantillo (2013).
3. Número de nodos, distancia entre nodos, tramos, cambios de velocidad, demanda y número de períodos de planeación: Fueron seleccionados dos nodos correspondientes a los puertos de Barranquilla y Barrancabermeja, lo anterior obedece a que la mayor cantidad de carga actual y proyectada movida fluvialmente se realiza principalmente entre estos puntos geográficos, para la determinación de la distancia entre nodos se utilizó la distancia boya a boya entre los dos puertos, mientras que para la determinación de los tramos, los cambios de velocidad por tramo, demanda y número de períodos de planeación se utilizó la información suministrada por Steer, Davies y Gleave (2013).

5.2. EXPERIMENTACIÓN

Se realizaron múltiples pruebas para validar el desempeño de la metodología propuesta para el FSMVRP dinámico multiobjetivo. Para mejorar el desempeño de la solución suministrada por la metodología en su fase I y II se diseñó un

experimento formal de modo que se pudieran calibrar los parámetros de ejecución del algoritmo genético.

Todos los experimentos fueron llevados a cabo en el mismo servidor con sistema operativo Windows Server 2012R2 y procesador Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2420 0 a 1.90 GHz (2 procesadores), 16 GB de memoria RAM y uso computación en paralelo de 12 núcleos para el cálculo de la función objetivo.

Los experimentos fueron realizados con la finalidad de descartar factores no significantes (parámetros de ejecución del algoritmo genético) para cada variable de respuesta. Dos variables de respuesta fueron seleccionadas, una por cada objetivo, que computan la diferencia entre frentes de pareto obtenidos entre un frente de pareto de referencia y los arrojados en cada una de las observaciones del experimento.

Por lo anterior las variables de respuesta se definen como $\Delta\%Utilidad$ y $\Delta\%Externalidades$ donde cada una representa el porcentaje de cambio (aumento o reducción) entre la máxima utilidad obtenida en el frente de pareto de una instancia y una solución de referencia y el mínimo costo de externalidades en el frente de pareto de la instancia y el mínimo costo de externalidades de una solución de referencia respectivamente para cada variable de respuesta. La ecuación (24) y (25) describen el cálculo de las variables de respuesta.

$Fobj_{1ins}$ = Valores de la función objetivo relativos a la utilidad percibida por operación de la flota, de las soluciones pertenecientes al frente de pareto de la instancia de experimentación actual.

$Fobj_{1ref}$ = Valores de la función objetivo relativos a la utilidad percibida por operación de la flota, de las soluciones pertenecientes al frente de pareto de referencia.

$Fobj_{2ins}$ = Valores de la función objetivo relativos a los costos de las externalidades de la flota, de las soluciones pertenecientes al frente de pareto de la instancia de experimentación actual.

$Fobj_{2ref}$ = Valores de la función objetivo relativos a los costos de las externalidades de la flota, de las soluciones pertenecientes del frente de pareto de referencia.

$$\Delta\%Utilidad = \frac{Max\{Fobj_{1ins}\} - Max\{Fobj_{1ref}\}}{Max\{Fobj_{1ref}\}} \quad (24)$$

$$\Delta\% \text{ Externalidades} = \frac{\text{Min}\{\text{Fob}_{2ref}\} - \text{Min}\{\text{Fob}_{2ins}\}}{\text{Min}\{\text{Fob}_{2ref}\}} \quad (25)$$

Los parámetros de ejecución del algoritmo genético y la inclusión de diversas formas de soluciones iniciales fueron considerados como factores de diseño dentro de la experimentación. Los factores y sus respectivos niveles se encuentran detallados en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Factores de diseño para el experimento de calibración de parámetros de ejecución del algoritmo genético.

Factores de diseño	Nivel Bajo	Nivel Alto
Tamaño de la población	10	100
Probabilidad de Cruzamiento	0,1	0,9
Probabilidad de Mutación	0,1	0,9
Número de generaciones	1	100
Aleatoriedad	Aleatorias Puras	Variedad Restringida
Homogeneidad	Homogéneas	Heterogéneas

Luego de definir las variables de respuesta y los factores de diseño se ejecuta un experimento 2⁶ con el fin de determinar las variables determinantes en la ejecución del algoritmo. Un total de 64 instancias con diferencias en los parámetros de ejecución fueron resueltas en orden aleatorio, los niveles usados, los resultados en las variables de respuesta y el orden de cada instancia son mostradas en la **Tabla 3**.

Tabla 3 Diseño de experimento para calibración de parámetros del algoritmo genético.

T_Pob ¹	P_Cruz ²	P_Mut ³	N_Gen ⁴	Alea ⁵	Hom ⁶	Δ%Util ⁷	Δ%Ext ⁸
100	0,1	0,1	100	1	2	-86,74	29,53
10	0,1	0,1	1	2	2	-71,22	-12,78
10	0,9	0,1	100	2	2	-79,34	-5,49
10	0,9	0,9	1	1	2	-79,34	-5,49

T_Pob ¹	P_Cruz ²	P_Mut ³	N_Gen ⁴	Alea ⁵	Hom ⁶	Δ%Util ⁷	Δ%Ext ⁸
100	0,1	0,9	100	2	2	-56,11	22,54
10	0,1	0,9	1	1	2	-89,61	-3,41
100	0,9	0,1	100	2	1	0	16,52
100	0,1	0,9	1	2	2	-35,14	28,02
100	0,1	0,1	1	2	1	15	20,92
10	0,9	0,9	100	2	2	-71,22	37,27
10	0,1	0,1	100	2	1	0	0
10	0,1	0,9	1	2	1	0	0
100	0,9	0,9	1	1	2	-35,14	28,02
10	0,9	0,1	100	2	1	0	0
10	0,9	0,9	100	1	1	0	-76,56
10	0,1	0,9	100	1	2	-89,61	-3,41
10	0,1	0,1	1	2	1	22,94	26,79
10	0,1	0,1	1	1	2	-89,61	-3,41
100	0,9	0,9	1	2	2	-35,14	28,02
100	0,1	0,1	100	2	2	-29,44	35,22
10	0,9	0,9	1	2	2	-71,22	-12,78
100	0,9	0,9	100	1	1	0	23,88
10	0,1	0,9	100	2	2	-71,22	-12,78
100	0,9	0,1	1	2	1	0	16,52
100	0,1	0,1	1	1	1	0	23,88
10	0,9	0,1	1	2	2	-71,22	-12,78
100	0,9	0,9	100	2	2	-29,67	35,22
10	0,9	0,9	100	2	1	0	0
10	0,1	0,9	1	1	1	0	-76,56

T_Pob ¹	P_Cruz ²	P_Mut ³	N_Gen ⁴	Alea ⁵	Hom ⁶	Δ%Util ⁷	Δ%Ext ⁸
100	0,1	0,1	1	2	2	-34,92	35,22
10	0,9	0,1	100	1	1	0	-76,56
100	0,9	0,1	100	2	2	-34,92	35,22
10	0,1	0,9	100	1	1	0	-76,56
100	0,9	0,9	1	2	1	0	16,52
100	0,1	0,1	100	2	1	0	16,52
10	0,9	0,1	1	1	1	0	-76,56
10	0,1	0,1	100	2	2	-71,22	-12,78
100	0,1	0,1	1	1	2	-87,36	17,64
100	0,1	0,9	100	1	1	40,91	23,94
10	0,1	0,1	1	1	1	0	-76,56
100	0,1	0,9	1	2	1	8,28	22,2
10	0,9	0,1	1	1	2	-89,61	-3,41
10	0,9	0,9	1	2	1	0	0
100	0,9	0,9	100	2	1	0	16,52
100	0,9	0,1	1	1	1	0	23,88
100	0,1	0,9	1	1	1	0	23,88
10	0,9	0,1	100	1	2	-89,61	-3,41
10	0,9	0,9	1	1	1	-9,85	10,98
10	0,9	0,1	1	2	1	-41,59	13,29
10	0,1	0,1	100	1	1	0	-76,56
100	0,1	0,9	100	2	1	0	16,52
10	0,1	0,9	100	2	1	0	0
10	0,1	0,9	1	2	2	-71,22	-12,78
100	0,1	0,9	1	1	2	-86,94	28,55

T_Pob ¹	P_Cruz ²	P_Mut ³	N_Gen ⁴	Alea ⁵	Hom ⁶	$\Delta\%Util$ ⁷	$\Delta\%Ext$ ⁸
100	0,1	0,9	100	1	2	-87,36	17,64
100	0,9	0,9	100	1	2	-87,36	22,59
100	0,1	0,1	100	1	1	1,79	16,73
100	0,9	0,9	1	1	1	0	23,88
100	0,9	0,1	1	2	2	-35,14	28,02
10	0,1	0,1	100	1	2	-89,61	-3,41
10	0,9	0,9	100	1	2	-177,8	23,27
100	0,9	0,1	1	1	2	-85,02	22,17
100	0,9	0,1	100	1	1	0	23,88
100	0,9	0,1	100	1	2	-87,36	17,64

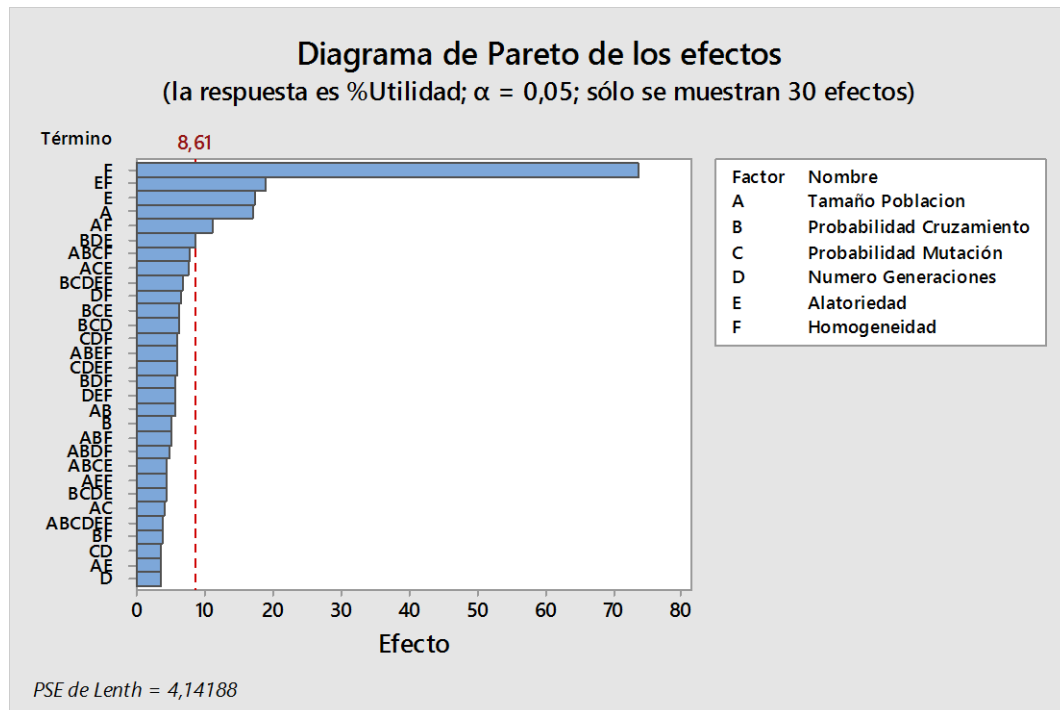
¹Tamaño de la población. ² Probabilidad de cruzamiento. ³ Probabilidad de mutación. ⁴ Número de generaciones. ⁵ Aleatoriedad. ⁶ Homogeneidad. ⁷ Porcentaje de cambio de la función de utilidad. ⁸ Porcentaje de cambio de la función de los costos externos.

5.2.1. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.

El análisis de esta sección está orientado a la calibración de los parámetros de ejecución del algoritmo genético de manera que se mejoren los resultados obtenidos por la metodología presentada en esta investigación. Los parámetros de ejecución definidos en el experimento como los 6 factores de diseño descritos en la sección anterior los cuales tienen un efecto directo sobre los resultados obtenidos en el algoritmo. El análisis de los resultados del experimento será realizado de manera independiente para cada una de las dos variables de respuesta definidas y los supuestos del modelo se pueden observar en los anexos en la **Gráfica 12** y **Gráfica 13**.

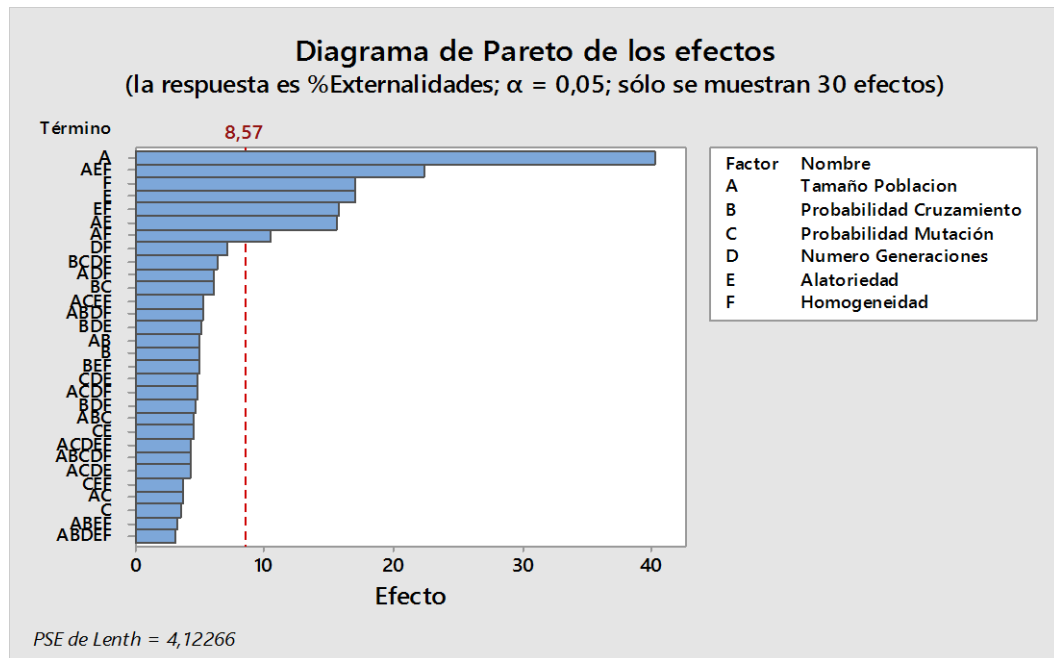
Los resultados del experimento relacionados con el mejoramiento de la utilidad operacional ($\Delta\%Utilidad$) muestran una relación de hasta tercer orden entre los factores de diseño presentados, mostrando como elementos significativos para explicar la variación en el $\Delta\%Utilidad$, el tamaño de la población, la aleatoriedad, la homogeneidad, las relaciones de segundo orden entre los factores de diseño como el tamaño de la población-homogeneidad y aleatoriedad-homogeneidad y la relación de tercer orden probabilidad de cruzamiento-número de generaciones-aleatoriedad tal y como se muestra en la **Gráfica 4**.

Gráfica 4 Gráfico de Pareto de los efectos para la variable de respuesta $\Delta\%Utilidad$



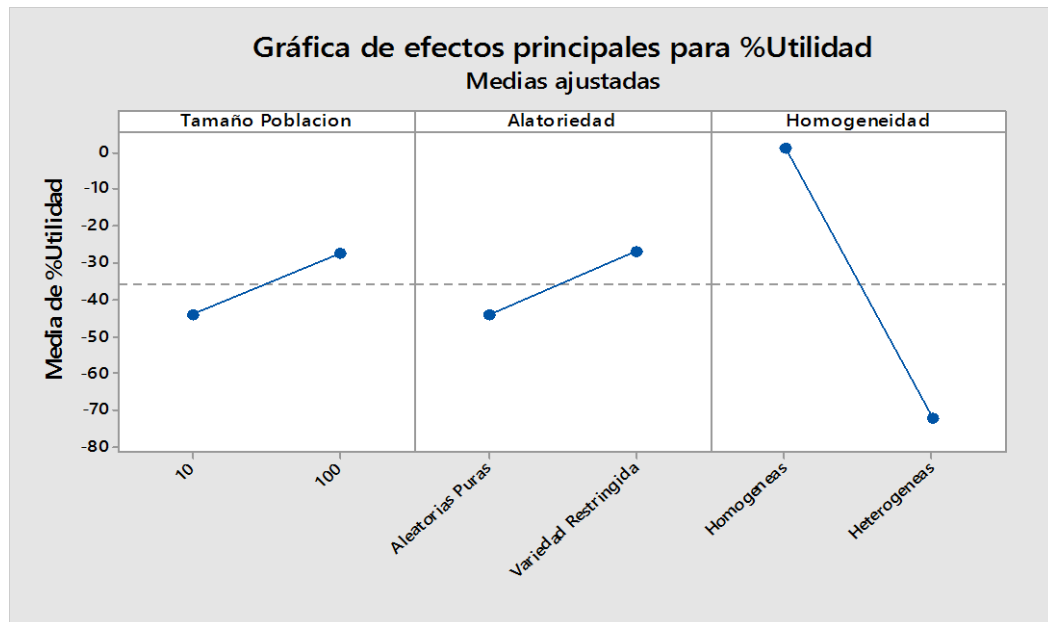
Los resultados del experimento relacionados con el mejoramiento de los costos de las externalidades ($\Delta\% Externalidades$) muestran una relación de hasta tercer orden entre los factores de diseño presentados, mostrando como elementos significativos para explicar la variación en el $\Delta\% Externalidades$ el tamaño de la población, la aleatoriedad, la homogeneidad, las relaciones de segundo orden entre los factores de diseño como el tamaño de la población-homogeneidad, aleatoriedad-homogeneidad y tamaño de la población-aleatoriedad y la relación de tercer orden tamaño de la población- aleatoriedad-homogeneidad tal y como se muestra en la **Gráfica 5**.

Gráfica 5 Grafico de Pareto de los efectos para la variable de respuesta $\Delta\%$ Externalidades

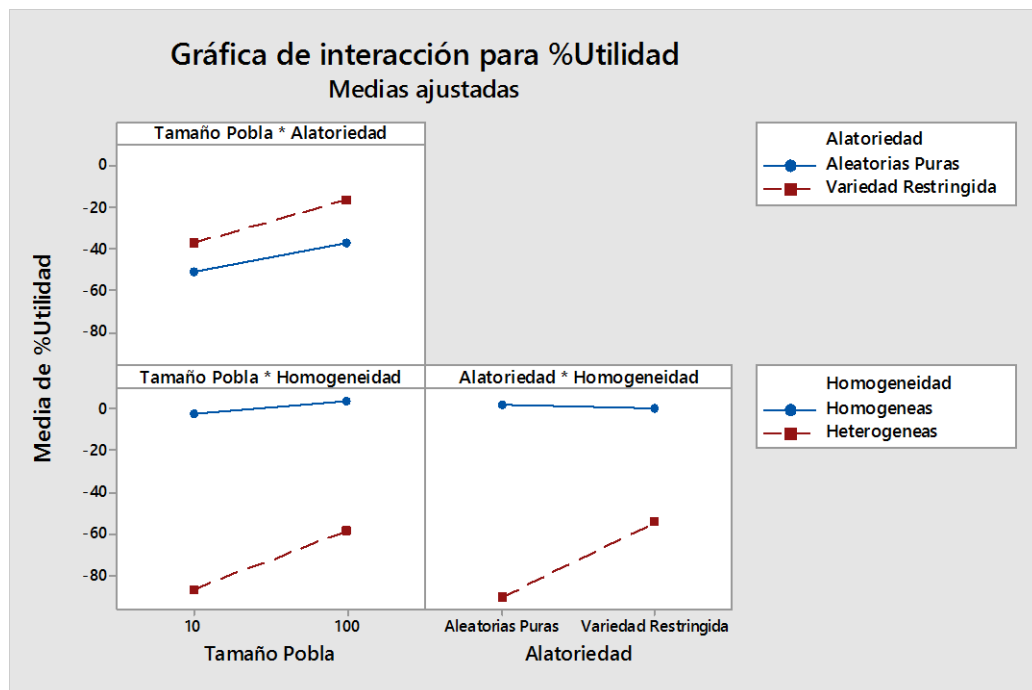


Los resultados del experimento indican que para incrementar el cambio en la utilidad es necesario incrementar el número de soluciones iniciales y la generación de soluciones con variedad restringida y homogéneas, la **Gráfica 6** y **Gráfica 7** muestran la dinámica de los factores significativos y niveles deseables para el incremento de $\Delta\%$ Utilidad. Por otro lado, para aumentar el incremento de $\Delta\%$ Externalidades es necesario aumentar el tamaño de la población y la generación de soluciones con variedad restringida y soluciones heterogéneas como lo indica la **Gráfica 8** y **Gráfica 9**. Note que los niveles para el factor de diseño homogeneidad van en contravía para mejorar cada variable de respuesta, mientras para incrementar el $\Delta\%$ Utilidad es necesario la incorporación de soluciones homogéneas y por otro lado para el incremento del $\Delta\%$ Externalidades es necesario la incorporación de soluciones heterogéneas.

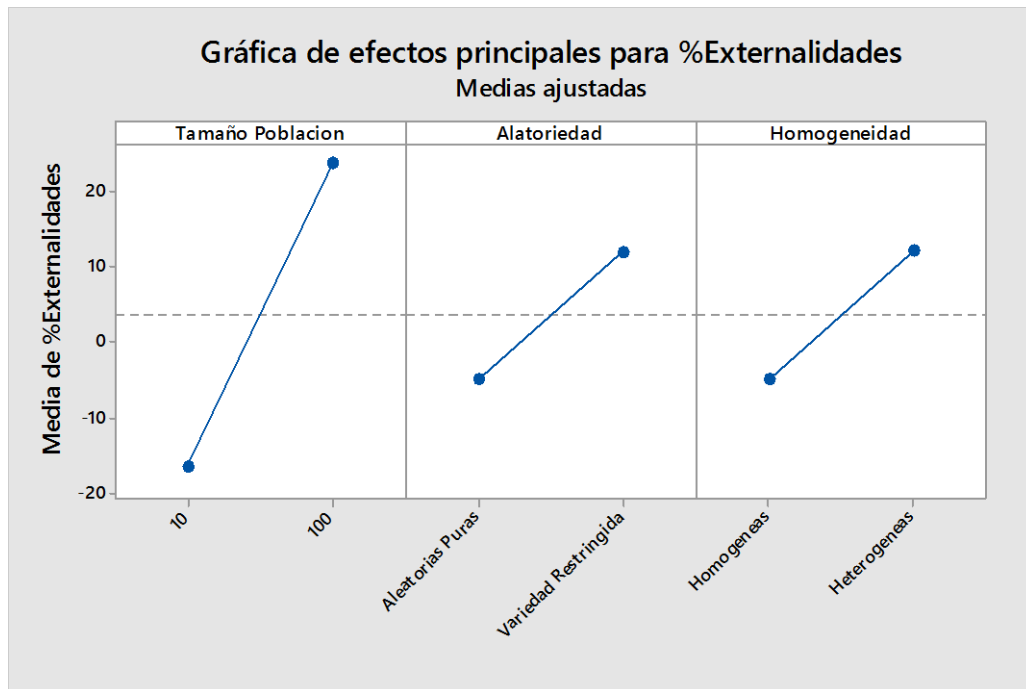
Gráfica 6 Gráfica de efectos principales para la variable de respuesta $\Delta\%$ Utilidad



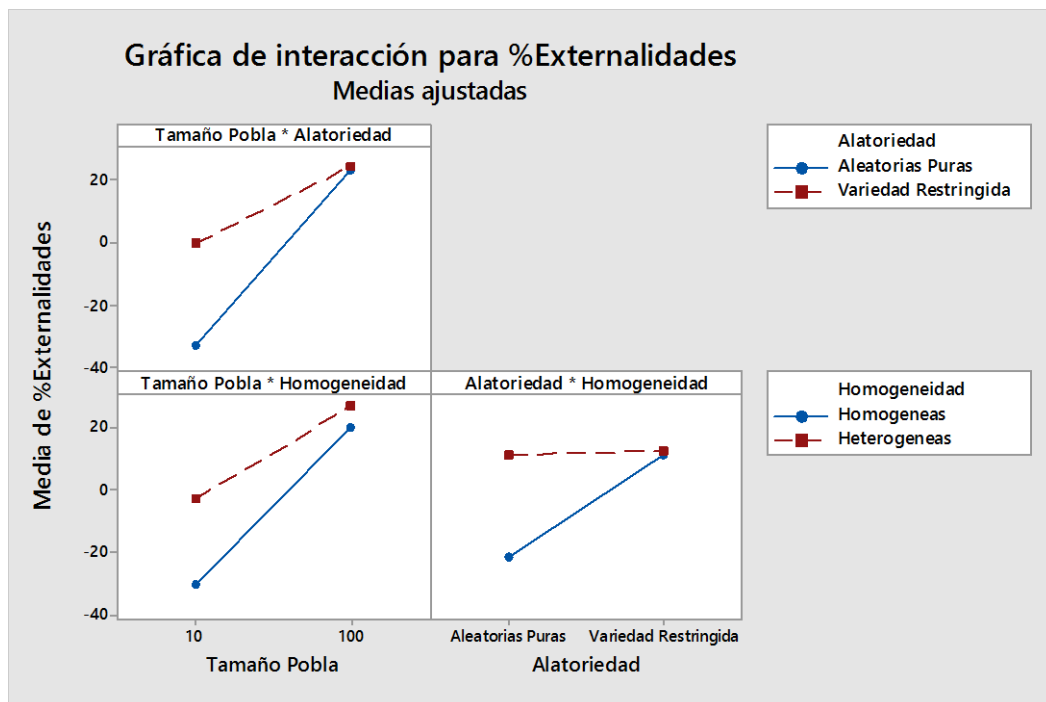
Gráfica 7 Gráfica de interacción para la variable de respuesta $\Delta\%$ Utilidad



Gráfica 8 Gráfica de efectos principales para la variable de respuesta Δ %Externalidades



Gráfica 9 Gráfica de interacción para la variable de respuesta Δ %Externalidades



Para seleccionar los parámetros del algoritmo genético que permitan mejorar el frente de Pareto con base en los resultados de la experimentación se utilizó el método del ascenso más pronunciado el cual consiste en establecer los niveles de los factores de diseño en la dirección en la que mejoran las variables de respuesta del experimento, los resultados de la ejecución de este método son mostrados en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Método del ascenso pronunciado para determinar parámetros del algoritmo

T_Pob ¹	P_Cruz ²	P_Mut ³	N_Gen ⁴	Alea ⁵	Hom ⁶	Δ%Util ⁷	Δ%Ext ⁸
25	0,1	0,1	1	2	1	0	0
50	0,1	0,1	1	2	1	11	21,21
75	0,1	0,1	1	2	1	-8,79	25,32
100	0,1	0,1	1	2	1	0	16,52
125	0,1	0,1	1	2	1	0	16,52
150	0,1	0,1	1	2	1	7,93	14,03
175	0,1	0,1	1	2	1	0	16,52
200	0,1	0,1	1	2	1	10,18	32,75
225	0,1	0,1	1	2	1	20,18	31,26
250	0,1	0,1	1	2	1	3,2	25,79
275	0,1	0,1	1	2	1	28,69	16,52
300	0,1	0,1	1	2	1	28,69	16,52
400	0,1	0,1	1	2	1	28,69	32,27
500	0,1	0,1	1	2	1	60,16	36,63
600	0,1	0,1	1	2	1	7,48	36,13

¹Tamaño de la población. ²Probabilidad de cruzamiento. ³Probabilidad de mutación. ⁴Número de generaciones. ⁵Aleatoriedad. ⁶Homogeneidad. ⁷Porcentaje de cambio de la función de utilidad. ⁸Porcentaje de cambio de la función de los costos externos.

El método de ascenso pronunciado permite identificar que con un tamaño de población de 500 soluciones probabilidad de cruzamiento y de mutación igual a 0,1,

una sola generación, inclusión de soluciones de variedad restringida y soluciones homogéneas, podemos aumentar la máxima utilidad operacional del frente de pareto en al menos 60% con respecto la solución de referencia, de igual manera podemos esperar una disminución cercana al 36% del costo de las externalidades de la flota con respecto a la solución de referencia.

5.3. RESULTADOS FINALES

De la sección anterior utilizando los parámetros calibrados obtenemos el frente de pareto mostrado en la **Gráfica 10** con funciones objetivo que se pueden observar en la **Tabla 5**, de igual manera la conformación de la flota de embarcaciones durante el período de planeación para cada solución del frente de pareto y las características de diseño de cada embarcación seleccionada son presentadas en la **Tabla 6** y **Tabla 7** respectivamente.

Gráfica 10 Frente de pareto con parámetros del algoritmo genético calibrados.

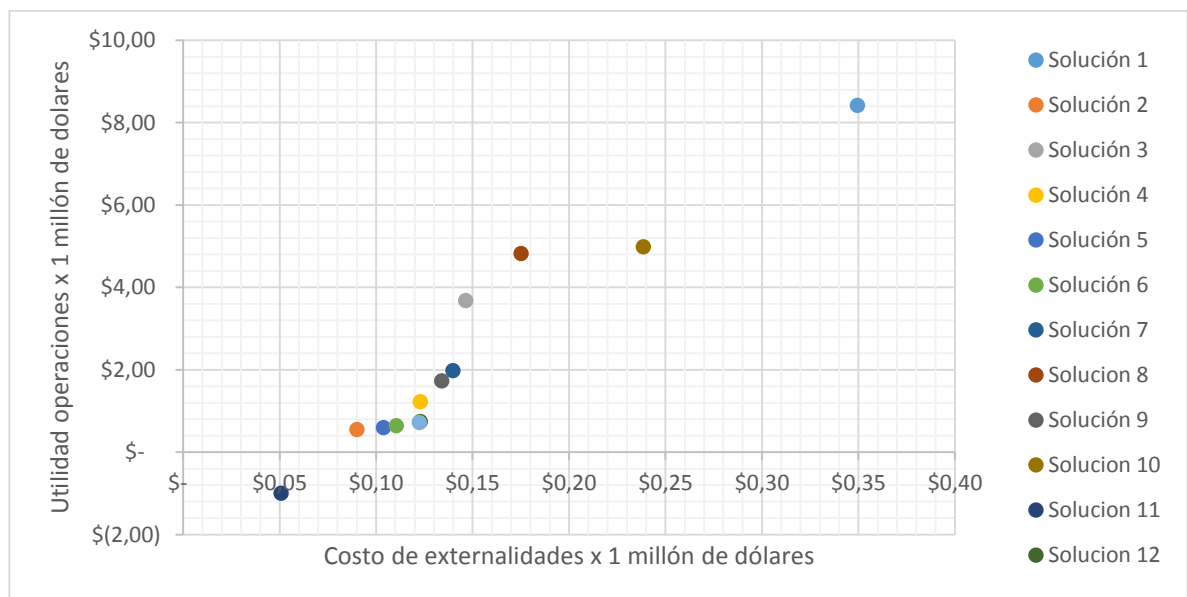


Tabla 5 Funciones Objetivo de las soluciones del frente de pareto

Solución	Utilidad Operacional	Costos Externalidades
1	\$ 8.419.900	\$ 349.410
2	\$ 550.020	\$ 90.092
3	\$ 3.686.800	\$ 146.450

Solución	Utilidad Operacional	Costos Externalidades
4	\$ 1.230.200	\$ 122.910
5	\$ 597.370	\$ 103.870
6	\$ 649.140	\$ 110.530
7	\$ 1.982.200	\$ 139.750
8	\$ 4.823.800	\$ 175.130
9	\$ 1.737.800	\$ 134.070
10	\$ 4.993.000	\$ 238.540
11	-\$ 996.050	\$ 50.823
12	\$ 750.480	\$ 122.860
13	\$ 722.690	\$ 122.360

Tabla 6 Soluciones del frente de pareto decodificadas representando conformación de la flota a través del período de planeación.

Solución	Período de planeación	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.
Solución 1	Año 1	8	3	0	0	0	0		
	Año 2	8	3	0	0	0	0		
	Año 3	8	3	0	0	0	0		
	Año 4	8	3	0	0	0	0		
	Año 5	8	3	0	0	0	0		
	Año 6	8	3	20	3	0	0		
	Año 7	8	3	20	6	0	0		
	Año 8	8	3	20	6	67	2		
	Año 9	8	3	20	6	67	2		
	Año 10	8	3	20	8	67	2		
Solución 2	Año 1	48	3	0	0	0	0		
	Año 2	48	3	29	3	0	0		
	Año 3	48	3	29	3	0	0		
	Año 4	48	6	29	3	0	0		
	Año 5	48	6	29	3	0	0		
	Año 6	48	6	29	3	0	0		

Solución	Período de planeación	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.
	Año 7	48	6	29	3	67	2		
	Año 8	48	9	29	3	67	2		
	Año 9	48	12	29	3	67	2		
	Año 10	48	14	29	3	67	2		
Solución 3	Año 1	26	3	0	0				
	Año 2	26	3	0	0				
	Año 3	26	6	0	0				
	Año 4	26	6	0	0				
	Año 5	26	6	0	0				
	Año 6	26	9	0	0				
	Año 7	26	9	0	0				
	Año 8	26	9	32	2				
	Año 9	26	9	32	4				
	Año 10	26	9	32	6				
Solución 4	Año 1	29	3	0	0	0	0		
	Año 2	29	6	0	0	0	0		
	Año 3	29	6	0	0	0	0		
	Año 4	29	6	67	2	0	0		
	Año 5	29	6	67	2	19	3		
	Año 6	29	6	67	2	19	3		
	Año 7	29	6	67	2	19	3		
	Año 8	29	6	67	2	19	3		
	Año 9	29	6	67	2	19	3		
	Año 10	29	6	67	2	19	3		
Solución 5	Año 1	54	3	0	0				
	Año 2	54	3	0	0				
	Año 3	54	6	0	0				
	Año 4	54	6	55	3				
	Año 5	54	6	55	3				
	Año 6	54	6	55	6				
	Año 7	54	6	55	6				
	Año 8	54	8	55	6				
	Año 9	54	8	55	8				
	Año 10	54	8	55	8				
Solución 6	Año 1	57	2	0	0	0	0	0	0
	Año 2	57	2	0	0	0	0	0	0

Solución	Período de planeación	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.
	Año 3	57	2	0	0	0	0	0	0
	Año 4	57	2	58	3	0	0	0	0
	Año 5	57	2	58	3	12	3	0	0
	Año 6	57	2	58	3	12	3	0	0
	Año 7	57	3	58	3	12	3	0	0
	Año 8	57	3	58	3	12	3	0	0
	Año 9	57	3	58	6	12	3	0	0
	Año 10	57	3	58	6	12	3	3	1
Solución 7	Año 1	52	3	0	0	0	0		
	Año 2	52	3	45	2	0	0		
	Año 3	52	3	45	2	0	0		
	Año 4	52	3	45	2	0	0		
	Año 5	52	3	45	2	0	0		
	Año 6	52	3	45	2	0	0		
	Año 7	52	3	45	2	0	0		
	Año 8	52	6	45	2	0	0		
	Año 9	52	6	45	2	67	2		
	Año 10	52	8	45	2	67	2		
Solución 8	Año 1	26	3	0	0	0	0		
	Año 2	26	3	56	2	0	0		
	Año 3	26	3	56	2	0	0		
	Año 4	26	3	56	2	0	0		
	Año 5	26	3	56	2	0	0		
	Año 6	26	3	56	2	0	0		
	Año 7	26	3	56	5	0	0		
	Año 8	26	3	56	5	0	0		
	Año 9	26	3	56	5	0	0		
	Año 10	26	3	56	5	67	2		
Solución 9	Año 1	57	3	0	0	0	0		
	Año 2	57	3	55	2	0	0		
	Año 3	57	3	55	2	0	0		
	Año 4	57	3	55	2	0	0		
	Año 5	57	3	55	4	0	0		
	Año 6	57	3	55	4	0	0		
	Año 7	57	3	55	4	67	2		
	Año 8	57	3	55	4	67	2		

Solución	Período de planeación	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.
	Año 9	57	3	55	4	67	2		
	Año 10	57	3	55	4	67	2		
Solución 10	Año 1	58	3	0	0				
	Año 2	58	3	0	0				
	Año 3	58	4	0	0				
	Año 4	58	4	0	0				
	Año 5	58	4	0	0				
	Año 6	58	4	0	0				
	Año 7	58	4	31	3				
	Año 8	58	4	31	4				
	Año 9	58	4	31	4				
	Año 10	58	4	31	4				
Solución 11	Año 1	0	0						
	Año 2	0	0						
	Año 3	0	0						
	Año 4	0	0						
	Año 5	0	0						
	Año 6	0	0						
	Año 7	0	0						
	Año 8	0	0						
	Año 9	0	0						
	Año 10	19	1						
Solución 12	Año 1	54	2	0	0	0	0		
	Año 2	54	2	0	0	0	0		
	Año 3	54	2	0	0	0	0		
	Año 4	54	2	55	3	0	0		
	Año 5	54	2	55	3	0	0		
	Año 6	54	2	55	3	67	2		
	Año 7	54	2	55	6	67	2		
	Año 8	54	2	55	6	67	2		
	Año 9	54	2	55	6	67	2		
	Año 10	54	2	55	6	67	2		
Solución 13	Año 1	57	3	0	0	0	0		
	Año 2	57	3	27	1	0	0		
	Año 3	57	3	27	1	60	3		
	Año 4	57	3	27	1	60	6		

Solución	Período de planeación	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.	ID	Cant.
	Año 5	57	6	27	1	60	6		
	Año 6	57	6	27	1	60	6		
	Año 7	57	9	27	1	60	6		
	Año 8	57	9	27	1	60	6		
	Año 9	57	9	27	1	60	6		
	Año 10	57	9	27	1	60	6		

Tabla 7 Características de diseño de las embarcaciones seleccionadas en cada solución

Soluciones	ID	Esl ¹ (m)	Lwl (m)	Man ² (m)	Punt ³ (m)	Cal ⁴ (m)	Desp ⁵ (ton)	Vel ⁶ (nudos)	Pot ⁷ (kw)	TEU
Solución 1	8	51,6	49,1	8,6	3,5	1,5	509,4	4,25	71,39	16
	20	55,7	52,9	8,6	3,5	1,4	528,9	6,25	200,15	20
	67	74,0	70,3	12,	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 2	29	57,7	54,9	11,1	3,5	1,3	715,9	5,25	145,37	30
	48	69,9	66,5	11,1	3,5	1,5	944,9	4,25	102,01	42
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 3	26	51,6	49,1	9,9	2,3	1,4	612,2	4,25	79,09	24
	32	57,7	54,9	11,1	3,5	1,5	757,2	4,25	98,44	30
Solución 4	19	55,7	52,9	8,65	2,3	1,4	512,9	6,25	194,08	20
	29	57,7	54,9	11,1	3,5	1,3	715,9	5,25	145,37	30
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 5	54	72,0	68,4	11,1	3,5	1,6	1037	4,25	122,39	48
	55	72,0	68,4	11,1	3,5	1,6	1007	4,75	164,53	48
Solución 6	3	45,5	43,3	7,4	2,3	1,4	358,7	6,25	162,18	12
	12	45,5	43,3	9,9	2,3	1,3	473,5	5,75	158,34	18
	57	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	4,75	145,76	48
	58	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	5,25	197,5	48
Solución 7	45	69,9	66,5	11,1	3,5	1,4	907,8	5,75	219,17	42
	52	63,8	60,7	12,4	3,5	1,5	1016	4,25	121,82	48
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 8	26	51,6	49,1	9,9	2,3	1,4	612,3	4,25	79,09	24
	56	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	4,75	145,76	48
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 9	55	72,0	68,4	11,1	3,5	1,6	1007	4,75	164,53	48

Soluciones	ID	Esl ¹ (m)	Lwl (m)	Man ² (m)	Punt ³ (m)	Cal ⁴ (m)	Desp ⁵ (ton)	Vel ⁶ (nudos)	Pot ⁷ (kw)	TEU
	57	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	4,75	145,76	48
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 10	31	57,7	54,9	11,1	3,5	1,4	728,1	4,75	119,39	30
	58	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	5,25	197,5	48
Solución 11	19	55,7	52,9	8,6	2,3	1,4	512,9	6,25	194,08	20
Solución 12	55	72,0	68,4	11,1	3,5	1,6	1037	4,25	122,39	48
	54	72,0	68,4	11,1	3,5	1,6	1007	4,75	164,53	48
	67	74,0	70,3	12,4	3,5	1,6	1221	5,75	355,28	64
Solución 13	25	51,6	49,1	9,9	2,3	1,4	561,2	6,25	231,58	24
	57	72,0	68,4	11,1	3,5	1,5	1001	4,75	145,76	48
	60	67,9	64,5	12,4	3,5	1,6	1120	4,75	198,78	56

¹Eslora total. ²Manga. ³Puntal. ⁴Calado. ⁵Desplazamiento. ⁶Velocidad. ⁷Potencia

Del frente de Pareto construido hay tres soluciones especialmente llamativas por la región que ocupan del frente de Pareto, la solución 3, Solución 8 y la solución 10, estas soluciones contienen un diferencial en el objetivo de utilidad y aunque presentan un incremento en los costos de las externalidades este costo no se incrementó en la misma proporción al incremento en la utilidad.

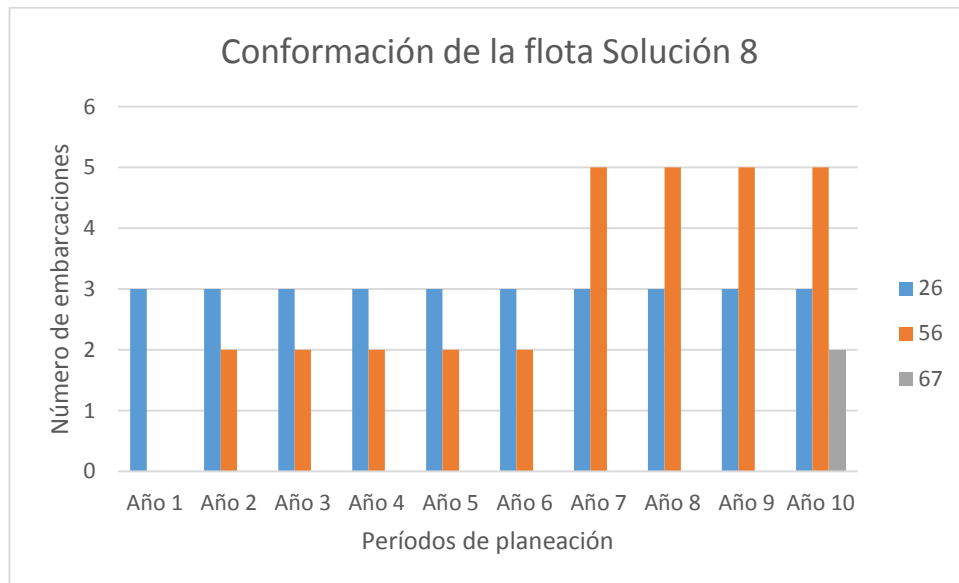
De estas tres soluciones representativas se escoge la Solución 8 la cual representa un punto medio entre las tres soluciones llamativas y con el fin de analizar la embarcación cuyas características de diseño pueden ser operacionalmente atractivas para la construcción de una embarcación se procede a realizar la simulación de esta solución, uno de los indicadores más importantes es el porcentaje promedio de utilización de los vehículos el cual indica con respecto a los años en promedio el porcentaje de la capacidad total de la embarcación será utilizada, los resultados de esta medida de desempeño para la Solución 8 se muestran en la **Tabla 8** y la gráfica de la conformación de la flota durante el período de planeación para la Solución 8 se muestra en la **Gráfica 11**.

Tabla 8 Porcentaje promedio de utilización de los vehículos de la flota de transporte durante el período de planeación

ID	Utilización de la Embarcación		
	Intervalo Inferior	Media	Intervalo Superior
26	74%	75%	75%
26	74%	74%	75%
26	73%	74%	75%
56	64%	64%	65%

ID	Utilización de la Embarcación		
	Intervalo Inferior	Media	Intervalo Superior
56	63%	63%	64%
56	31%	31%	31%
56	30%	31%	31%
56	30%	30%	31%
67	10%	10%	10%
67	10%	10%	10%

Gráfica 11 Conformación de la flota de embarcaciones de la Solución 8 a lo largo del período del período de planeación.



Se puede evidenciar que la embarcación de mayor utilización promedio durante el período de planeación es la embarcación de ID 26 la cual representa una embarcación de capacidad de 24 TEU. No obstante, de la **Gráfica 11** se puede observar con atención que la tendencia es que a partir que aumenta la demanda se incrementa el número de embarcaciones de ID 56 que posee una capacidad de 48 TEU, lo que indica que estás embarcación se convierte en el tipo de embarcación dominante en la flota para la proyección de demanda presentada y que por lo tanto se recomienda escoger las características de diseño de la embarcación de ID 56.

Tal y como se mencionó en la sección 5.1 de manera fundamental la aplicación de esta investigación y de la instancia del problema solucionado soporta la planeación de la capacidad desde el diseño de los vehículos, para los cuales existe una metodología conocida como modelo de síntesis, la cual en una primera etapa

selecciona embarcaciones de una base de datos histórica para de manera posterior bajo criterios, se compara la solución obtenida contra la arrojada por el modelo de síntesis la cual puede observarse en la **Tabla 9**.

Tabla 9 Comparativo entre métodos de solución

Método	Metodología propuesta	Modelo de síntesis
Niveles de contenedores	2	2
Eslora total (m)	72,00	59,8
Lwl (m)	68,40	56,81
Manga (m)	11,15	12,4
Puntal (m)	3,5	2,3
Calado (m)	1,5	1,6
Coefficiente de bloque	0,900	0,9
Desplazamiento (ton)	1029,60	1014
Velocidad (nudos)	4,25	6,25
Potencia (kw)	108	404
TEU's	48	48
Costo de adquisición (USD)	\$ 7.262.906,17	\$ 7.579.582
Incremento	4%	

Note que la solución aportada por la metodología propuesta varía en características de diseño como la potencia y por ende la velocidad, la principal razón es por la inclusión del objetivo de perseguir una flota que minimice los costos de las externalidades, por otro lado note que la embarcación propuesta por la metodología diseñada en esta investigación presenta un ahorro del 4% en el precio de adquisición con respecto a la embarcación presentada por el modelo de síntesis.

La principal razón por la que la metodología proporciona una solución similar en capacidad a la propuesta por el modelo de síntesis se puede explicar debido a la instancia del problema (2 nodos en la red) por lo que la solución se concentra en la convergencia de una solución, no obstante, note que la metodología discutida en esa investigación escoge una embarcación con características de diseño que mejoran en el segundo objetivo perseguido por esta investigación con relación a la solución proporcionada por el modelo de síntesis.

6. CAPITULO VI. ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN

Tal y como se mencionó en el planteamiento del problema de esta investigación la planeación de negocios basados en sistemas de transporte debe capturar una realidad dinámica de manera que mejore la eficiencia operativa y a su vez reduzca el impacto de los medios de transporte en la sociedad. El uso de herramientas para la toma de decisiones puede ser un factor determinante para el incremento de la eficiencia de los modelos de negocio basados en transporte a través del análisis de la información en tiempo real y soportando el proceso de planeación de las operaciones de la flota. No obstante, para conseguir una herramienta que pueda arrojar soluciones robustas deben existir otros elementos dentro de la planificación que pueden y deben ser tenidos en cuenta para la conformación de una herramienta que incluyan elementos de la flota de transporte más reales, algunos de estos elementos son:

- La inclusión de restricciones operacionales en los nodos de carga como la capacidad de vehículos que admite en un período de tiempo, ventanas de tiempo para el transporte de carga y problemas en el acceso a estos nodos.
- La inclusión de variables de falla y períodos de no disponibilidad de vehículos en la flota por reparaciones y/o mantenimientos.
- Modelación de participación de la competencia.
- Proyecciones de la demanda teniendo en cuenta diversos escenarios económicos.
- Predicciones del estado de la infraestructura que pueden dificultar las operaciones de la flota.

La metodología de solución propuesta en esta investigación y los algoritmos construidos alrededor de la misma adaptados en forma de prototipo de software son solo la base para el desarrollo de un sistema para la toma de decisiones robusto que soporte la planificación de flotas y pueda proporcionar soluciones para múltiples sistemas teniendo información en tiempo real sobre la operación y adoptando modelos que arrojen soluciones para múltiples modos de transporte, sin embargo, la implementación de la metodología propuesta debe contemplar los siguientes procesos antes de convertirse en una herramienta exitosa. A continuación se resumen las cuatro fases.

6.1. FASE DE IMPLEMENTACIÓN 1: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

En esta fase se trata de caracterizar o retratar de la manera más fiel a la realidad el sistema de manejo de carga y las condiciones de operación para distintos modos de transporte con el fin de incluir parámetros aún más realistas en sistema para la toma de decisiones a diseñar, la mayoría de estos parámetros deben estar directamente ligadas con las restricciones operacionales de los nodos de demanda, así como algunos elementos del tipo de servicio a prestar a diferentes nodos.

6.2. FASE DE IMPLEMENTACIÓN 2: MINERÍA DE DATOS Y MACHINE LEARNING

La herramienta para la toma de decisiones a diseñar se fundamenta en algoritmos de optimización los cuales necesitan ser alimentados principalmente información sobre la distribución geográfica de nodos, sobre la demanda de transporte de carga interno y externo en la zona de operación y el tipo de carga transportada y sobre el estado de la infraestructura que permite la operación de la flota entre dos nodos.

Para lograr lo anteriormente descrito es importante que la metodología de solución se integre con algoritmos de minería de datos que puedan modelar y ayudar a predecir el comportamiento de la demanda y el estado de la infraestructura, así como la incorporación de algoritmos de machine learning de manera de introducir una función de aprendizaje a los algoritmos de optimización que permitan la obtención de mejores resultados.

6.3. FASE DE IMPLEMENTACIÓN 3: DESARROLLO Y DISEÑO DE SOFTWARE

Debe diseñarse y desarrollarse un software que contenga la caracterización realizada en la fase uno, las adaptaciones de procesamiento de información de entrada de la fase dos y la metodología presentada en esta investigación de manera que pueda darse acceso a implementación industrial.

6.4. FASE DE IMPLEMENTACIÓN 4: VALIDACIÓN E IMPLEMENTACIÓN FINAL.

En esta fase la validación debe realizarse resolviendo instancias simuladas e instancias del problema con datos históricos. Un proceso de comparación del desempeño de la herramienta construida a partir de información histórica obtenida de planes ejecutados versus el plan construido por la herramienta. De ser necesarios ajustes en el software o en los algoritmos diseñados, los mismos deberán ser ejecutados en esta fase. Una fase final de la implementación a su vez debe tener en cuenta factores directamente relacionados con las personas que hacen uso del software como la resistencia al cambio, entrenamiento y perfiles profesionales.

7. CONCLUSIONES.

Para esta investigación fue desarrollada una revisión de la literatura relacionada con el problema de ruteo, dimensionamiento y mezcla de flotas de vehículos que permitió caracterizar los métodos actuales de dimensionamiento de flotas de transporte y a partir del análisis realizado de la revisión literaria se encontraron que solo el 9% de las fuentes consultadas aborda el problema a través de un análisis multiobjetivo y de este grupo tan solo el 9% ha decidido estudiar el problema de maximización de las utilidades y la minimización del impacto medioambiental, de manera adicional no existe investigación que haya propiamente abordado el FSMVRP teniendo en cuenta elementos de estocasticidad en las condiciones de operación y a su vez en la demanda bajo una misma metodología de solución, por lo que esta investigación reduce .

Este trabajo de investigación desarrolla una metodología de solución al FSMVRP dinámico multi-objetivo la cual maximiza las utilidades y minimiza los costos externos de la flota de transporte teniendo en cuenta las condiciones de operación de la flota de vehículos y elementos estocásticos como la demanda de carga. De manera precisa la metodología propuesta en su fase II diseña un algoritmo de solución basado en programación dinámica para la asignación de rutas a los vehículos pertenecientes a la flota que maximice la utilidad percibida por operación de la flota, esta metodología soporta de manera constante el cálculo de las funciones de utilidad y de los costos de las externalidades.

La fase I de la metodología de solución propuesta en esta investigación resuelve el problema de asignación de embarcaciones para cada período de planeación a través de un algoritmo genético, el cual codifica las soluciones inspirado en la política de adquisición de vehículos de un problema de programación dinámica.

La fase III aborda el desempeño operativo de una flota de transporte a través de una simulación y la inclusión de estocasticidad en la demanda y en las condiciones de operación.

Se efectuaron experimentos de calibración de los parámetros del algoritmo genético para una instancia del problema que permita soportar la escogencia de las características de diseño atractivas teniendo en cuenta la dinámica operativa de la flota de transporte de posibles candidatas de diseño. Los resultados obtenidos en la experimentación y en la ejecución del método del máximo ascenso para la calibración de los parámetros del algoritmo permitieron dar como solución a la aplicación de esta herramienta dentro de la etapa de diseño a la selección de un buque portacontenedores de capacidad de 48 TEU con una reducción del 4% en los costos de adquisición contra la solución desarrollada por el modelo de síntesis, validando de esta manera la metodología de solución propuesta.

El trasfondo final del desarrollo de la metodología de solución presentada en esta investigación es proveer un método para la toma de decisiones que soporte la planeación de capacidad de las flotas de transporte equilibrando la utilidad esperada por los inversionistas de la flota y el impacto negativo de la operación de la flota sobre la sociedad. La metodología propuesta y el prototipo presentado pueden servir como base para el desarrollo de un software que soporte la toma de decisiones en lo relativo a la planeación de adquisición de flotas. La implementación del software construido a partir de esta investigación se espera impacte de manera positiva en la planeación de adquisición de vehículos y en procesos de selección de características de diseño para flotas de transporte de carga.

8. REFERENCIAS

- Avramovich, D., Cook, T. M., Langston, G. D., & Sutherland, F. (1982). A decision support system for fleet management: A linear programming approach. *Interfaces*, 12(3), 1-9.
- Bakkehaug, R., Eidem, E. S., Fagerholt, K., & Hvattum, L. M. (2014). A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 60-76.
- Bakkehaug, R., Rakke, J. G., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2015). An adaptive large neighborhood search heuristic for fleet deployment problems with voyage separation requirements. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges* (pp. 3-27). Springer US.
- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2009). Valid inequalities for the fleet size and mix vehicle routing problem with fixed costs. *Networks*, 54(4), 178-189.
- Barrington, S. (2016). *Fuel Consumption issues, formulae and tables*. Recuperado de: <http://www.barringtondieselclub.co.za/technical/fuel-consumption.html>.
- Belanger, N., Desaulniers, G., Soumis, F., & Desrosiers, J. (2006). Periodic airline fleet assignment with time windows, spacing constraints, and time dependent revenues. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1754-1766.
- Bertsekas, D. P., Bertsekas, D. P., Bertsekas, D. P., & Bertsekas, D. P. (1995). *Dynamic programming and optimal control* (Vol. 1, No. 2). Belmont, MA: Athena Scientific.
- Bertsimas, D. J., & Simchi-Levi, D. (1996). A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, 44(2), 286-304.
- Bojović, N. J. (2002). A general system theory approach to rail freight car fleet sizing. *European Journal of Operational Research*, 136(1), 136-172.
- Bookbinder, J. H., & Reece, K. E. (1988). Vehicle routing considerations in distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 37(2), 204-213.

- Branchini, R. M., Armentano, V. A., & Morabito, R. (2015). Routing and fleet deployment in liner shipping with spot voyages. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 57, 188-205.
- Brandao, J. C. S., & Mercer, A. (1998). The multi-trip vehicle routing problem. *Journal of the Operational research society*, 49(8), 799-805.
- Brandão, J. (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 195(3), 716-728.
- Brandão, J. (2011). A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(1), 140-151.
- Bräysy, O., Dullaert, W., Hasle, G., Mester, D., & Gendreau, M. (2008). An effective multirestart deterministic annealing metaheuristic for the fleet size and mix vehicle-routing problem with time windows. *Transportation Science*, 42(3), 371-386.
- Bräysy, O., Porkka, P. P., Dullaert, W., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2009). A well-scalable metaheuristic for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8460-8475.
- Brønmo, G., Christiansen, M., Fagerholt, K., & Nygreen, B. (2007). A multi-start local search heuristic for ship scheduling—a computational study. *Computers & Operations Research*, 34(3), 900-917.
- Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimarans, D., Riera, D., & Juan, A. A. (2015). Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(2), 32.
- Chandra, S., Fagerholt, K., & Christiansen, M. (2015). Maritime fleet deployment in ro-ro shipping under inventory constraints. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 189, 362-375.
- Chang, K. H., Huang, Y. H., & Yang, S. P. (2014). Vehicle fleet sizing for automated material handling systems to minimize cost subject to time constraints. *IIE Transactions*, 46(3), 301-312.
- Choi, E., & Tcha, D. W. (2007). A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(7), 2080-2095.

- Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation science*, 38(1), 1-18.
- Cortés, C. E., Gendreau, M., Leng, D., & Weintraub, A. (2011). A simulation-based approach for fleet design in a technician dispatch problem with stochastic demand. *Journal of the Operational Research Society*, 62(8), 1510-1523.
- Couillard, J. (1993). A decision support system for vehicle fleet planning. *Decision Support Systems*, 9(2), 149-159.
- Couillard, J. E. A. N., & Martel, A. L. A. I. N. (1990). Vehicle fleet planning the road transportation industry. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 37(1), 31-36.
- Crary, M., Nozick, L. K., & Whitaker, L. R. (2002). Sizing the US destroyer fleet. *European Journal of Operational Research*, 136(3), 680-695.
- Dantzig, G. B., & Fulkerson, D. R. (2003). Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. *The Basic George B. Dantzig*, 91.
- Kirby, D. (1959). Is your fleet the right size?. *Journal of the Operational Research Society*, 10(4), 252-252.
- Dell'Amico, M., Monaci, M., Pagani, C., & Vigo, D. (2007). Heuristic approaches for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 41(4), 516-526.
- Departamento Nacional de Planeación. (2013, 6 de Noviembre). Plan para restablecer la navegabilidad del río Magdalena. (Documento CONPES 3758). Bogotá D.C., Colombia: DNP.
- Desrochers, M., & Verhoog, T. W. (1991). A new heuristic for the fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 18(3), 263-274.
- Diana, M., Dessouky, M. M., & Xia, N. (2006). A model for the fleet sizing of demand responsive transportation services with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 651-666.
- Dožić, S., & Kalić, M. (2015). Three-stage airline fleet planning model. *Journal of Air Transport Management*, 46, 30-39.
- Dullaert, W., Janssens, G. K., Sörensen, K., & Vernimmen, B. (2002). New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 53(11), 1232-1238.

- Engevall, S., Göthe-Lundgren, M., & Värbrand, P. (2004). The heterogeneous vehicle-routing game. *Transportation Science*, 38(1), 71-85.
- Etezadi, T., & Beasley, J. E. (1983). Vehicle fleet composition. *Journal of the Operational Research Society*, 34(1), 87-91.
- Choobineh, F. F., Asef-Vaziri, A., & Huang, X. (2012). Fleet sizing of automated guided vehicles: a linear programming approach based on closed queuing networks. *International Journal of Production Research*, 50(12), 3222-3235.
- Fagerholt, K. (1999). Optimal fleet design in a ship routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 6(5), 453-464.
- Fagerholt, K., Christiansen, M., Hvattum, L. M., Johnsen, T. A., & Vabø, T. J. (2010). A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation. *Omega*, 38(6), 465-474.
- Fagerholt, K., Johnsen, T. A., & Lindstad, H. (2009). Fleet deployment in liner shipping: a case study. *Maritime Policy & Management*, 36(5), 397-409.
- Felfle, A. (2013). *Modelos de Optimización de Costos de Transporte Intermodal en el Río Magdalena [Diapositivas de Power Point]*. Recuperado de: <http://www.andi.com.co/cia/Documents/Eventos/Transporte%20fluvial%20en%20Colombia.pdf>.
- Ferrara, A., Gebennini, E., & Grassi, A. (2014). Fleet sizing of laser guided vehicles and pallet shuttles in automated warehouses. *International Journal of Production Economics*, 157, 7-14.
- Liu, F. H., & Shen, S. Y. (1999). The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 50(7), 721-732.
- Gelareh, S., Maculan, N., Mahey, P., & Monemi, R. N. (2013). Hub-and-spoke network design and fleet deployment for string planning of liner shipping. *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), 3307-3321.
- Gelareh, S., & Meng, Q. (2010). A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 76-89.
- Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., & Taillard, É. D. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26(12), 1153-1173.

- George, D. K., & Xia, C. H. (2011). Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks. *European journal of operational research*, 211(1), 198-207.
- Gheysens, F., Golden, B., & Assad, A. (1984). A comparison of techniques for solving the fleet size and mix vehicle routing problem. *Operations-Research-Spektrum*, 6(4), 207-216.
- Gheysens, F., Golden, B., & Assad, A. (1986). A new heuristic for determining fleet size and composition. In *Netflow at Pisa* (pp. 233-236). Springer Berlin Heidelberg.
- Godwin, T., Gopalan, R., & Narendran, T. T. (2008). Tactical locomotive fleet sizing for freight train operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 440-454.
- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81-99.
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- Gould, J. (1969). The size and composition of a road transport fleet. *Journal of the Operational Research Society*, 20(1), 81-92.
- Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M., & Asbjørnslett, B. E. (2012). Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 508-517.
- Halvorsen-Weare, E. E., Gundegjerde, C., Halvorsen, I. B., Hvattum, L. M., & Nonås, L. M. (2013). Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms. *Energy Procedia*, 35, 167-176.
- Han, A. F. W., & Cho, Y. J. (2002). A GIDS metaheuristic approach to the fleet size and mix vehicle routing problem. In *Essays and surveys in metaheuristics*(pp. 399-413). Springer US.
- Haouari, M., Aissaoui, N., & Mansour, F. Z. (2009). Network flow-based approaches for integrated aircraft fleet and routing. *European Journal of Operational Research*, 193(2), 591-599.
- Hemmati, A., Stålhane, M., Hvattum, L. M., & Andersson, H. (2015). An effective heuristic for solving a combined cargo and inventory routing problem in tramp shipping. *Computers & Operations Research*, 64, 274-282.

- Hillier, F. S. L., Hillier, G. J. F. S., & Lieberman, G. J. (1989). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill,
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2041-2061.
- Jabali, O., Gendreau, M., & Laporte, G. (2012). A continuous approximation model for the fleet composition problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), 1591-1606.
- Janjic, A. (2015). Two-step algorithm for the optimization of vehicle fleet in electricity distribution company. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, 307-315.
- Khoo, H. L., & Teoh, L. E. (2014). A bi-objective dynamic programming approach for airline green fleet planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 166-185.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254.
- Korsvik, J. E., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). A large neighbourhood search heuristic for ship routing and scheduling with split loads. *Computers & Operations Research*, 38(2), 474-483.
- Kwon, Y. J., Choi, Y. J., & Lee, D. H. (2013). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 81-89.
- Laake, J., & Zhang, A. (2016). Joint optimization of strategic fleet planning and contract analysis in tramp shipping. *Applied Economics*, 48(3), 203-211.
- Lai, M. F., & Lo, H. K. (2004). Ferry service network design: optimal fleet size, routing, and scheduling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(4), 305-328.
- Lee, Y. H., Kim, J. I., Kang, K. H., & Kim, K. H. (2008). A heuristic for vehicle fleet mix problem using tabu search and set partitioning. *Journal of the Operational Research Society*, 59(6), 833-841.
- Li, X., Leung, S. C., & Tian, P. (2012). A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 365-374.

- Li, X., Tian, P., & Aneja, Y. P. (2010). An adaptive memory programming metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 1111-1127.
- Li, Z., & Tao, F. (2010). On determining optimal fleet size and vehicle transfer policy for a car rental company. *Computers & operations research*, 37(2), 341-350.
- Lima, C. D. R., Goldbarg, M. C., & Goldbarg, E. F. G. (2004). A memetic algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18, 171-176.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1118-1138.
- List, G. F., Wood, B., Nozick, L. K., Turnquist, M. A., Jones, D. A., Kjeldgaard, E. A., & Lawton, C. R. (2003). Robust optimization for fleet planning under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 39(3), 209-227.
- Liu, S., Huang, W., & Ma, H. (2009). An effective genetic algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(3), 434-445.
- Liu, S. C., & Lu, H. J. (2013). A hybrid heuristic method for the fleet size and mix vehicle routing problem. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 30(3), 181-189.
- Loxton, R., Lin, Q., & Teo, K. L. (2012). A stochastic fleet composition problem. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3177-3184.
- Maisiuk, Y., & Gribkovskaia, I. (2014). Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times. *Procedia Computer Science*, 31, 939-948.
- Mancini, S. (2015). A real-life multi depot multi period vehicle routing problem with a heterogeneous fleet: Formulation and adaptive large neighborhood search based matheuristic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Márquez, L., & Cantillo, V. (2013). *Evaluating strategic freight transport corridors including external costs*. *Transportation planning and technology*, 36(6), 529-546.

- Matei, O., Pop, P. C., Sas, J. L., & Chira, C. (2015). An improved immigration memetic algorithm for solving the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Neurocomputing*, 150, 58-66.
- Mazurek, M., & Wesolkowski, S. (2009, March). Fleet mix computation using evolutionary multiobjective optimization. In *Computational intelligence in multi-criteria decision-making, 2009. mcdm'09. ieeesymposium on* (pp. 46-50). IEEE.
- Meng, Q., & Wang, S. (2012). Liner ship fleet deployment with week-dependent container shipment demand. *European Journal of Operational Research*, 222(2), 241-252.
- Meng, Q., & Wang, T. (2011). A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 401-413.
- Meng, Q., Wang, T., & Wang, S. (2012). Short-term liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain container shipment demand. *European Journal of Operational Research*, 223(1), 96-105.
- Meng, Q., Wang, T., & Wang, S. (2015). Multi-period liner ship fleet planning with dependent uncertain container shipment demand. *Maritime Policy & Management*, 42(1), 43-67.
- Milenković, M., & Bojović, N. (2013). A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 107-133.
- Mole, R. H. (1975). Dynamic optimization of vehicle fleet size. *Journal of the Operational Research Society*, 26(1), 25-34.
- Moon, I. K., Qiu, Z. B., & Wang, J. H. (2015). A combined tramp ship routing, fleet deployment, and network design problem. *Maritime Policy & Management*, 42(1), 68-91.
- Nicholson, T. A. J., & Pullen, R. D. (1971). Dynamic programming applied to ship fleet management. *Journal of the Operational Research Society*, 22(3), 211-220.
- Ochi, L. S., Vianna, D. S., Drummond, L. M., & Victor, A. O. (1998, March). A parallel evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with heterogeneous fleet. In *International Parallel Processing Symposium* (pp. 216-224). Springer Berlin Heidelberg.

- Ochi, L. S., Vianna, D. S., Drummond, L. M., & Victor, A. O. (1998, April). An evolutionary hybrid metaheuristic for solving the vehicle routing problem with heterogeneous fleet. In *European Conference on Genetic Programming* (pp. 187-195). Springer Berlin Heidelberg.
- Osman, I. H., & Salhi, S. (1996). Local search strategies for the vehicle fleet mix problem. *Modern heuristic search methods*, 131-153.
- Pace, S., Turkey, A., Moser, I., & Aleti, A. (2015). Distributing fibre boards: A practical application of the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and three-dimensional loading constraints. *Procedia Computer Science*, 51, 2257-2266.
- Parikh, S. C. (1977). On a fleet sizing and allocation problem. *Management Science*, 23(9), 972-977.
- Pessoa, A., Uchoa, E., & Poggi de Aragão, M. (2009). A robust branch-cut-and-price algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Networks*, 54(4), 167-177.
- Powell, B. J., & Perkins, A. N. (1997). Fleet deployment optimization for liner shipping: An integer programming model. *Maritime Policy and Management*, 24(2), 183-192.
- Raa, B. (2015). Fleet optimization for cyclic inventory routing problems. *International Journal of Production Economics*, 160, 172-181.
- Rahimi-Vahed, A., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W. (2015). Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm. *Computers & Operations Research*, 53, 9-23.
- Ramirez, A. (2016). Colombia Competitiva: Índice de Desempeño logístico del Banco Mundial. Bogotá, Colombia. Sala de Prensa del Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e innovación. Recuperado de <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/2016/Paginas/Indice-de-Desempeno-logistico-del-Banco-Mundial.aspx>.
- Redmer, A., Žak, J., Sawicki, P., & Maciejewski, M. (2012). Heuristic approach to fleet composition problem. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 414-427.
- Renaud, J., & Boctor, F. F. (2002). A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 140(3), 618-628.

- Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2010). Solving the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows via adaptive memory programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 695-712.
- Roskopf, M., Lehner, S., & Gollnick, V. (2014). Economic–environmental trade-offs in long-term airline fleet planning. *Journal of Air Transport Management*, 34, 109-115.
- Salhi, S., Sari, M., Saidi, D., & Touati, N. A. C. (1992). Adaptation of some vehicle fleet mix heuristics. *Omega*, 20(5), 653-660.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1993). Incorporating vehicle routing into the vehicle fleet composition problem. *European Journal of Operational Research*, 66(3), 313-330.
- Salhi, S., Wassan, N., & Hajarat, M. (2013). The fleet size and mix vehicle routing problem with backhauls: formulation and set partitioning-based heuristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 56, 22-35.
- Shyshou, A., Gribkovskaia, I., & Barceló, J. (2010). A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 230-240.
- Soonpracha, K., Mungwattana, A., Janssens, G. K., & Manisri, T. (2014). Heterogeneous VRP review and conceptual framework.
- Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e innovación. (2015, 3 Septiembre). Colombia Competitiva: “Colombia es Logística” – La Encuesta Nacional de Logística 2015. Bogotá, Colombia. Sala de Prensa del Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e innovación. Recuperado de <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/2015/Paginas/Colombia-es-Logistica-La-Encuesta-Nacional-de-Logistica-2015.aspx>.
- Steer, Davies & Gleave (2013). *Estudio de demanda del Sistema fluvial del río Magdalena y evaluación Costo Beneficio de un esquema de reactivación de la navegación fluvial* [Informe]. Corporación
- Subramanian, A., Penna, P. H. V., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2012). A hybrid algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 285-295.

- Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO-Operations Research*, 33(1), 1-14.
- Teodorovic, D., Krcmar-Nozic, E., & Pavkovic, G. (1995). The mixed fleet stochastic vehicle routing problem. *Transportation Planning and Technology*, 19(1), 31-43.
- Tirado, G., Hvattum, L. M., Fagerholt, K., & Cordeau, J. F. (2013). Heuristics for dynamic and stochastic routing in industrial shipping. *Computers & Operations Research*, 40(1), 253-263.
- Topaloglu, H. (2006). A parallelizable dynamic fleet management model with random travel times. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 782-805.
- Tütüncü, G. Y. (2010). An interactive GRAMPS algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem with and without backhauls. *European Journal of Operational Research*, 201(2), 593-600.
- Ulusoy, G. (1985). The fleet size and mix problem for capacitated arc routing. *European Journal of Operational Research*, 22(3), 329-337.
- Wassan, N. A., & Osman, I. H. (2002). Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 53(7), 768-782.
- Williams, W. W., & Fowler, O. S. (1980). Minimum Cost Fleet Sizing for a University Motor Pool. *Interfaces*, 10(3), 21-29.
- Wojtaszek, D., & Wesolkowski, S. (2011, April). Multi-objective evolutionary optimization of a military air transportation fleet mix with the flexibility objective. In *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA)* (pp. 96-101). IEEE.
- Wu, P., Hartman, J. C., & Wilson, G. R. (2005). An integrated model and solution approach for fleet sizing with heterogeneous assets. *Transportation Science*, 39(1), 87-103.
- Wyatt, J. K. (1961). Optimal fleet size. *Journal of the Operational Research Society*, 12(3), 186-187.
- Xinlian, X., Tengfei, W., & Daisong, C. (2000). A dynamic model and algorithm for fleet planning. *Maritime Policy & Management*, 27(1), 53-63.
- Yaghini, M., & Khandaghabadi, Z. (2013). A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4127-4138.

- Yaman, H. (2006). Formulations and valid inequalities for the heterogeneous vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 106(2), 365-390.
- Yoshizaki, H. T. Y. (2009). Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 750-758.
- ZHANG, Y. Y., & LI, J. B. (2007). Dynamic optimal model of vehicle fleet size and exact algorithm. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 27(2), 83-91.

ANEXOS

Tabla 10 Principales artículos del FSMVRP

Año	Referencia	Modo de transporte		Problema a resolver				Objetivos			Métodos de Solución		
		Carretera	Ferrocarril	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MC	MAX PROB	REVISION LITERARIA	METODOS EXACTOS	HEURISTICAS	METAHEURISTICAS
1984	Gheysen						X	X		X			
	Golden et al.						X	X				X	
1985	Ulusoy						X	X			X		
1986	Gheysen et al.						X	X				X	
1988	Bookbinder y Reece						X	X			X		
1990	Couillard y Martel	X		X	X			X			X		
1991	Desrochers et al.						X	X				X	
1992	Salhi et al.						X	X				X	
1993	Couillard	X		X				X			X		
	Salhi y Rand						X	X		X			
1995	Teodorovic et al.						X	X				X	
1996	Bertsimas et al.						X			X			
	Osman y Salhi						X	X					
1997	Powell y Perkins				X	X		X					
1998	Ochi et al.						X	X				X	
	Ochi et al.						X	X					X
1999	Liu y Shen	X		x		X		X				X	
	Gendreau						X	X					X
	Taillard						X	X				X	
	Fagerholt						X	X				X	
2000	Xie Xinlian			X	X	X		X			X		
2002	Bojović, N. J.		X	X				X				X	
	W Dullaert, et al.	X		X		X		X					X
	Bojović		X	X				X			X		
	Renaud y Boctor	X				X		X				X	

Año	Referencia	Modo de transporte		Problema a resolver				Objetivos			Métodos de Solución		
		Carretera	Ferrocarril	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MC	MAX PROB	REVISION LITERARIA	METODOS EXACTOS	HEURISTICAS	METAHEURISTICAS
	Crary et al.			X					X		X		
	Wassan y Osman	X					X	X					X
	Han y Cho						X	X					X
	Renaud y Boctor						X	X				X	
	Wassan y Osman						X	X					X
2003	List et al.			X				X			X		
2004	Lima et al	X			X	X		X				X	
	Engevall et al.						X	X			X		

Tabla 11 Artículos del FSMVRP de siglo XXI

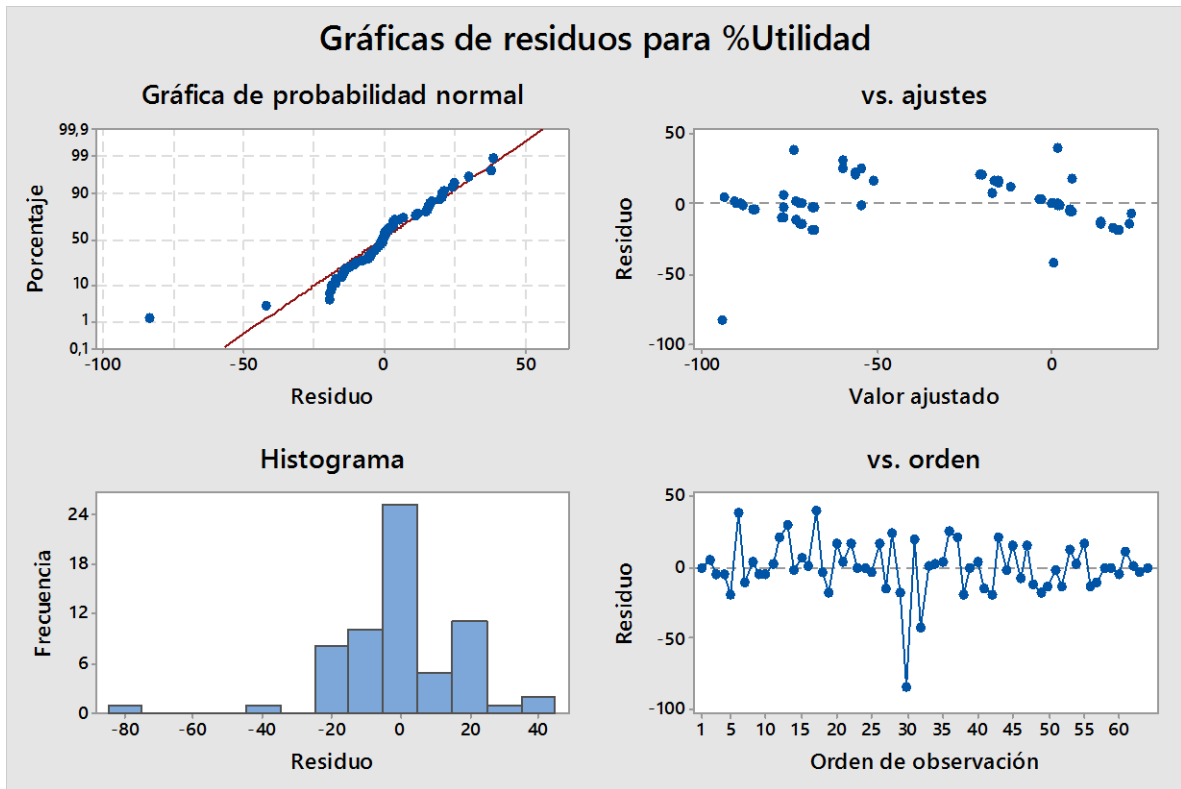
Año	Referencia	Modo de transporte				Problema a resolver				Objetivo							Método de Solución			
		Navegable	Carretera	Ferrocarril	Aéreo	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MIN COS	MAX UTI	MIN TIEM	MIN IMP AMB	MAX UTILIZ	MAX SERV	MIN NUM VEH	REV LIT	Método Exacto	Heurística	Metaheurística
2004	Lai y Lo							X	X									X		
	Christiansen															X				
2005	Brønmo et al.						X			X								X		
	Wu et al.							X	X									X		
2006	Topaloglu			X			X			X								X		
	Diana et al.		X			X	X						X					X		
	Belanger et al.				X		X			X								X		
	Lee et al.							X	X										X	
	Yaman							X	X									X		
2007	Zhang y Li					X	X		X									X		
	Dell'Amico et al.		X			X	X		X										X	
	Choi y Tcha							X	X										X	
	Pessoa et al.							X	X									X		
	Brandão							X	X										X	
2008	Godwin y Narendran			X		X			X				X					X		
	Baldacci et al.							X								X				
	Bräysy et al.							X	X											X
2009	Brandão		X					X	X											X
	Liu et al.		X				X		X											X
	Fagerholt et al.						X		X										X	
	Yoshizaki		X			X		X	X										X	
	Haouari et al.				X		X		X										X	
	Bräysy et al.		X			X		X	X											X
	Mazurek et al.		X			X	X		X		X									X
	Baldacci et al.							X	X								X			

Año	Referencia	Modo de transporte				Problema a resolver				Objetivo							Método de Solución			
		Navegable	Carretera	Ferrocarril	Aéreo	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MIN COS	MAX UTI	MIN TIEM	MIN IMP AMB	MAX UTILIZ	MAX SERV	MIN NUM VEH	REV LIT	Método Exacto	Heurística	Metaheurística
2010	Fagerholt et al.					X		X		X								X		
	Shyshou et al.					X				X								X		
	Meng y Wang					X				X								X		
	Gelareh y Meng							X		X								X		
	Tütüncü	X						X		X									X	
	Li et al.	X						X		X										X
	Li y Tao	X				X				X								X		
	Repoussis y Tarantilis	X							X	X										X
Hoff et al.															X					
2011	Korsvik et al.							X			X									X
	Meng y Wang					X				X								X		
	Cortés et al.					X				X			X					X		
	Brandão	X						X		X										X
	George y Xia	X				X					X							X		
	Wojtaszek y Wesolkowski				X	X				X		X								X
2012	Choobineh et al.	X				X							X					X		
	Meng et al.					X	X				X							X		
	Halvorsen-Weare et al.						X			X									X	
	Redmer et al.	X					X			X										X
	Jabali et al.	X				X	X	X		X								X		
	Subramanian et al.	X					X	X		X									X	
	Li, X et al.	X							X	X										X
	Loxton et al.						X			X								X		
Meng, Q., & Wang, S.							X		X								X			
2013	Shu-Chu Liu y Hsu-Ju Lu	X				X		X		X										X

Año	Referencia	Modo de transporte				Problema a resolver				Objetivo						Método de Solución				
		Navegable	Carretera	Ferrocarril	Aéreo	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MIN COS	MAX UTI	MIN TIEM	MIN IMP AMB	MAX UTILIZ	MAX SERV	MIN NUM VEH	REV LIT	Método Exacto	Heurística	Metaheurística
	Yaghini y Khandaghabadi			X		X				X										X
	Milenković y Bojović			X		X			X								X			
	Kuo-hao Chang et al.	X				X			X								X			
	Halvorsen-Weare et al.					X	X		X								X			
	Kwon et al.	X						X	X			X								X
	Salhi et al.	X							X	X								X		
	Tirado et al.							X	X									X		
	Gelareh et al.							X	X		X							X		
	Bakkehaug et al.								X	X								X		
2014	Roskopf et al.				X	X			X			X					X			
	Raa et al.					X	X		X											X
	Maisiuk y Gribkovskaia					X			X								X			
	Koç, Ç et al.	X				X	X		X			X								X
	Khoo y Teoh				X	X				X		X					X			
	Ferrara et al.	X				X								X			X			
	Soonpracha et al.															X				
	Lin et al.															X				
2015	Moon y Wang						X		X											X
	Meng et al.					X				X							X			
	Hemmati et al.						X		X								X			
	Rahimi-Vahed et al.					X								X				X		
	Dožić y Kalić				X	X	X		X								X			
	Branchini et al.							X		X							X			
	Goeke y Schneider	X						X	X											X
Mancini, S.	X						X	X											X	

Año	Referencia	Modo de transporte				Problema a resolver				Objetivo						Método de Solución				
		Navegable	Carretera	Ferrocarril	Aéreo	FSP	FCP	VRP	FSMVRP	MIN COS	MAX UTI	MIN TIEM	MIN IMP AMB	MAX UTILIZ	MAX SERV	MIN NUM VEH	REV LIT	Método Exacto	Heurística	Metaheurística
	Matei et al		X					X	X									X		
	Laake, J., & Zhang, A.					X				X							X			
	Pace et al.		X					X	X									X		
	Chandra et al.							X	X								X			
	Bakkehaug et al.	X						X		X										X
	Janjic, A.		X			X	X		X					X			X			
	Caceres-Cruz et al.														X					

Gráfica 12 Gráfica de Residuo para %Utilidad



Gráfica 13 Gráfica de residuos para %Externalidades

